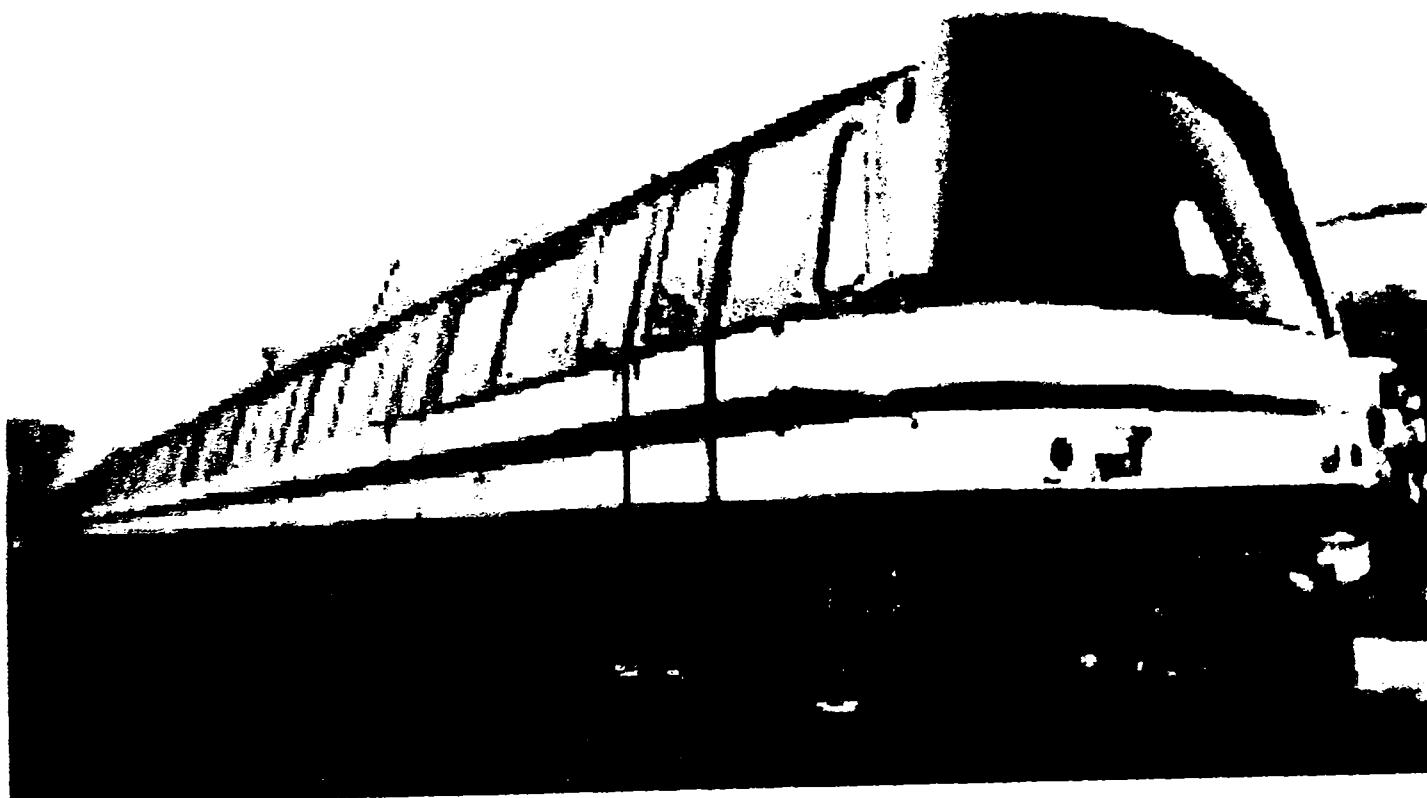


MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE
UNIVERSITATEA „POLITEHNICA” TIMIȘOARA
FACULTATEA DE ELECTROTEHNICĂ
CATEDRA M.A.U.E.

*Contribuții privind alegerea și optimizarea sistemelor de
acționare electrică la metrou*

INGINER
IOAN BELE



Conducător științific:
Prof. Dr. Ing. EUGEN SERACIN

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA „POLITEHNICA”
T. MIȘO. RA

1999

2004
14/6

PREFAȚĂ

Progresele realizate în domeniul electronicii de putere și mai precis a semiconductoarelor de putere, au permis utilizarea variatoarelor de tensiune continuă (VTC) în sistemul de acționare cu mașina de curent continuu și folosirea invertoarelor în sistemul de alimentare cu mașina de curent alternativ trifazat. Acționările cu VTC și cu invertoare de frecvență au luat un deosebit avânt în ultimi ani în toată lumea.

În lucrarea de față autorul prezintă un nou sistem de acționare electrică modernă la metroul din România cu posibilitatea aplicării imediate, care să conducă la creșterea fiabilității, la sporirea confortului călătorilor și nu în ultimul rând la reducerea consumului energetic și a cheltuielilor de exploatare.

Rezultatele obținute pot fi valorificate de către alți cercetători în domeniu, dar și de către proiectanții și constructorii de metrou.

Teza de doctorat a fost realizată sub îndrumarea permanentă a domnului Prof. dr. ing. Eugen Seracin, care a dat dovadă de o înțelegere și o răbdare deosebită ajutându-mă și la alegerea temei, reușind să-mi împărtășească din vasta și bogata sa experiență. Pentru toate acestea îi acord sincere mulțumiri și o deosebită considerație.

Mulțumesc pe această cale cadrelor didactice de la catedra MAUE a Facultății de Electrotehnică din Timișoara, care cu o deosebită bunăvoință m-au ascultat și m-au sfătuit pe toată perioada elaborării lucrării.

Gândurile mele de mulțumire se îndreaptă spre domnii Prof. dr. ing. Ștefan Bartzler și Cercet. Princ. dr. ing. Ioan Străinescu, care mi-au dat prețioase îndrumări și m-au ajutat la elaborarea tezei. Pentru răbdarea cu care au citit manuscrisul și bunăvoința de care au dat dovadă la elaborarea și redactarea referatului final al tezei, doresc să le mulțumesc atât distinșilor domni profesori enumerați mai sus, cât și domnului Prof. dr. ing. Gheorghe Manolea, de la Facultatea Electro-Mecanică Craiova.

De asemenea mulțumesc colectivului de ingineri de la ICPE SAERP SA București pentru ajutorul acordat la efectuarea încercărilor experimentale și tuturor cadrelor didactice care m-au format ca specialist.

Pentru răbdarea și înțelegerea acordată pe perioada elaborării tezei doresc să mulțumesc soției și fiicei mele ADRIANA.

Lista prescurtărilor și notațiilor

REM – Ramă electrică de metrou (unitate electrică de metrou, compusă din două vagoane A și B).

Vagon A – Unul din cele două vagoane ale ramei electrice de metrou.

Vagon B – Celălalt vagon al ramei electrice de metrou.

MT – Motor de tracțiune. ,

GF – Generator de frânare.

VTC – Variator de tensiune continuă.

GTO – Gate Turn - Off (tiristor cu stingere pe poartă).

IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor (tranzistor bipolar cu poartă izolată).

CFS – Convertor static de frecvență.

ISF – Invertor static de frecvență.

IS – Invertor static.

CS – Convertor static.

SCB – Sector de bloc al liniei ferate.

Vcc – Volți curent continuu.

Vca – Volți curent alternativ.

SACVAM – Sistem automat de comandă vagon A de la metrou.

Wz – Indicele calității de mers (Spelling).

INDUSI – Instalație de control punctal al vitezei vehiculelor feroviare.

CAB-SIGNAL – Instalație de transmitere a semnalelor de viteză prin calea de rulare.

Lansat – Deplasarea vehiculului cu motorul de tracțiune nealimentat electric și cu viteză mai mare decât 1 km/h.

SC ASTRA Vagoane Arad SA -- Societatea constructoare de vagoane din Arad.

ICPV Arad – Institutul de cercetări și proiectări pentru vagoane din Arad.

ICPE București – Institutul de cercetări și proiectări în electrotehnică din București.

ICPE SAERP București – Societatea de acționări echipamente și redresoare de putere din București.

CUPRINS

Cap. 1. Introducere	6
Cap. 2. Stadiul actual al soluției de acționare electrică la METROU în ROMÂNIA.....	13
2.1. Scurt istoric.....	13
2.2. Descrierea acționării electrice actuale.....	14
2.2.1. Descrierea ramei de metrou.....	14
2.2.2. Forma constructivă.....	15
2.2.3. Caracteristicile tehnice principale și dinamice.....	16
2.2.4. Funcționarea vehiculului în regim de tracțiune.....	17
2.2.5. Funcționarea vehiculului în regim de frânare.....	20
2.3. Modificarea vitezei.....	22
2.4. Schemele electrice de comandă.....	25
2.5. Calculul caracteristicilor de tracțiune.....	30
2.5.1. Motorul de tracțiune.....	30
2.5.2. Caracteristicile constructive ale motorului de tracțiune.....	30
2.5.3. Caracteristica magnetică	31
2.5.4. Caracteristicile vitezei unghiulare	33
2.5.5. Caracteristicile randamentului.....	35
2.5.6. Caracteristicile cuplurilor.....	36
2.5.7. Caracteristicile mecanice.....	36
2.6. Calculul caracteristicilor de frânare.....	37
2.7. Concluzii.....	41
Cap. 3. Sisteme de acționare electrică reprezentative ale metrourilor din alte țări.....	44
3.1. Principalele tipuri de acționări electrice la metrou.....	44
3.2. Acționarea cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei cu VTC.....	46
3.2.1. Introducere	46
3.2.2. Metroul din Bruxelles.....	49
3.2.3. Metrouri fabricate de firma GEC-ALSTHOM.....	51
3.2.4. Metrouri fabricate de firma ABB.....	56
3.3. Acționarea cu mașina de curent alternativ trifazat asincronă și reglarea vitezei cu invertor de frecvență	56
3.3.1. Necesitatea introducerii acestui sistem	56
3.3.2. Tracțiunea electrică HOLEC	58
3.3.3. Tracțiunea electrică TOSHIBA	59
3.3.4. Tracțiunea electrică ELIN	61
3.3.5. Tracțiunea electrică ABB	63
3.4. Concluzii	63
Cap. 4. Aplicarea unei soluții de acționare reglabilă de concepție nouă la metrou	65
4.1. Deficiențele și neajunsurile actualei soluții	65

4.2. Posibilitățile de perfecționare a actualei soluții	66
4.2.1. Înlocuirea motorului electric de tracțiune de curent continuu cu motorul electric asincron	66
4.2.2. Modernizarea motorului electric de tracțiune	67
4.2.3. Simplificarea cablajului de forță și reducerea cantitativă a lui	67
4.2.4. Schimbarea principiului de acționare	68
4.2.5. Perfecționarea blocului automat de comandă a reglării vitezei	70
4.2.6. Perfecționarea instalațiilor electrice auxiliare ale metroului și folosirea unor componente fiabile	71
4.3. Criterii de alegere a soluției optime	74
4.4. Concluzii	77
Cap. 5. Schema electrică de acționare propusă folosind variatorul de tensiune continuă	80
5.1. Descrierea schemei electrice principale de acționare	80
5.1.1. Varianta schemei principale alese	80
5.1.2. Folosirea tiristorului GTO	81
5.2. Comportarea motorului de curent continuu la alimentare prin VTC	82
5.2.1. Regimul pulsator de alimentare al motorului de curent continuu	82
5.2.2. Solicitățile suplimentare ale motorului la alimentarea cu VTC	83
5.3. Calculul și determinarea parametrilor componentelor principale ...	85
5.3.1. Calculul puterii motorului de tracțiune și a vitezei comerciale	85
5.3.2. Calculul de dimensionare al filtrului de intrare	94
5.3.3. Protecția la depășirea valorilor parametrilor tiristoarelor	101
5.4. Evacuarea căldurii, răcirea tiristoarelor și consumul energetic	104
5.5. Prezentarea schemei electrice de acționare pentru o ramă de metrou	106
5.5.1. Schema electrică desfășurată a circuitului de forță	106
5.5.2. Funcționarea schemei în regim de tracțiune	110
5.5.2.1. Tracțiunea pentru mersul înainte	110
5.5.2.2. Tracțiunea pentru mersul înapoi	111
5.5.3. Funcționarea schemei în regim de frânare	112
5.5.3.1. Frânarea la mersul înainte	112
5.5.3.2. Frânarea la mersul înapoi	115
5.6. Schema electrică de comandă	116
5.6.1. Prezentarea instalației electrice de comandă	116
5.6.2. Comanda și supravegherea instalațiilor de pe metrou cu automat programabil	117
5.6.2.1. Rolul automatului programabil	117
5.6.2.2. Cutia neagră a automatului programabil	118
5.6.2.3. Funcțiile logice de comandă	119
5.6.2.4. Codul erorilor	120
5.7. Concluzii	122
Cap. 6. Încercările experimentale	124
6.1. Prezentarea instalației	124

6.2. Funcționarea instalației de forță	126
6.2.1. Funcționarea standului cu MT în regim de tracțiune	129
6.2.2. Funcționarea standului cu MT în regim de frânare	129
6.3. Amplasarea aparaturii de măsură	130
6.4. Schema electrică de comandă a standului	132
6.5. Prezentarea componentelor standului	137
6.6. Prelucrarea și interpretarea rezultatelor	143
6.7. Importanța realizărilor experimentale	150
6.8. Concluzii	151
Cap. 7. Sistemul de acționare cu mașina asincronă alimentată prin inverter	154
7.1. Introducere	154
7.2. Posibilități de aplicare a noii soluții cu mașina de curent alternativ trifazat asincronă	155
7.3. Motorul de tracțiune asincron	157
7.3.1. Caracteristica electromecanică a motorului asincron de tracțiune	158
7.3.2. Reglarea turației motoarelor asincrone de tracțiune	160
7.3.3. Caracteristica de tracțiune a vehiculului	162
7.3.4. Metodologia de calcul pentru stabilirea caracteristicilor de tracțiune în cazul acționării cu mașina asincronă	163
7.4. Invertoarele de frecvență	175
7.4.1. Introducere, descriere și funcționarea schemei	175
7.4.2. Condiții tehnice de exploatare pentru invertoarele de tensiune- frecvență	180
7.5. Reglarea vitezei motoarelor electrice de tracțiune asincrone alimentate prin convertoare de frecvență pe baza principiului orientării după câmp	181
7.6. Condiții privind înlăturarea influenței perturbatoare produsă de vehicule de tracțiune asupra instalațiilor din cale și din vecinătatea căii	190
7.7. Concluzii	191
Cap. 8. Concluzii și contribuții	194
8.1. Concluzii comparative între cele două sisteme moderne de acționare electrică la metrou	194
8.1.1. Acționarea cu mașina de c.c. și reglarea vitezei cu VTC	194
8.1.2. Acționarea cu mașina de curent alternativ trifazat asincronă și reglarea vitezei cu inverter de frecvență	196
8.1.3. Alte modificări	198
8.2. Concluzii finale	199
8.3. Contribuții personale	200
BIBLIOGRAFIE	210

Capitolul 1

Introducere

Tracțiunea și transportul cu vehicule electrice reprezintă un complex de agregate și de transformări de energie, plecând de la energia primară, chimică sau hidraulică, prin energia electrică, până la lucrul mecanic rezultat la osia motoare, necesar pentru transport.

Primul vagon electric a fost construit în anul 1835 în America, alimentat de la o baterie de elemente galvanice. Ziua de 31 mai 1879 este considerată ziua de naștere a tracțiunii electrice feroviare, când la Berlin s-a pus în funcțiune o locomotivă electrică alimentată în curent continuu de la o șină centrală. De atunci și până în prezent, transportul pe calea ferată electrificată a evoluat foarte mult.

Administrațiile de cale ferată sunt supuse tot mai mult la presiuni privind concurența cu celelalte sisteme de transport: auto, aerian și naval.

Concluziile specialiștilor în problemele transportului urban arată că numai un sistem de transport în comun bine organizat și modernizat, poate face față deplasărilor populației pe teritoriul marilor aglomerații și în zonele lor de influență. Se consideră astfel la ora actuală că cel mai sigur mijloc de transport rămâne transportul pe calea ferată.

Creșterea numărului populației, mai ales în marile metropole, ca urmare a dezvoltărilor economice și a extinderilor pe orizontală, a dus la imposibilitatea asigurării transportului la suprafață a călătorilor, motiv pentru care a apărut METROUL. Deplasarea cu aceste mijloace de transport a reușit să scurteze distanțele dintre marile cartiere sau centre industriale, mai ales la construcțiile subterane, și să nu mai depindă de celelalte vehicule de transport sau de aglomerările urbane.

Dacă în anul 1900 numărul orașelor din lume care dispuneau de metrou era 9, în anul 1950 a crescut la 19, în anul 1980 a ajuns la cca. 55, în schimb în anul 1998 numărul lor a trecut peste 100.

Construcția tunelului de metrou și a ramelor electrice începute în anul 1976, au permis în anul 1979 să circule cu călători în București, primele unități de metrou realizate în România.

Pentru a fi competitiv și rentabil, parcul de metrouuri trebuie adus de către specialiști la parametri tehnici superiori, dar în același timp el poate fi îmbunătățit prin introducerea de vehicule noi cu performanțe care să corespundă și cerințelor de viitor pentru următorii 20-30 de ani.

Actualul parc de metrouuri din București nu corespunde situației tehnicii actuale, conținând agregate și componente nefiabibile și cu parametri tehnici scăzuți. Această neconcordanță se datorează și

mutațiilor economice și sociale atât pe plan european, cât și pe plan mondial, evidențiindu-se ca fenomene cu caracter permanent și evolutiv.

Tendențele evolutive ale necesităților de transport cu metroul urmăresc creșterea coeficientului de confort al călătorilor, creșterea vitezelor de circulație, dar, nu în ultimul rând, creșterea fiabilității componentelor și agregatelor vehiculului, reducerea consumului de energie electrică și creșterea siguranței circulației.

Teza de doctorat prezentată de autor, cu titlul **“CONTRIBUȚII PRIVIND ALEGEREA ȘI OPTIMIZAREA SISTEMELOR DE ACȚIONARE ELECTRICĂ LA METROU”** și-a găsit motivația în dezideratele prezentate anterior și în continuare.

Mijloacele tehnice, cu care s-au realizat majoritatea vehiculelor electrice de tracțiune, s-au schimbat foarte mult în ultimii 20 de ani.

Pe baza studiilor făcute de autor, au rezultat în principiu trei mari sisteme de acționare electrică reprezentative utilizate la metrou în lume:

1. Acționarea cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei reostatică.
2. Acționarea cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei cu VTC (variator de tensiune continuă).
3. Acționarea cu mașina de curent alternativ trifazat și reglarea vitezei cu invertor de frecvență.

Cele trei sisteme au unele particularități specifice și anume:

- toate sunt alimentate în curent continuu;
- toate permit funcționarea și în regim de frânare electrică;
- alimentarea cu energie electrică de la rețea poate fi făcută atât cu captatoare de la șina a treia, cât și cu pantograf de la o catenară plasată deasupra vehiculului;
- primele două folosesc pentru tracțiune mașina de curent continuu, iar al treilea mașina de curent alternativ trifazat;
- ultimele două sisteme permit funcționarea și în regim de frânare electrică recuperativă;
- primul sistem realizând regimul de motor cu reglare a vitezei reostatică are consumul de energie mai mare cu 20%, față de următoarele două sisteme, care consumă numai atât cât se transformă în lucru mecanic;
- primul sistem are nevoie de agregate pentru disiparea căldurii, pe când următoarele două nu au consum rezistiv;
- primul sistem realizează reglarea vitezei în trepte, iar următoarele două permit o reglare continuă și fină a vitezei;
- toate trei sistemele au atât avantaje cât și dezavantaje.

Unele firme producătoare și companii de transport din lume au păstrat multă vreme primul sistem și au trecut direct la al treilea.

Altele nu au trecut încă la al treilea preferând să-l modernizeze pe al doilea.

Unii constructori de metrou au introdus un transformator suplimentar cu redresor, ducând astfel la posibilitatea funcționării și în liniile de contact alimentate în curent alternativ cu tensiunea de 25 KV și frecvența de 50 Hz. În acest fel, vehiculul respectiv poate circula atât în tunel, cât și suburban la suprafață.

În România, sistemul de acționare electrică la metrou este cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei reostatic. Actualul sistem are numeroase dezavantaje (dar și câteva avantaje), care vor fi descrise în capitolele prezentate în continuare.

Găsirea și aplicarea unor soluții mai economice și mai fiabile în acționarea electrică la metrou necesită în primul rând cunoașterea amănunțită a soluției existente, a tuturor modificărilor care s-au făcut pe parcurs și a îmbunătățirilor aduse, dar, nu în ultimul rând, stadiul la care au ajuns alte companii constructoare de metrouri din lume.

Toate aceste neajunsuri și dezavantaje (reglarea vitezei în trepte, consum de energie mare, dimensiuni și gabarite ridicate ale agregatelor, imposibilitatea frânării recuperative și fiabilitatea scăzută), impun trecerea la un alt sistem de acționare, la o altă variantă din motive funcționale, economice și de confort.

Alegerea unui nou sistem în acționarea electrică la metrou trebuie făcut în așa fel, încât să se amortizeze investițiile, să crească siguranța în exploatare, dar și confortul călătorilor.

Introducerea unei soluții noi implică proiectarea și realizarea modelului experimental, proiectarea și realizarea prototipului, dar și verificarea lui în exploatare, toate acestea necesitând o perioadă de timp mai îndelungat.

În prezenta lucrare, s-au abordat două soluții, rezultate din cele două sisteme de acționare moderne existente la ora actuală în lume, și practicate de multe companii producătoare.

Prima soluție modernă, de acționare cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei cu VTC, se poate aplica rapid cu prilejul reparațiilor capitale, nu implică foarte multe schimbări, permite folosirea actualului motor electric de tracțiune, a actualei caroserii, fiind în același timp cea mai ieftină, mai ușor de exploatat și mai ușor de întreținut, motiv pentru care este propusă de autor. La această soluție, autorul are contribuții personale de studiu și concepție, de realizare practică a schemelor și a modelului experimental și de realizare a măsurătorilor. Autorul a mai proiectat și executat o parte din schemele electrice de la soluția clasică existentă în prezent la metrourile din București.

Elementul de noutate al tezei constă în aplicarea soluției de reglare cu VTC în condițiile specifice de la metrou, pentru care schema este de concepție originală a autorului, găsirea unor

componente și agregate cu fiabilitate ridicată și la parametrii superiori construite atât în țară, cât și în străinătate. De asemenea, se folosește cel mai modern mijloc de automatizare a conducerii și reglării vitezei, AUTOMATUL PROGRAMABIL CU MICROPROCESOR, care pe baza unui program bine stabilit, poate fi foarte ușor modificat și adaptat la nevoie și altor cerințe care apar pe parcurs. Folosirea tiristoarelor GTO permite ca legătura între microprocesor și acestea să se facă cu fibre optice, eliminând astfel o serie de neajunsuri și de paraziți, care ar putea să apară în circuitele de comandă. Verificarea bunei funcționări a automatului programabil cu microprocesor și a instalației de pe vehicul poate fi ușor realizată pe baza unui program, cu un calculator conectat la interfața lui.

A doua soluție modernă, care poate fi aplicată la metrou, este acționarea cu mașina de curent alternativ trifazat și reglarea vitezei cu invertor de frecvență. Aceasta elimină dezavantajele folosirii mașinii electrice de curent continuu cu colector și oferă avantajele date de mașina asincronă cu rotorul în scurtcircuit și cu o fiabilitate ridicată.

Acționarea cu mașina electrică asincronă poate fi considerată de perspectivă, deoarece necesită modificări foarte mari la actuala construcție existentă. Se poate păstra numai caroseria, dar fără cutiile metalice pentru aparatele plasate sub șasiu, electronica de comandă este foarte complicată și au loc multe schimbări în structura vehiculului. Exploatarea acestor tipuri de vehicule este mai greu de realizat, necesitând atât aparatură complicată pentru depanare și întreținere, cât și un număr mare de specialiști cu pregătiri diferite. Nu în ultimul rând, prețul de cost este mai ridicat.

Aplicarea unei soluții noi cere timp pentru verificarea ei în practică, pentru stabilirea fiabilității și pentru însușirea principiului de funcționare de către personalul de întreținere și exploatare.

Soluția de acționare cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei cu VTC a fost folosită la troleibuze, care circulă cu călători de peste doi ani în București, de unde autorul a adunat date informative referitoare la: creșterea fiabilității componentelor (chiar și a motorului electric de tracțiune), la modul de exploatare, la ușurința conducerii, la acceptarea ei de către personalul de exploatare și întreținere. Acest sistem de acționare mai este încă păstrat de multe companii de transport din lume, dar și proiectat și executat de multe firme de prestigiu.

Rezultatele studiilor, cercetărilor și calculelor din prezenta lucrare, precum și rezultatele încercărilor experimentale realizate de autor, sunt utile atât pentru proiectarea și exploatarea imediată cât și în perspectivă.

În continuare, se va prezenta conținutul tezei în ordinea cronologică a elaborării ei.

În **capitolul 2** intitulat "Stadiul actual al soluției de acționare electrică la METROU în ROMÂNIA", după o scurtă prezentare a istoricului și a apariției metroului în București, autorul descrie acționarea electrică a acestui vehicul, împreună cu funcționarea lui atât în regim de tracțiune, cât și în regim de frânare, modul în care se modifică viteza și schemele electrice de comandă a actualei soluții. Continuă apoi cu calculul caracteristicilor de tracțiune și de frânare, plecând de la datele cunoscute ale motorului de tracțiune, ale vehiculului, precum și de la ecuațiile și relațiile matematice cunoscute din literatura de specialitate. În ultima parte a capitolului, autorul prezintă concluziile personale referitoare la funcționarea trenurilor de metrou cu motorul de tracțiune de curent continuu și reglarea vitezei reostatic, avantajele și dezavantajele acestui sistem de acționare. Aceste concluzii au fost trase pe baza datelor adunate de autor în cei 20 de ani de exploatare, a participării la majoritatea dezbaterilor care au avut loc la conducerea întreprinderii METROREX pe tema apariției unor defecte de masă cauzate de fiabilitatea redusă a tuturor componentelor schemei de acționare și de comandă, și a activității concrete personale de rezolvare a lor.

În **capitolul 3** intitulat "Sisteme de acționare electrică reprezentative ale metrourilor din alte țări", autorul prezintă cele două sisteme mai reprezentative aplicate de foarte multe firme constructoare și de companii producătoare din lume. În subcapitolul "Acționarea cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei cu VTC", autorul descrie considerațiile generale ale acestui sistem de acționare, continuuând cu prezentarea caracteristicilor constructive și funcționale pentru câteva tipuri de metrouri de acest fel cum sunt: metroul din Bruxelles, metrourile fabricate de firma GEC-ALSTHOM și ABB. În mod asemănător, este prezentată apoi necesitatea introducerii sistemului de acționare cu mașina de curent alternativ asincron trifazat și reglarea vitezei cu invertor de frecvență, odată cu caracteristicile constructive și funcționale pentru câteva tipuri de metrouri de acest fel, realizate de firme de prestigiu ca: HOLEC, TOSHIBA, ELIN, ABB. Concluziile parțiale rezultate încheie acest capitol.

Capitolul 4 intitulat "Aplicarea unei soluții de acționare reglabilă de concepție nouă la metrou" dă posibilitatea autorului tezei să prezinte neajunsurile actualei soluții de acționare la metrou, atât pe baza datelor din literatura de specialitate, cât și pe baza datelor personal adunate de acesta în timpul fabricației celor 250 de unități de metrou și pe parcursul celor 20 de ani de exploatare.

Continuă apoi cu prezentarea posibilităților de perfecționare a actualei soluții, cu criteriile de alegere a soluției optime. Concluziile desprinse de autor din acest capitol sunt acelea că, în afară de înlocuirea sistemului, mai sunt necesare și alte modificări cum ar fi: modificarea schemele electrice de comandă (cu aparatura specifică),

modernizarea motorului electric de tracțiune, perfecționarea blocului automat de comandă și perfecționarea instalațiilor electrice auxiliare ale metroului.

În **capitolul 5** denumit "Schema electrică de acționare folosind variatorul de tensiune continuă", autorul a prezentat schema electrică principială de acționare, comportarea motorului de tracțiune la alimentarea cu VTC, calculul și determinarea parametrilor componentelor principale în cazul folosirii tiristoarelor GTO, evacuarea căldurii și protecția la suprasarcini și supracurenți. Prezentarea schemei electrice de acționare de concepție proprie a autorului este făcută cu descrierea funcționării ei, atât în regim de tracțiune, cât și în regim de frânare.

Pentru comanda și supravegherea instalațiilor electrice de pe metrou, se impune folosirea automatului programabil cu microprocesor care deține o serie de performanțe cum sunt: îmbunătățirea preciziei comenzii și reglării vitezei, înregistrarea datelor de funcționare (ore, viteză, curenți, etc.), înregistrarea altor câteva mii de semnale primite sau transmise într-o anumită perioadă de timp, asigurarea operațiilor de diagnosticare a funcționării (dar și a depanării în caz de apariție a unui defect), luarea în considerare a anumitor neliniarități funcționale și introducerea unor reglaje.

Cutia neagră a automatului programabil asigură un ajutor eficient și oferă asistență directă de mari proporții, prin informațiile pe care le poate stoca. La aceste informații se poate apela foarte simplu prin intermediul unui laptop conectat la interfața automatului programabil. Unele defecte pot fi analizate și afișate codificat pe un display, ușurând în acest mod conducerea și supravegherea vehiculului.

Concluziile care încheie acest capitol au rolul de a prezenta simplitatea schemei electrice de acționare cu VTC, ușurința introducerii ei pe actualul metrou clasic cu prilejul reparațiilor capitale, modul de determinare a puterii de durată pentru motorul de tracțiune în situația specifică metroului din București.

Capitolul 6 intitulat "Încercări experimentale" prezintă standul cu care s-au făcut încercările și măsurătorile pe un model experimental, cu componente și agregate de tracțiune identice cu ale metroului (puterea fiind de 150 kW față de 185 kW la metrou). Aceste componente au fost: motorul de tracțiune, variatorul de tensiune continuă, inductivitatea motor și rețea, condensatorul filtru, întrerupătorul automat ultra rapid, contactoarele din schema de forță, aparatele de comandă și supraveghere, și nu în ultimul rând automatul programabil. Parametrii funcționali ai sistemului de acționare, măsurați și înregistrați au fost: tensiunea filtrului de rețea, curentul de referință impus motorului de tracțiune, curentul real prin motor și viteza de circulație a vehiculului (prelucrată din viteza unghiulară a motorului electric), precum și alți parametri. Rezultatele încercărilor

au permis studiul și analiza sistemului de acționare până în cele mai mici detalii. Având în vedere că numărul orelor de funcționare a fost destul de mare, s-au putut trage concluzii referitoare la duranța unor componente și la încălzirea acestora.

În cadrul încercărilor experimentale, autorul a participat alături de alți specialiști la efectuarea probelor și interpretarea rezultatelor, prilej cu care s-a dovedit necesar realizarea unor modificări în schemele electrice. Actualul capitol mai prezintă specificația de echipament a tuturor componentelor folosite pe stand la a cărei schemă de comandă a avut contribuție și autorul. Importanța încercărilor experimentale și concluziile parțiale încheie acest capitol.

În **capitolul 7** intitulat “Sistemul de acționare cu mașina de curent alternativ trifazat asincronă alimentată prin inverter”, se trece în revistă necesitatea și posibilitățile de aplicare a acestei soluții și la metrou, luând în considerare particularitățile specifice ale acestuia. Plecând de la schema de principiu a unui inverter cunoscut și folosit de către alte companii de transport din lume, autorul propune o schemă electrică de acționare pentru metroul din România. Pentru un caz concret, el elaborează metodologia de calcul pentru stabilirea caracteristicilor de tracțiune în cazul acționării cu mașina de curent alternativ trifazat asincronă.

Sunt prezentate aici caracteristicile de tracțiune $F_0(v)$, a cuplului electromagnetic $M_e(v)$, precum și dependența dintre tensiune și frecvență pentru obținerea forței de tracțiune dorită. Din acestea rezultă apoi și alte dependențe cum sunt: tensiunea funcție de viteză $U(v)$, frecvența funcție de viteză $f(v)$, turația mașinii electrice funcție de viteză $n(v)$ și tensiunea funcție de turație $U(n)$. Folosirea acestui sistem de acționare la metrou provoacă o serie de influențe perturbatoare asupra instalațiilor de cale și din vecinătatea căii. Reglarea vitezei motoarelor electrice de tracțiune asincrone poate avea la bază principiul orientării după câmp.

Capitolul 8 “Concluzii și contribuții” încheie lucrarea și prezintă concluziile finale și contribuțiile personale ale autorului. Aici se mai tratează concluziile comparative între sistemul de acționare cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei cu VTC, și sistemul de acționare cu mașina asincronă de curent alternativ trifazat și reglarea vitezei cu inverter de frecvență. Sunt prezentate apoi atât avantajele, cât și dezavantajele celor două sisteme, dar și alte modificări ce sunt necesare pe vehicul, care să conducă în final la creșterea fiabilității ramei electrice de metrou în exploatare și la reducerea prețului de cost.

Capitolul 2

Stadiul actual al soluției de acționare electrică la metrou în România

2.1. Scurt istoric

Introducerea transportului urban cu metroul în România a dus la plasarea București-ului alături de cele peste o sută de orașe din lume, care folosesc acest mijloc de transport în prezent.

La noi în țară, tracțiunea electrică în curent continuu își are originea în urmă cu peste 100 de ani, când în București s-a dat în folosință una dintre primele linii de tramvai electric din lume, urmată apoi în orașele Timișoara, Iași și Brăila.

Prima cale ferată electrificată din România a fost construită în anul 1912 pe ruta ARAD-PODGORIA, la tensiunea de 1500 Vcc.

Acționarea în curent continuu a continuat în foarte multe orașe ale țării, prin construcția tramvaielor și troleibuzelor, care au dotat regiile autonome de transport în comun urbane și suburbane.

Construcția metroului în România a început în anul 1976 prin realizarea celor două unități prototip la S.C.ASTRA VAGOANE S.A. din Arad, după proiectul tehnic realizat de Întreprinderea Metroul București și un proiect de execuție al I.C.P.V. Arad.

În paralel, s-a început și construcția tunelului pentru metrou în București. După terminarea probelor experimentale, a continuat fabricarea altor 12 unități de metrou a seriei zero (fiecare compusă din două vagoane).

În anul 1979, s-a dat în folosință în mod oficial și cu călători, primul tronson de metrou al magistralei 1 din București, dotat cu 12 unități de metrou.

Începând cu anul 1981, fabricarea seriei a continuat, iar în anul 1991, s-a încheiat practic cu executarea unității de metrou numărul 250.

Aceste unități de metrou sunt dotate cu mașini electrice de curent continuu pentru acționarea osiilor, iar modificarea vitezei se face reostatic cu ajutorul controlerelor.

Pe parcursul anilor de fabricație, au fost aduse numeroase îmbunătățiri ale soluțiilor constructive inițiale și ale schemelor electrice din instalația de tracțiune și comandă, iar până în anul 1987, cele 12 unități de metrou ale seriei zero au fost modificate în întregime, la nivelul ultimelor metrouri construite.

A continuat apoi executarea reparațiilor capitale pentru primele unități de metrou construite din producția de serie, unde s-au aplicat atât ultimele îmbunătățiri ale soluțiilor constructive obținute anterior, cât și ale schemelor electrice.

După un proiect tehnic realizat în 1981 de către I.C.P.E. București, în anul 1986, s-au mai construit două prototipuri de metrou acționate cu VTC (variator de tensiune continuă). După efectuarea probelor și a măsurătorilor în Arad și București, activitatea la aceste rame a încetat, astfel că ele nu au ajuns să circule cu pasageri datorită unor defecțiuni ale aparatelor de comandă și de forță (nu s-a aprobat nici un import de completare pentru unele componente performante), motoarele de tracțiune s-au realizat cu economie exagerată de cupru și nu s-a atins viteza maximă impusă. Cele două rame de metrou prototip acționate cu VTC au fost transformate în metroui clasice în anul 1992.

Pentru găsirea și aplicarea unor soluții mai fiabile și mai economice în acționarea electrică de la metrou, este necesar cunoașterea neajunsurilor actualei soluții și stadiul actual la care au ajuns alte firme constructoare de metroui din lume.

2.2. Descrierea acționării electrice actuale

2.2.1. Descrierea ramei de metrou

Rama electrică de metrou (REM) se compune din două vagoane (denumite A și B), cuplate între ele permanent atât din punct de vedere mecanic, electric, cât și pneumatic, formând o unitate de tracțiune cu cabine de conducere la ambele capete.

Cele două vagoane nu pot circula independent unul față de altul, aparatura ce le echipează fiind distinctă și în același timp necesară funcționării în ansamblul unei unități (rame) de metrou.

Vagoanele de metrou sunt realizate astfel, încât să poată funcționa și circula într-un tren în trei variante:

- o ramă;
- două rame cuplate;
- trei rame cuplate.

Acționarea a două osii motoare este realizată de către motorul de tracțiune prin intermediul reductoarelor montate pe un boghiu. În acest fel, toate osiile sunt motoare.

Ambele vagoane au la un capăt cuplă centrală, care realizează legătura electrică, pneumatică și mecanică între rame.

Pe fiecare parte, vagonul are patru uși pentru accesul călătorilor și o ușă pentru accesul în cabina de conducere. Între cele două vagoane, există o ușă de intercomunicație, folosită numai de către mecanic și de personalul de întreținere și reparații din depouri.

Agregatele de forță și alte echipamente sunt plasate pe cele două vagoane pentru a realiza o greutate uniform distribuită din tara fiecărui vagon. Acestea sunt: compresorul pentru prepararea aerului comprimat, controlerul de mers, controlerul de frână, întrerupătorul automat principal, convertizorul rotativ, bateriile de acumuloare, reostatele pentru demaraj și frânare, inversoarele de sens, alte reostate și toate contactoarele de forță.

2.2.2. Forma constructivă

Din punct de vedere al formei constructive, vagonul de metrou arată ca în figura 2.1 [93], unde s-a notat:

- 1 - cutiile cu aparate;
- 2 - suspensia secundară;
- 3 - boghiu cu suspensie primară;
- 4 - caroseria;
- 5 - cabina de conducere.

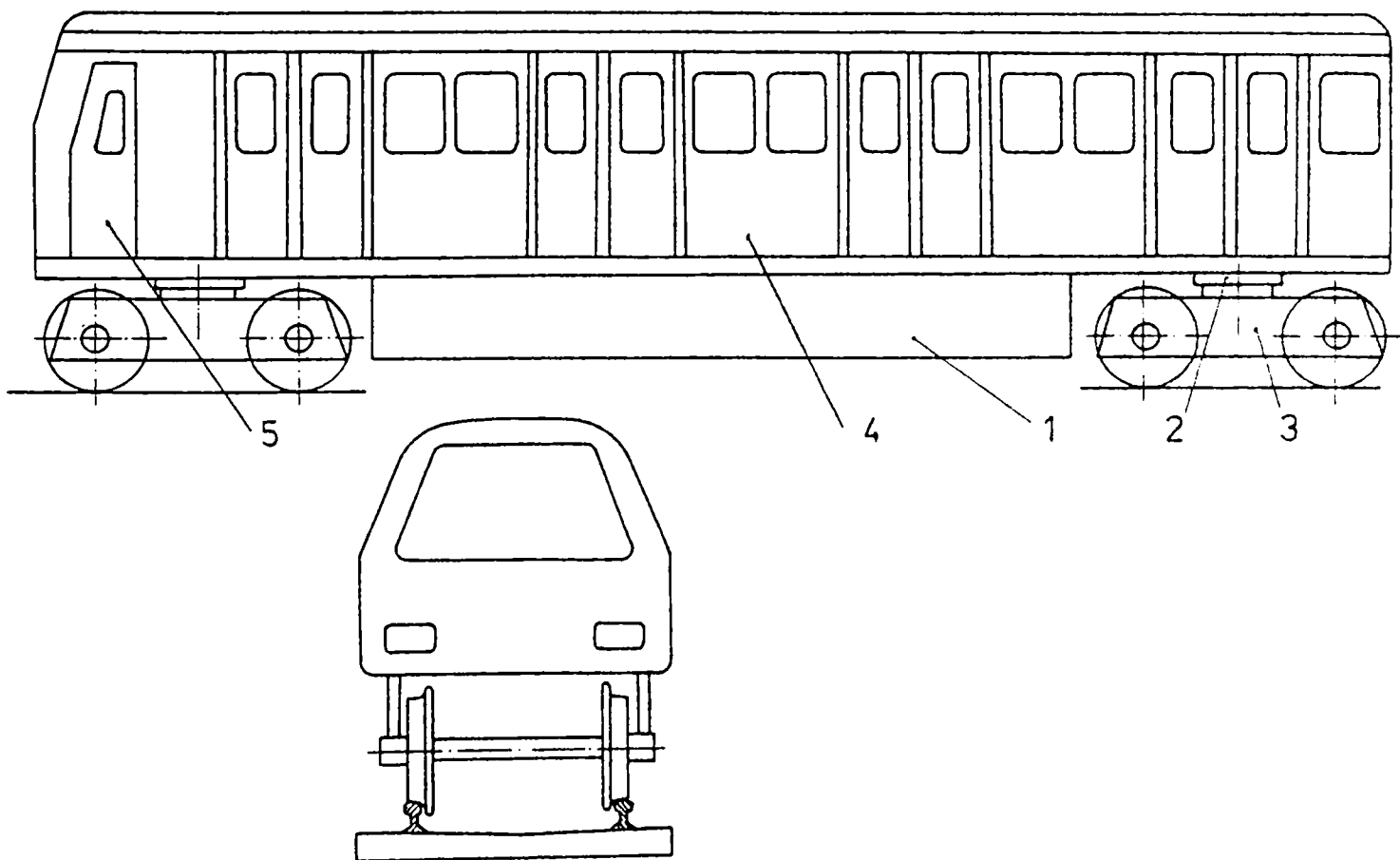


Figura 2.1. Forma constructivă a carcasei

Aparatele de comandă alimentate la 24 Vcc și 110 Vcc sunt montate în dulapurile electrice, plasate în cabinile de conducere.

Aparatele și agregatele conectate la tensiunea de 750 Vcc, sunt montate în cutiile de aparate de sub șasiu sau în cutii proprii construite pentru fiecare aparat sau agregat în parte.

Caroseria are o formă tubulară autoportantă, fiind construită dintr-un schelet metalic al șasiului (grinzi longitudinale și transversale din profile laminate sau îndoite), dintr-un schelet metalic al pereților laterali și din acoperiș (confectionate de asemenea din profile de oțel), toate fiind acoperite cu tablă sudată de schelet, cu excepția decupărilor pentru ferestre și uși.

Cutiile pentru aparate sunt sudate de scheletul metalic al șasiului și sunt prevăzute cu capace etanșe, pentru vizitare.

În cele două cabine de conducere se mai află aparatele de bord necesare procesului de comandă, reglare și supraveghere a conducerii ramei de metrou.

Suspensia secundară este alcătuită din perne pneumatice montate între cutie și boghiuri, ele asigurând menținerea la o înălțime constantă a podelei vagonului, prin admisia sau evacuarea în mod automat a aerului comprimat, în funcție de încărcătură (de numărul de călători).

Suspensia primară a metroului se compune din arcuri de cauciuc, montate între boghiu și osie pe cutia rulmentului de sprijin.

Cele două boghiuri ale unui vagon sunt tot o construcție sudată din oțel în formă de "H". Pe boghiu, se află osiile montate (două) antrenate fiecare printr-un reductor de către motorul electric de tracțiune. Motorul are posibilitatea transmiterii cuplului la ambele capete, este montat longitudinal și complet suspendat. În acest fel, se poate spune că boghiul este monomotor, fiecare vagon cu 4 osii fiind tractat de 2 motoare de tracțiune, iar o ramă de metrou are așadar 4 motoare electrice de tracțiune.

2.2.3. Caracteristicile tehnice principale și dinamice

Acestea sunt:

– ecartament	1435 mm;
– panta maximă	60 ‰;
– altitudinea maximă	1200 m;
– temperatura ambiantă	de la -25°C la +40°C;
– lungimea totală a unei rame	38000 mm;
– înălțimea de la șină	3500 mm;
– lățimea	3100 mm;
– ampatament vagon	12300 mm;
– ampatament boghiu	2200 mm;
– viteza maximă admisă	80 km/h;
– puterea nominală instalată	4x185 kW;
– raportul de transmitere osie motor	1:5,375;

- capacitatea nominală a ramei	400 călători (5călăt./m ² , din care 68 pe scaune);
- capacitatea maximă	600 călători;
- masa proprie a unui vagon	36000 kg.
- raza curbilor de cale	180 m în linie curentă, 50m în depou;
- supraînălțarea maximă a căii în curbe	150 mm;
- presiunea laterală a vântului	700 N/m ² ;
- presiunea frontală a vântului	1500 N/m ² ;

Calitatea mersului (cifra W_z) după Spelling, atât pe verticală, cât și pe orizontală, măsurată pe liniile din tunel, nu depășește cifra 3.

Înălțimea podelei este păstrată constantă față de șină la cota 1165 ± 10 mm, indiferent de sarcină.

Alți parametrii dinamici realizați sunt:

- accelerația medie până la 25 km/h este de $1,15 \text{ m/s}^2$;
- accelerația maximă este de $1,4 \text{ m/s}^2$;
- decelerația la frâna de serviciu $1,14 \text{ m/s}^2$;
- coeficient de variație a curentului la demaraj 11%;
- cuplul de demaraj, respectiv de frânare la obadă este realizat cu o oscilație de $\pm 10\%$.

2.2.4. Funcționarea vehiculului în regim de tracțiune

Rama electrică de metrou este acționată de 4 motoare electrice de tracțiune de curent continuu cu excitație serie și o putere de 185 KW pentru fiecare motor. Linia de alimentare cu energie electrică la tensiunea de 750 Vcc este realizată prin șina a treia în tunel, iar în depouri printr-o catenară aeriană.

Pentru captarea energiei electrice, se utilizează captatoare de curent și pantograful. Linia aeriană este utilizată în depouri mai ales pentru protecția personalului de exploatare, întreținere și reparații, a căror activitate se desfășoară la nivelul solului și în canalele de vizitare.

Aparatura de comandă este alimentată la tensiunile 24 Vcc și 110Vcc, din bateriile de acumulare, încărcate la rândul lor cu ajutorul convertizorului rotativ.

Principial schema electrică de alimentare a motoarelor electrice în regim de tracțiune este prezentată în figura 2.2. [112], unde s-au făcut notațiile:

- IA - întrerupătorul automat principal;
- K1, K2, K3 - contactoarele de linie;
- K4 - contactor de trecere prin punte a MT;

12 4.57/11/18

KS - contactoare pentru conexiunea serie a MT;
 KP - contactoare pentru conexiunea paralel a MT;
 R_{XA} , R_{XB} - reostate pentru demaraj-frânare;
 $Sh_{1,2,3}$ - șunturi pentru măsurarea curentului ce trece prin MT;
 $M_{1,2,3,4}$ - motoarele electrice de tracțiune;
 $Ex_{1,2,3,4}$ - înfășurările de excitație ale motoarelor electrice;
 D - diodă de sens pentru trecerea prin punte a MT;
 D1 - diodă de protecție.

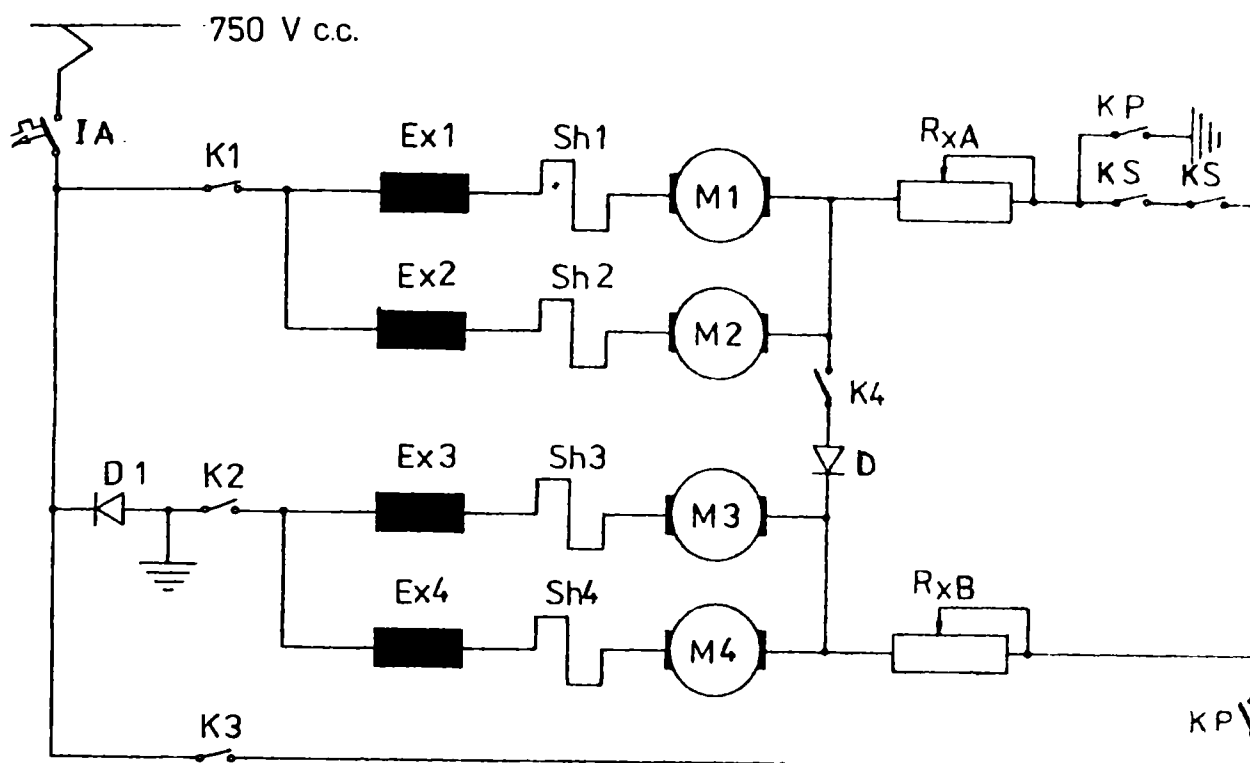


Figura 2.2. Schema principală a circuitului electric în regim de tracțiune

Conexiunea motoarelor este serie-paralel și paralel, trecerea de la o conexiune la alta realizându-se prin punte. Modificarea vitezei se face rezistiv, cu ajutorul reostatului de demaraj și a controlerului de mers care realizează 25 de trepte rezistive (din care 16 trepte la conexiunea serie-paralel și 9 trepte la conexiunea paralel) și trei trepte de slăbire a câmpului.

Viteza de circulație a vehiculului poate fi preselectată manual de către mecanic după necesități, printr-o manetă din bordul cabinei de conducere, notate cu următoarele poziții (comanda modificării vitezei fiind făcută de blocul automat de comandă, iar controlerul este acționat cu un motor electric):

C1 - permite funcționarea cu 3 trepte reostatice și $v=5$ km/h;

C2 - permite funcționarea cu 5 trepte reostatice și $v=15$ km/h;

S - permite funcționarea MT cu 16 trepte reostatice până la $R=0$

P - permite funcționarea MT cu 25 trepte reostatice (16 trepte serie-paralel și 9 trepte paralel) și 3 trepte de slăbire a câmpului.

Pe pozițiile de preselectie „C1 și C2”, se permite deplasarea vehiculului înainte și înapoi, iar pe poziția „S”, se permite deplasarea vehiculului numai înainte atât la alimentarea prin pantograf (de la linia aeriană), cât și la alimentarea prin captatoare (de la șina a III-a).

După conectarea întrerupătorului automat, când toate condițiile de mers sunt îndeplinite, se dă comanda conectării schemei de forță existente la rețea. Contactoarele K1 și K3 (din figura 2.2) asigură alimentarea cu +750 Vcc, iar contactorul K2 realizează legătura la minus, adică la calea de rulare, și de acolo la substația de tracțiune.

Până la treapta 16 inclusiv, sunt închise contactoarele KS, realizând astfel conectarea motoarelor M1 și M2 (legate în paralel), cu motoarele M3 și M4 (legate de asemenea în paralel). Conexiunea serie menține cele două reostate R_{XA} și R_{XB} în circuit, iar prin deplasarea controlerului spre treptele superioare, se elimină treptat din rezistența reostatelor, obținându-se astfel tensiuni tot mai mari la bornele motoarelor de tracțiune și, implicit, viteze ale vehiculului din ce în ce mai mari.

Pe treapta 16, rezistența reostatelor rămasă în circuit este zero, iar tensiunea pe fiecare motor electric este $U_1/2$. În acest moment, se închide contactorul K4, care asigură circuitul serie-paralel, iar controlerului de mers i se permite modificarea închiderii contactoarelor sale, astfel încât la conexiunea paralel, valoarea rezistenței reostatului R_{XA} și R_{XB} să fie corespunzătoare obținerii tensiunii $U_1/2$ pe fiecare motor electric de tracțiune.

Începând cu treapta 16, se deschid contactoarele KS, iar pe treapta 17, se închid contactoarele KP. Controlerul de mers continuă să elimine reostatul din circuitul motoarelor electrice de tracțiune, iar pe treapta 25, acesta este scos definitiv, tensiunea ajungând astfel să fie egală cu a liniei de alimentare U_1 .

Pe treptele 26, 27 și 28 ale controlerului, se comandă cele 3 contactoare, pentru treptele de slăbire a câmpului. La atingerea treptei 28 a controlerului de mers, MT funcționează pe caracteristica naturală în câmp slăbit până la întreruperea circuitului electric de tracțiune, când controlerul revine în zero. În acest moment, vehiculul funcționează “lansat”.

La o nouă comandă a tracțiunii ciclul se repetă.

Când maneta de preselectie este pusă pe poziția „S”, controlerul de mers se oprește pe treapta de reglare 16 (serie), iar la poziția „P”, aceasta se va opri pe treapta de reglare 28 (25 + 3 trepte de slăbire a câmpului). Funcționarea pe poziția P se poate realiza numai atunci când metroul culege energia electrică de la rețea prin captatoare (adică prin șina a III-a), celelalte poziții fiind posibile atât de la șina a III-a cât și de la catenară.

2.2.5. Funcționarea vehiculului în regim de frânare

Frâna de serviciu a metroului este o frână electrică, care constă în trecerea mașinii electrice din regimul de motor (sau din regimul „lansat”) în regimul de generator cu excitație independentă, energia electrică fiind consumată pe reostatul de frânare (același cu cel de demaraj).

În apropierea vitezei de 10 km/h (când frâna electrică nu mai este eficientă), se face comutarea automat, pe o frână electro-pneumatică. În cazul în care la comanda de frână dată vehiculului, aceasta nu intră în acțiune (sesizată printr-un curent de minim 100 A pe fiecare mașină electrică devenită generator), se realizează comutarea automată pe frâna electropneumatică (prin introducerea aerului comprimat în cilindrul de frână).

Dacă într-un timp foarte scurt de la comanda electropneumatică a frânei nu este sesizată prezența presiunii aerului comprimat în cilindrii de frână, se comandă automat frâna pneumatică de urgență, iar frânarea se realizează de către distribuitorii Knorr din fiecare vagon de metrou.

Schema electrică principală a circuitului electric în regim de frânare reostatică este prezentată în figura 2.3 [112], unde s-au făcut notațiile:

R_{XA} , R_{XB} - reostate pentru demaraj-frânare;

$Sh_{1,2,3,4}$ - șunturile pentru măsurarea curentului prin mașinile electrice devenite generatoare;

$M_{1,2,3,4}$ - motoarele electrice devenite generatoare;

$Ex_{1,2,3,4}$ - înfășurările de excitație alimentate de la o sursă independentă;

$K_{f1,2}$ - contactoarele circuitului de excitație;

$R_{a1,2}$ - reostatele adiționale de frânare;

R_{fe} - reostatele de limitare a curentului de excitație.

Înfășurările de excitație de la cele 4 mașini electrice sunt înseriate și alimentate de la o sursă independentă de 110 Vcc, iar rotoarele conectate în serie pentru două mașini, debitează pe reostatul de frânare R_{XA} sau R_{XB} (același folosite și la demaraj), la care se mai adaugă reostatele de frânare adiționale R_{a1} și R_{a2} .

Măsurarea curentului se face prin aceleași șunturi $Sh_{1,2,3,4}$ din circuitul electric în regim de tracțiune, conectate fiecare la câte un traductor de curent, care intervine în circuitul de comandă al controlerului de frânare.

Pe măsură ce viteza scade, se reduce valoarea rezistenței electrice din circuit, putând astfel obține un curent în trepte în jurul unei valori constante și odată cu acesta și o forță de frânare proporțională.

Controlerul de frână realizează 8 trepte de frânare și este acționat de un motor electric. La eliberarea manetei de comandă, controlerul revine în poziția zero. Comanda frânării este prioritară față de comanda tracțiunii în sensul că, la acționarea manetei pentru frână, aceasta intră în acțiune imediat, fără să aștepte revenirea controlerului de mers în zero.

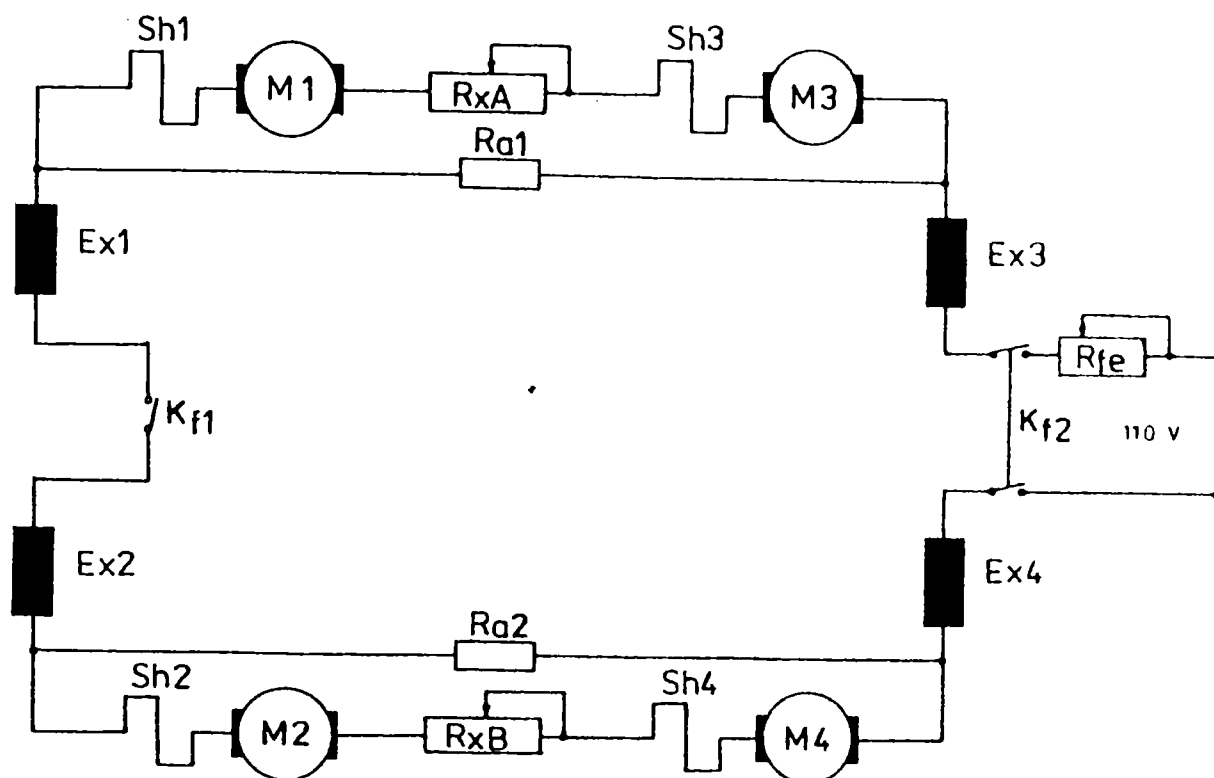


Figura 2.3. Schema principală a circuitului electric în regim de frânare

La părăsirea vehiculului sau în staționare, frânarea se realizează cu ajutorul frânei cu resort, care se păstrează și atunci când lipsește orice formă de energie pe vehicul.

Frânarea de urgență se face prin golirea conductei generale și intrarea în acțiune a distribuitorilor de aer. Acestea permit trecerea aerului comprimat din rezervoarele instalației, în cilindrii de frână, care acționează pe cele două discuri ale osiilor motoare. Frânarea de urgență este asociată frânării cu resort.

Comanda frânei de urgență se face în mod automat în cazul apariției unor cauze bine stabilite, cum sunt:

- nu intră în acțiune frâna electrică sau electropneumatică;
- viteza maximă impusă a fost depășită;
- s-a eliberat butonul de siguranță “om mort”;
- lipsește tensiunea de alimentare a schemelor de comandă;
- dispar semnalele din bucla de siguranță;
- intră în acțiune instalația de control punctal a vitezei denumită INDUSI sau se desprind vagoane din tren.

Semnalul “frânare de urgență” se șterge numai la viteză zero, chiar dacă a dispărut cauza care l-a generat.

2.3. Modificarea vitezei

Comanda tracțiunii se face prin acționarea manetelor din bordul cabinei de conducere.

Schema principală pentru comanda modificării vitezei este redată în figura 2.4 [112], cu următoarele notații:

Sh_{1,2,3,4} - șunturile de măsură a curentului prin motoare;

TC_{1,2,3,4} - traductoarele de curent corespunzătoare;

VL - releu electronic de prag;

KA2 - releu electromagnetic intermediar;

KA3 - releu electromagnetic de comandă a motorului pentru controlerul de tracțiune;

m_c - motor de acționare al controlerului;

K₁₋₈ - contactoarele duble 2x200 A ale controlerului pentru reglarea reostatică.

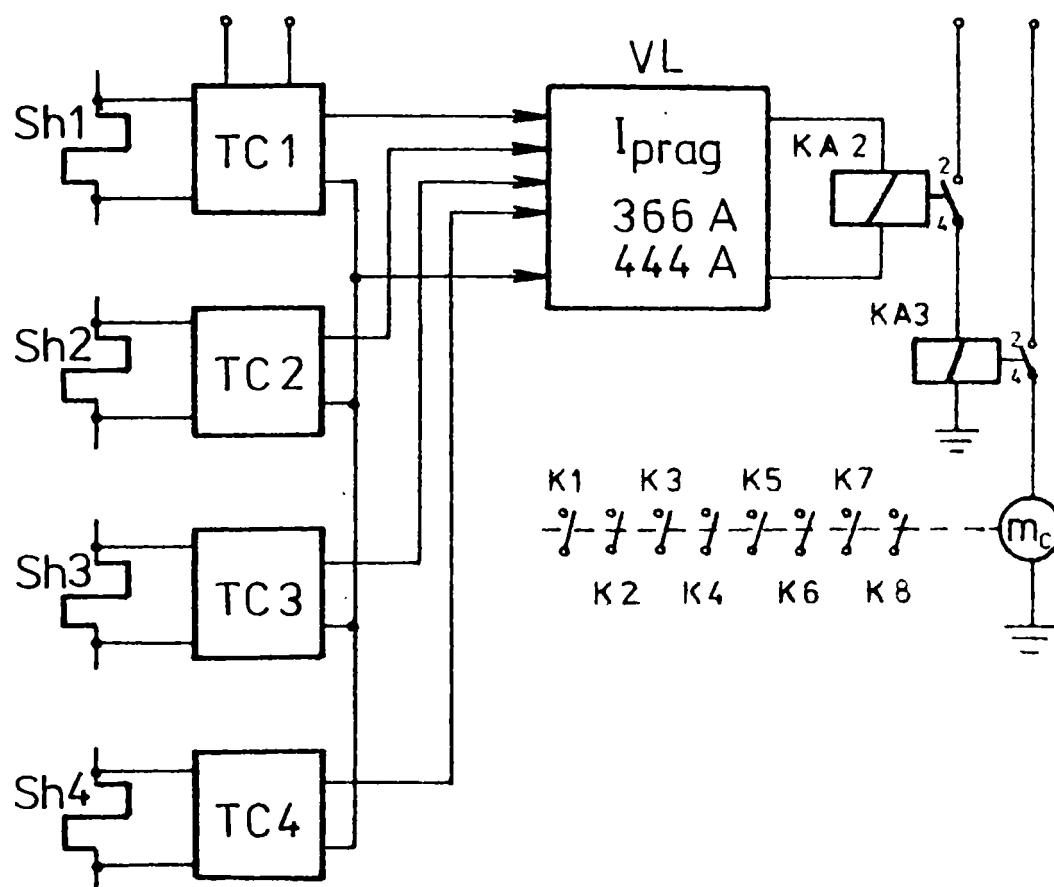


Figura 2.4. Schema principală de comandă a modificării vitezei

Valoarea de prag a curentului de 366 A sau 444 A este modificată manual de către mecanicul vehiculului, în funcție de aprecierea sa arbitrară făcută referitor la numărul de pasageri, admitând astfel funcționarea la sarcină mică (366 A) sau mare (444 A). Acest curent de prag este de fapt curentul ce trece prin fiecare motor de tracțiune fiind aleasă valoarea cea mai mare.

În timpul funcționării, schema de tracțiune fiind făcută, controlerul continuă să scoată trepte de rezistență din reostat, tensiunea pe fiecare

motor de tracțiune începe să crească, curentul crește și el (dar numai până la limita valorii de prag), iar la deplasarea punctului de funcționare a motorului de tracțiune pe caracteristică, turația crește.

Până când valoarea curentului de prag nu este depășită, releul KA2 este conectat și va menține alimentat releul KA3. Acesta la rândul său permite alimentarea motorului pentru acționarea controlerului de mers m_c , iar contactoarele K_{1-8} vor scoate trepte de rezistență din reostat.

În acest caz, motoarele de tracțiune sunt alimentate cu trepte de tensiuni mereu crescânde. Pe fiecare treaptă, controlerul staționează o perioadă mică de timp, dată de cursa inactivă a controlerului, permițând astfel funcționarea motoarelor de tracțiune pe fiecare caracteristică artificială.

La atingerea curentului de prag pe unul dintre motoare, releul electronic VL va deconecta releul KA2, iar KA3 va opri motorul controlerului pe poziția respectivă.

În acest fel, punctul de funcționare al motorului de tracțiune se va deplasa pe caracteristica artificială, până când curentul scade sub valoarea de prag, după care controlerul se pune din nou în mișcare. Începând cu primul control de curent, controlerul se oprește de fiecare dată pe fiecare treaptă.

La epuizarea treptelor de rezistență din conexiunea serie-paralel, se face trecerea prin punte la conexiunea paralel, continuându-se trecerea de la o treaptă la alta prin eliminarea de rezistență din reostat.

Pe treapta 25, reostatul este eliminat în totalitate iar tensiunea pe motoare devine egală cu tensiunea de la rețea U_1 .

Treptele 26, 27 și 28 realizează conexiunea succesivă a reostatului pentru cele 3 trepte de slăbire a câmpului, după care motoarele vor continua să funcționeze pe caracteristica naturală în câmp slăbit.

Cu modificările treptelor reostatului de demaraj enumerate mai sus, principial diagrama de variație a vitezei vehiculului $v(I)$ este prezentată în figura 2.5.

Reglarea vitezei se realizează cu un aparat electronic denumit SACVAM, construit din relee electronice ȘI , SAU , NU , NICI , TIME , MEMORII și VL , comandate atât de semnale logice "1" și "0", cât și de semnale analogice obținute de la diferite traductoare (de tensiune, curent, turație, viteză).

Semnalele logice de intrare reprezintă de fapt starea diferitelor contactoare, relee, butoane de acționare, presostate, termostate, micro-întrerupătoare și manete de comandă.

Ieșirile din acest aparat central, care vor comanda diferite contactoare ale schemelor de comandă sau forță, se fac prin contacte de relee RI13 la 24 Vcc.

În principiu, toate releele de comandă de pe metrou sunt în prezent RI13 de 6A, iar contactoarele de comandă sunt TCC de 10A.

Contactoarele schemei de tracțiune și frânare sunt electromagnetice (MTU de 200 A) și electropneumatice (EJC de 1500 A).

În varianta funcționării cu două sau trei unități cuplate, ramele sunt cuplate între ele prin cuple automate, care asigură transmiterea semnalelor în lungul trenului.

În acest fel, dintr-un singur post de conducere, se pot comanda și supraveghea toate ramele cuplate, fiecare realizând de fapt modificarea vitezei individual.

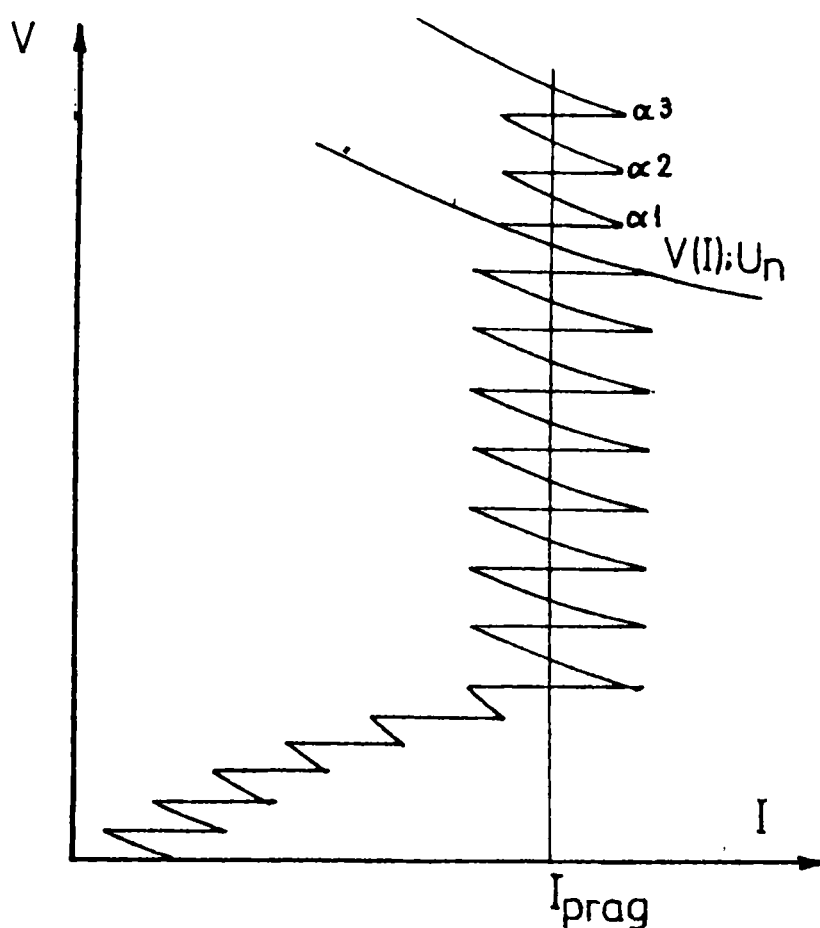


Figura 2.5. Diagrama de variație a vitezei vehiculului $v(I)$

În timpul funcționării în regim de tracțiune, este realizată automatizarea circuitelor electrice de comandă, astfel încât controlerele se așteaptă pe pozițiile 16 și 25. Numărul semnalelor posibil de transmis în lungul trenului este 100, iar acestea sunt duble și realizate cu perechi de contacte fixe-mobile.

Circuitul de tracțiune al fiecărei rame este protejat printr-un întrerupător automat rapid, iar cele de comandă prin siguranțe automate monopolare.

Captarea energiei electrice de la rețea se realizează individual pe rama de metrou, fiecare vagon din tren fiind dotat și cu un scurtcircuitor cu rol de protecție împotriva alimentării accidentale cu energie electrică din rețea.

2.4. Schemele electrice de comandă

Schemele circuitelor electrice de comandă sunt prezentate și analizate, deoarece de buna lor funcționare depinde foarte mult fiabilitatea vehiculului (vezi figura 2.6).

Pentru că majoritatea semnalelor primite sau care pleacă din aparatul central de comandă au valori de curent foarte mici, acestea ajung la bobinele unor relee. Prin contactele releelor însă, pot trece curenți mai mari, care vor putea alimenta contactoarele electromagnetice sau electropneumatice folosite în instalația de tracțiune (forță).

Schemele electrice de comandă sunt împărțite în funcție de specificul fiecăruia. Tensiunea de alimentare a acestora este de 24 Vcc și 110 Vcc.

În principiu, toate schemele electrice de comandă se compun din siguranțe monopolare automate, relee de comandă, contactoare de comandă, contactoare electromagnetice de forță, contactoare electropneumatice de forță, diode de sens, relee de timp cu temporizare la anclanșare sau la declanșare, butoane de comandă, lămpi de semnalizare, presostate, termostate, limitatoare de cursă, traductoare de tensiune și curent, conductoare de legătură, reglete de legătură.

Schemele electrice de comandă împreună cu specificul fiecăreia vor fi enumerate în continuare.

a). Schema de comandă a funcționării în regim de tracțiune

Aceasta are rolul de comandă a contactoarelor din schema electrică de forță pentru alimentarea motoarelor cu energie electrică în regim de tracțiune.

Comanda funcționării în regim de tracțiune se face din postul de conducere unitar pentru cele trei unități de metrou cuplate, dacă sunt îndeplinite toate condițiile de mers.

Fiecare unitate de metrou își ia energia electrică de la rețea individual și o transmite celor 4 motoare de tracțiune.

Pentru obținerea unei viteze variabile, se va comanda punerea în mișcare a controlerului de demaraj.

Schema mai are rolul de supraveghere a închiderii circuitelor prin cupla automată, realizând astfel o buclă de siguranță, și alimentarea cu aer comprimat a conductei generale a trenului, precum și urmărirea semnalelor de alarmă din tren.

La sfârșitul procesului de demaraj, se comandă cele trei contactoare pentru slăbirea câmpului.

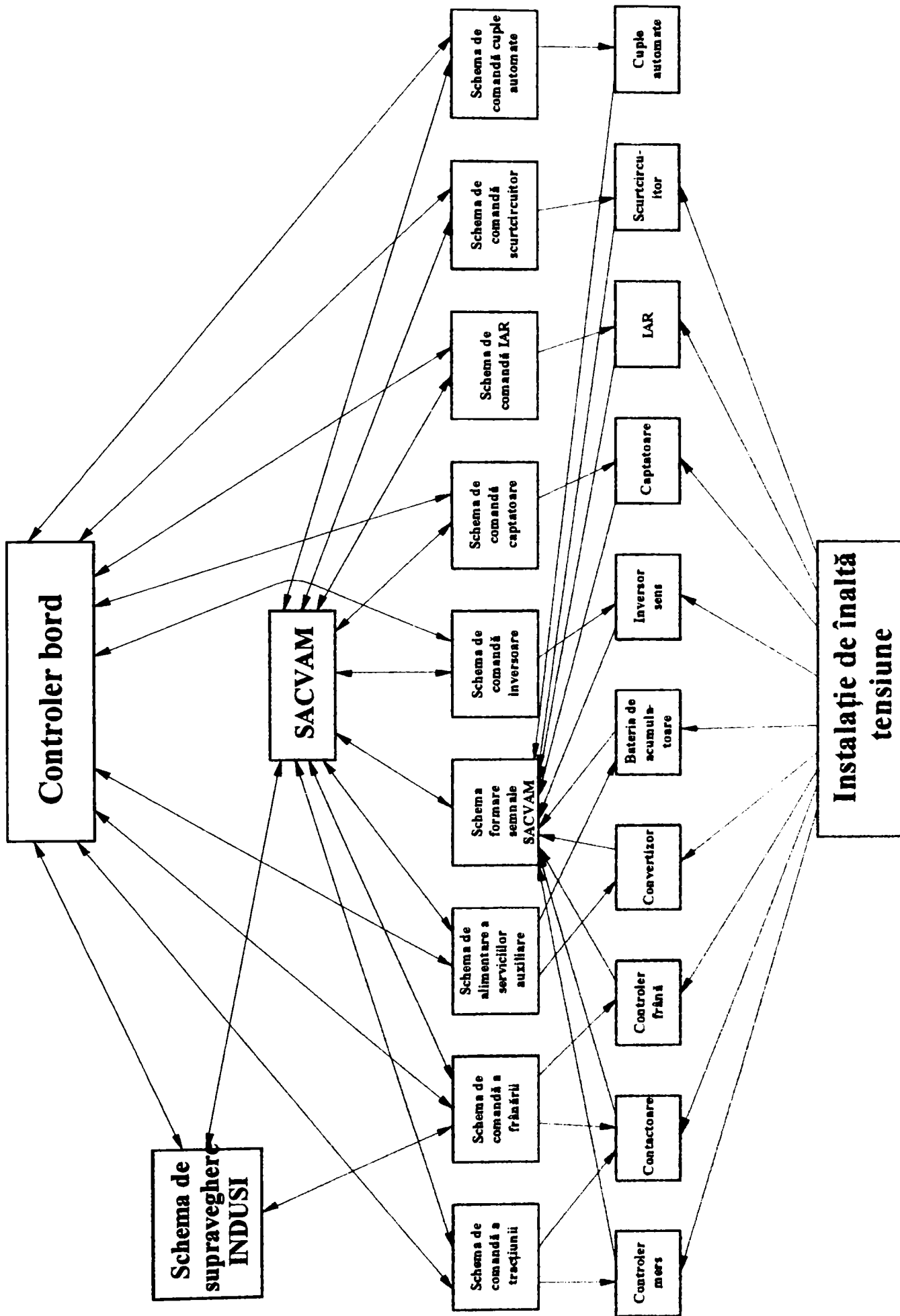


Figura 2.6. Schema bloc a instalațiilor de comandă

b). Schema de comandă a funcționării în regim de frânare

În această schemă se comandă contactoarele electromagnetice care realizează funcționarea mașinii electrice în regim de generator, adică de frânare electrică. Frânarea electrică este reostatică, reostatul fiind același cu cel de demaraj. Ca și la tracțiune, comanda frânării se face din postul de comandă al unui vagon din tren.

După intrarea în acțiune a contactoarelor de frână, se realizează comanda controlerului de frânare, care va scoate trepte de rezistență din circuit, pe măsură ce viteza vehiculului scade.

Dacă frâna electrică nu a intrat în acțiune (datorită unui defect), se realizează comutarea automată pe frâna electropneumatică, iar dacă nici aceasta nu a intrat în acțiune, se trece automat la frânarea clasică pneumatică prin golirea conductei generale de aer.

c). Schema de formare semnale SACVAM

Cuprinde totalitatea semnalelor de intrare în sistemul automat de comandă SACVAM, semnale care se formează în exteriorul acestuia și care se transmit și în lungul trenului. Câteva dintre acestea sunt:

- semnale care indică poziția manetelor din bord (preselecție, mers, frână, lansare, semnale din butonul "om mort");
- semnale care vor indica pozițiile pe care se află controlerul de frână și mers;
- semnale analogice ale traductoarelor de curent din circuitul fiecărui MT;
- semnale care indică funcționarea în anumite condiții de avarii și de simulare;
- semnale care indică poziția diferitelor contactoare, închise sau deschise cum sunt întrerupătorul automat, contactoarele electropneumatice de linie și altele;
- semnale care indică ușile închise, funcționarea ventilației forțate a agregatelor de demaraj-frânare, frâna cu resort decuplată, siguranțele automate ale controlerelor cuplate și semnalele de alarmă neacționate;
- semnale care indică alinierea controlerelor de mers și funcționarea normală a frânei electrice;
- semnale care indică diferite viteze sau depășirea vitezei maxime.

d). Schema electrică de comandă a inversoarelor de sens

Fiecare vagon este dotat cu câte un inversor de sens, care modifică sensul de trecere al curentului prin excitația serie de la două motoare de tracțiune.

Inversoarele sunt separatoare electrice fără camere de stingere și fără bobine de suflaj, adică nu pot rupe curent. Ele sunt comandate

numai atunci când circuitul nu este parcurs de curent electric. Comanda se face din maneta de preselectie a fiecărui bord din cabina de conducere. Semnalul de comandă *ÎNAINTE* sau *ÎNAPOI* se transmite în lungul trenului pentru toate cele 6 vagoane ale ramelor de metrou cuplate.

Comutarea inversorului se face electropneumatic. Acesta mai dispune și de contacte de semnalizare pentru a indica poziția pe care se află și pentru a împiedica comanda tracțiunii, dacă dintr-un motiv oarecare nu toate inversoarele au ajuns pe direcția înainte sau înapoi.

e). Schema de comandă pentru coborârea captatoarelor

Energia electrică este captată din rețea de la șina a III-a prin intermediul patinelor captatoare dispuse câte 4 pe fiecare parte a unei rame.

La nevoie, dacă este cazul, captatoarele pot fi coborâte, astfel încât acestea să nu intre în contact cu șina a III-a. Comanda lor se face electric, iar execuția pneumatic. Din fiecare post de conducere se pot comanda coborârea captatoarelor pentru fiecare unitate de metrou în parte.

f). Schema de conectare a întrerupătorului automat rapid

Instalația de forță este protejată printr-un întrerupător automat rapid monopolar, plasat imediat după ce circuitul de forță a ajuns pe rama de metrou.

Comanda lui se face atât pentru conectare, cât și pentru deconectare, de la distanță, adică din postul de conducere al oricărui vagon din tren.

La apariția unui scurtcircuit în instalația de tracțiune, întrerupătorul automat deconectează datorită bobinei sale electromagnetice, semnalizând astfel poziția acestuia.

Conectarea lui este interconționată și de starea unor contactoare din instalația de tracțiune (dacă acestea au rămas cu contactele sudate în urma depășirii curentului maxim admis, atunci nu se permite anclanșarea numai după eliminarea defectului).

Există posibilitatea ca unul sau toate trei întrerupătoarele automate să fie deconectate, din fiecare post de conducere al trenului.

Dacă metroul funcționează în depou sau pe linia de legătură cu tunelul, circuitul de forță este alimentat printr-un releu maximal de curent din pantograful plasat deasupra unui vagon.

g). Schema de comandă a decuplării cuplelor automate

La formarea unui tren din două sau trei unități cuplate, acestea se leagă prin simpla tamponare a lor. În momentul tamponării ușoare, are

loc conectarea circuitelor pneumatice și electrice realizându-se și legătura mecanică.

Deconectarea unei unități sau două din tren se realizează printr-un comutator cu revenire, astfel că în timpul zilei, trenul poate să-și schimbe componența și să staționeze cu o parte din vagoane în rebrusment, fără să necesite operații în plus sau coborârea în tunel a personalului de conducere.

h). Schema de supraveghere a instalației Indusi și autostop

Această instalație are rolul de supraveghere a semnalelor din blocul de linie automată. La depășirea vitezei prescrise sau la depășirea unui semnal care indică oprirea, se comandă în mod automat frânarea trenului.

i). Schema de comandă a scurtcircuitoarelor

Pe boghiu există un scurtcircuitor care prin conectare face legătura între borna plus și minus a circuitului de alimentare de la rețea, înaintea întrerupătorului automat.

Scurtcircuitorul are rolul de protecție împotriva alimentărilor accidentale cu energie electrică de la rețea, în timpul intervențiilor la metrou a personalului de întreținere.

j). Schema de alimentare a serviciilor auxiliare

Aceasta se compune din mai multe agregate și circuite, cum sunt:

- circuitul de conectare a bateriilor de acumulare și încărcarea lor;
- circuitul de comandă a releelor de cheie din postul activ de conducere;
- circuitele de comandă a pornirii și opririi convertizorului rotativ împreună cu reglatoarele automate de supraveghere ale acestuia;
- circuitele de formare a tensiunii alternative de 3 x 220 V și a consumatorilor corespunzători;
- instalația de comandă a deschiderii și închiderii ușilor de acces al călătorilor împreună cu semnalizările acestora;
- circuitele de semnalizare, faruri, stop;
- circuitul de comandă iluminat cabine și salonul de pasageri, precum și iluminatul de siguranță în cazul lipsei energiei electrice de alimentare;
- circuitul de supraveghere a ventilării bateriilor de reostate pentru demaraj și frânare;
- comanda circuitelor pentru încălzirea în cabinelor de conducere;
- circuitele instalației de sonorizare pentru anunțul stațiilor.

2.5. Calculul caracteristicilor de tracțiune

Acestea reprezintă de fapt caracteristicile electrodinamice ale motorului de tracțiune, adică variația fuxului inductor în funcție de curent $K\Phi(I)$, variația vitezei unghiulare în funcție de curent $\Omega(I)$, variația cuplului util în funcție de curent $M_u(I)$ și variația cuplului util în funcție de viteza unghiulară $M_u(\Omega)$.

În urma calculelor făcute în acest subcapitol autorul a trasat caracteristicile sus menționate pe coli milimetrice la format A4 și le-a prezentat în Anexa I. Pentru înțelegerea mai ușoară a determinării lor, în subcapitolului 2.5, acestea sunt micșorate și prezentate fiecare în parte.

2.5.1. Motorul de tracțiune

Motorul tip TN75 este de curent continuu cu excitație serie și poli de compensație. Bobinajele sunt realizate din profile de Cu, în clasa de izolație F. Este de construcție autoventilată, iar forma constructivă este specifică montării prin flanșare bilaterală frontală a motorului pe boghiul vagonului. Carcasa nu are tălpi de fixare și este executată din tole pe porțiunea miezului magnetic.

Motorul are două capete de arbore conice identice, cu conicitatea 1:50, fără pană pentru montarea pinioanelor de atac.

Gradul de excitație maxim este de 50 %.

2.5.2. Caracteristicile constructive ale motorului de tracțiune

a). Nominale:

- tensiune nominală 750 V;
- putere nominală 185 kW;
- curent nominal 270 A;
- randament nominal 0,9;
- turația nominală 1350 rot/min.

b). Uniorare:

- putere uniorară 215 kW;
- curent uniorar 310 A;
- turație uniorară 1270 rot/min.

c). Maxime:

- tensiune maximă în regim de motor 900 V;
- tensiune maximă în regim de generator 1380 V;
- curent maxim de pornire 540 A;
- curent maxim de frânare 540 A;
- turație maximă 3000 rot/min.

Valorile în ohmi a rezistenței înfășurărilor motorului de tracțiune sunt date în tabelul 2.1:

Tabelul 2.1.

	Rezistența la 26 °C [Ω]	Rezistența la 115 °C [Ω]
Rotor	0,03295	0,0436
Poli auxiliari	0,007658	0,01028
Poli de compensație	0,014214	0,01896
R _r total	0,054728	0,07284
Poli de excitație	0,0662	0,0887
Total	0,120928	0,16154

2.5.3. Caracteristica magnetică

În general este dată de către constructorul MT sau se poate calcula din caracteristica magnetică universală dată în valori relative cu relația [18], [52]:

$$i = a \cdot (\varphi + \varphi^b) \quad (2.1)$$

unde:

i – valoarea curentului în mărimi relative;

φ – fluxul în mărimi relative;

a, b – constante.

Pentru $a=1$ și $b=7$, respectiv $a=0,5$ și $b=7$, cu relația (2.1) au fost calculate valorile din tabelul 2.2, iar variația $\varphi(i)$ este reprezentată în figura 2.7, rezultând astfel ecuațiile:

$$i_1 = \varphi + \varphi^7$$

$$i_2 = 0,5 \cdot (\varphi + \varphi^7)$$

Tabelul 2.2.

φ	0,2	0,4	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,05	1,10	1,15	1,20
i_1	0,2	0,402	0,628	0,782	1,01	1,378	2,0	2,457	3,049	3,81	4,783
i_2	0,1	0,201	0,314	0,391	0,505	0,689	1	1,228	1,524	1,905	2,391
$I[A]$	30,54	61,38	95,9	119,4	154,1	210,1	305,4	375,2	465,6	581,8	739,4
$K\Phi[Wb]$	1,03	2,06	3,11	3,60	4,12	4,63	5,252	5,40	5,66	5,92	6,18

Determinarea curentului de sarcină I și a fluxului $K\Phi$ al motorului de tracțiune se face calculând coeficientul de curent K_i și de flux K_φ cu relațiile:

$$K_i = \frac{I_n}{i_n} \quad (2.2)$$

Pentru un motor de tracțiune la care se cere un coeficient de slăbire a câmpului mai mare, se fac calculele cu $i_n=0,85i_h$, iar i_h se alege între (2,05 ÷ 2,10) [53].

Alegând $i_h=2,08$ și calculând cu relația (2.2), rezultă $K_i=152,71$ A, iar $i_n=1,768$.

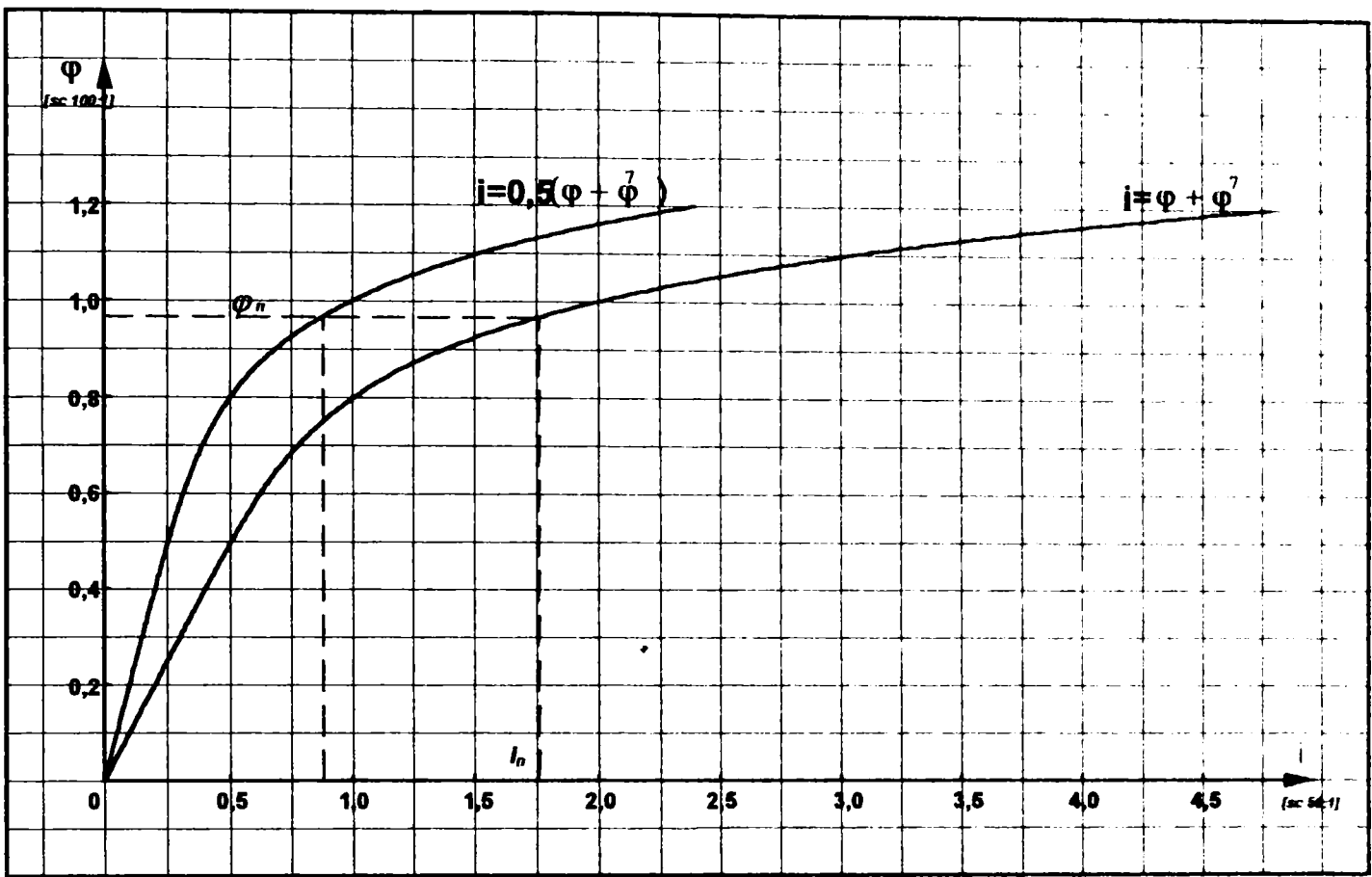


Figura 2.7. Caracteristica magnetică universală $\varphi(i)$

$$K_{\varphi} = \frac{(K\Phi)_n}{\varphi_n}, \quad (2.3)$$

iar φ_n se citește de pe diagrama $\varphi(i)$ corespunzător lui $i_n = 1,768$, și este $\varphi_n = 0,97$.

Din ecuația de tensiuni scrisă la bornele MT la tensiunea nominală, rezultă:

$$(K\Phi)_n = \frac{U_n - RI_n}{\Omega_n}, \quad (2.4)$$

$$\Omega_n = \frac{\pi n_n}{30} = \pi \cdot \frac{1330}{30} = 141,37 \text{ s}^{-1},$$

$$(K\Phi)_n = \frac{750 - 0,161 \cdot 270}{141,37} = 4,997 \text{ Wb}.$$

Făcând înlocuirile în relația (2.3) rezultă:

$$K_{\varphi} = \frac{4,997}{0,97} = 5,152 \text{ Wb}.$$

În acest fel, se pot calcula I și $K\Phi$ cu relațiile (2.5) și (2.6),

$$I = i \cdot K_i \text{ [A]}, \quad (2.5)$$

$$K\Phi = \varphi \cdot K_{\varphi} \text{ [Wb]}. \quad (2.6)$$

Calculul realizat cu relațiile (2.6) și (2.7) permite completarea tabelul 2.2, iar diagrama $K\Phi(I)$ este reprezentată în figura 2.8.

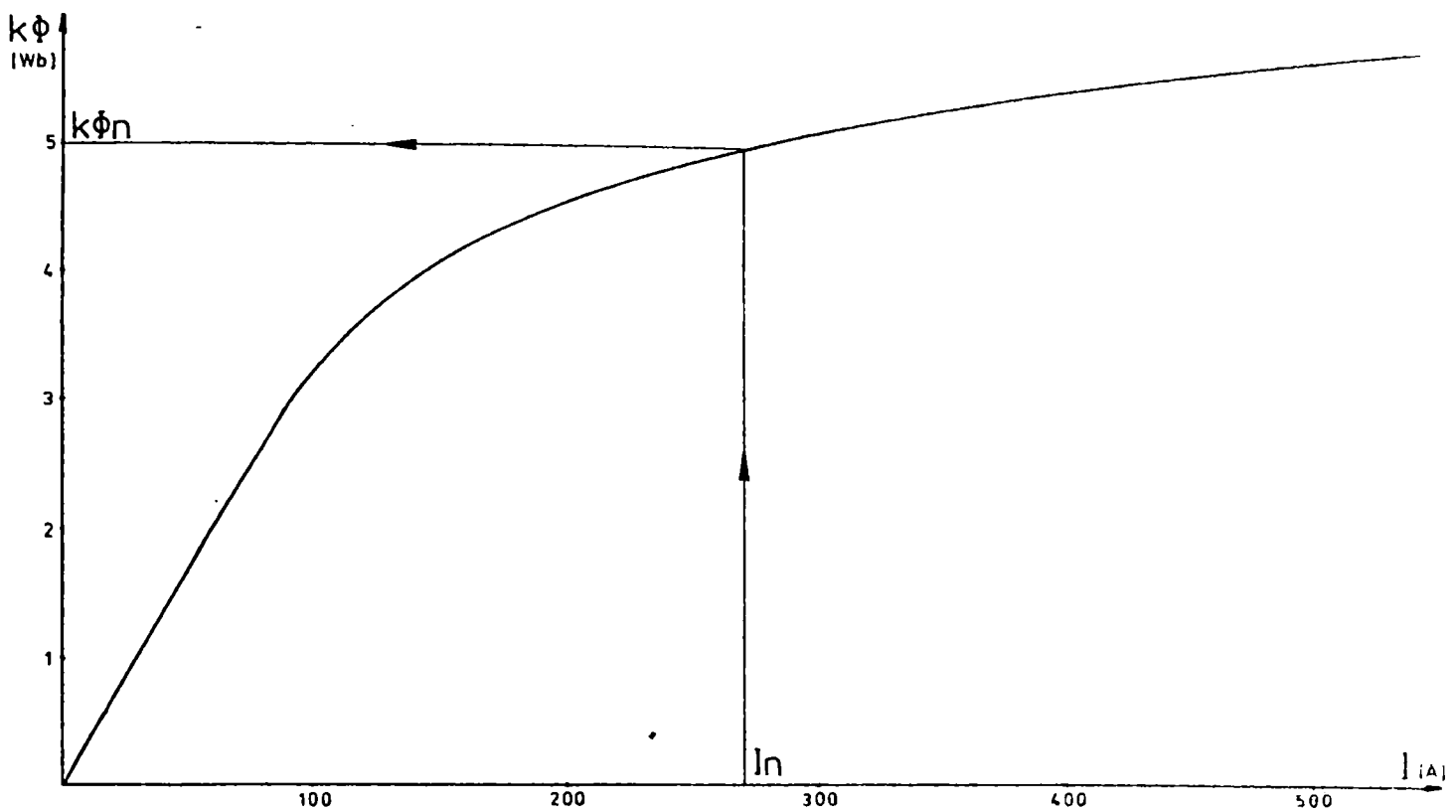


Figura 2.8. Caracteristica magnetică a motorului de tracțiune

2.5.4. Caracteristicile vitezei unghiulare

Schema de principiu a metroului având motoarele de tracțiune cu excitație serie, la conexiunea serie-paralel este prezentată în figura 2.9, unde s-a notat:

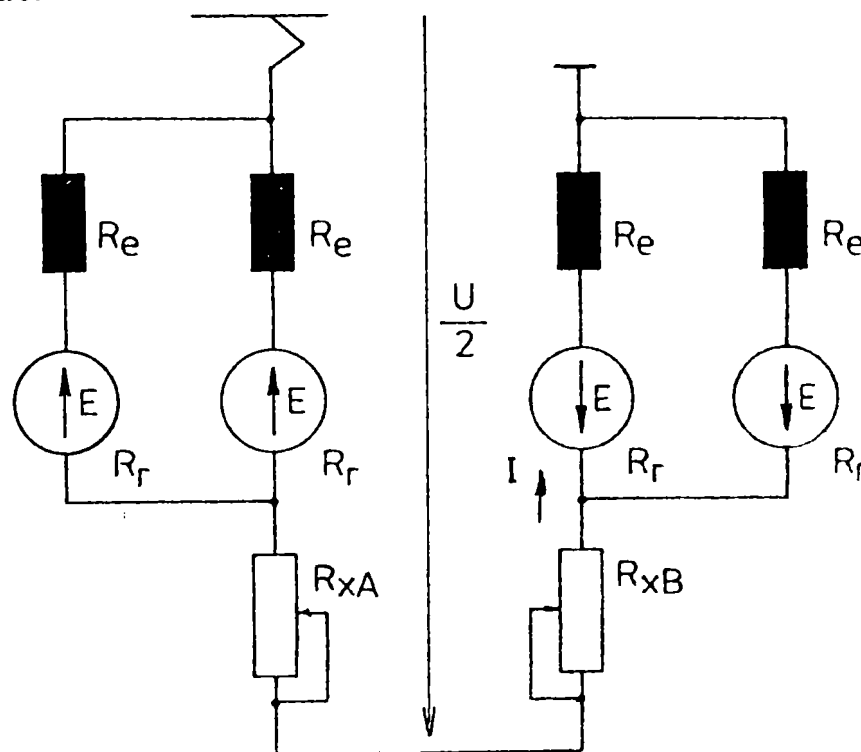


Figura 2.9. Schema electrică de principiu a metroului la conexiunea serie-paralel

- U - tensiunea de alimentare;
- E - tensiunea electromotoare;
- R_e - rezistența înfășurării excitației;
- R_r - rezistența înfășurării rotorului;
- $R_{X A, B}$ - rezistența reostatului de demaraj;

I - curentul prin circuit.

Ecuatia de tensiuni cu notațiile din figura 2.9 este:

$$U = E + RI, \text{ sau } U = K\phi\Omega + RI. \quad (2.7)$$

De aici rezultă viteza unghiulară:

$$\Omega = \frac{U - RI}{K\phi}. \quad (2.8)$$

Rezistența totală pentru fiecare braț cu tensiunea $U/2$ este:

$$R = R_{XA} + (R_e + R_r)/2 \text{ iar,} \quad (2.9)$$

$$R_e + R_r = 0,161 \Omega$$

Cu rezistențele reostatului $R_{X A,B}$ pentru cele 25 de trepte date în tabelul 2.3, viteza unghiulară calculată cu relația (2.8) permite completarea tabelul respectiv, iar $\Omega(I)$ arată ca în figura 2.10.

Tabelul 2.3.

I [A]		50	100	150	200	250	270	310	360	400	440	500	540	
KΦ [Wb]		1,64	3,2	4,08	4,56	4,9	5	5,2	5,35	5,5	5,6	5,75	5,85	
U [V]	R [Ω]	Ω [1/s]												
375	1	7,361	4											
	2	5,041	75											
	3	3,421	124	10										
	4	2,2	161	48	11									
	5	1,6	180	67	33	12								
	6	1,18	193	80	48	30	16	11	2					
	7	0,99	198	86	55	39	26	21	13	3				
	8	0,92	200	88	58	42	29	25	17	8				
	9	0,8	204	92	62	47	35	32	24	16	10	4		
	10	0,633	209	97	68	54	44	41	34	27	22	17	10	5
	11	0,547	212	100	72	58	48	45	40	33	28	23	17	13
	12	0,46	214	103	75	62	53	50	44	39	34	30	25	21
	13	0,38	217	105	78	66	57	54	49	44	40	37	32	29
	14	0,27	220	108	82	70	62	60	56	52	48	45	42	39
	15	0,21	222	110	84	73	65	64	59	56	53	50	47	45
	16	0,161	224	112	86	75	68	66	62	59	56	54	51	49
750	17	1,18	421	197	140	112	92	86	74	60	50	41	27	19
	18	1,04	425	201	145	118	100	94	82	70	61	52	40	22
	19	0,8	432	209	154	129	112	107	96	86	78	71	61	54
	20	0,633	438	214	160	136	121	116	106	97	90	84	75	70
	21	0,46	443	222	166	144	129	125	116	109	103	98	90	85
	22	0,38	445	223	170	148	134	129	121	114	108	104	97	93
	23	0,32	447	224	172	150	136	132	125	118	113	109	103	98
	24	0,21	451	227	173	155	142	138	132	126	121	117	112	108
	25	0,161	452	229	180	157	145	141	135	129	124	121	116	113

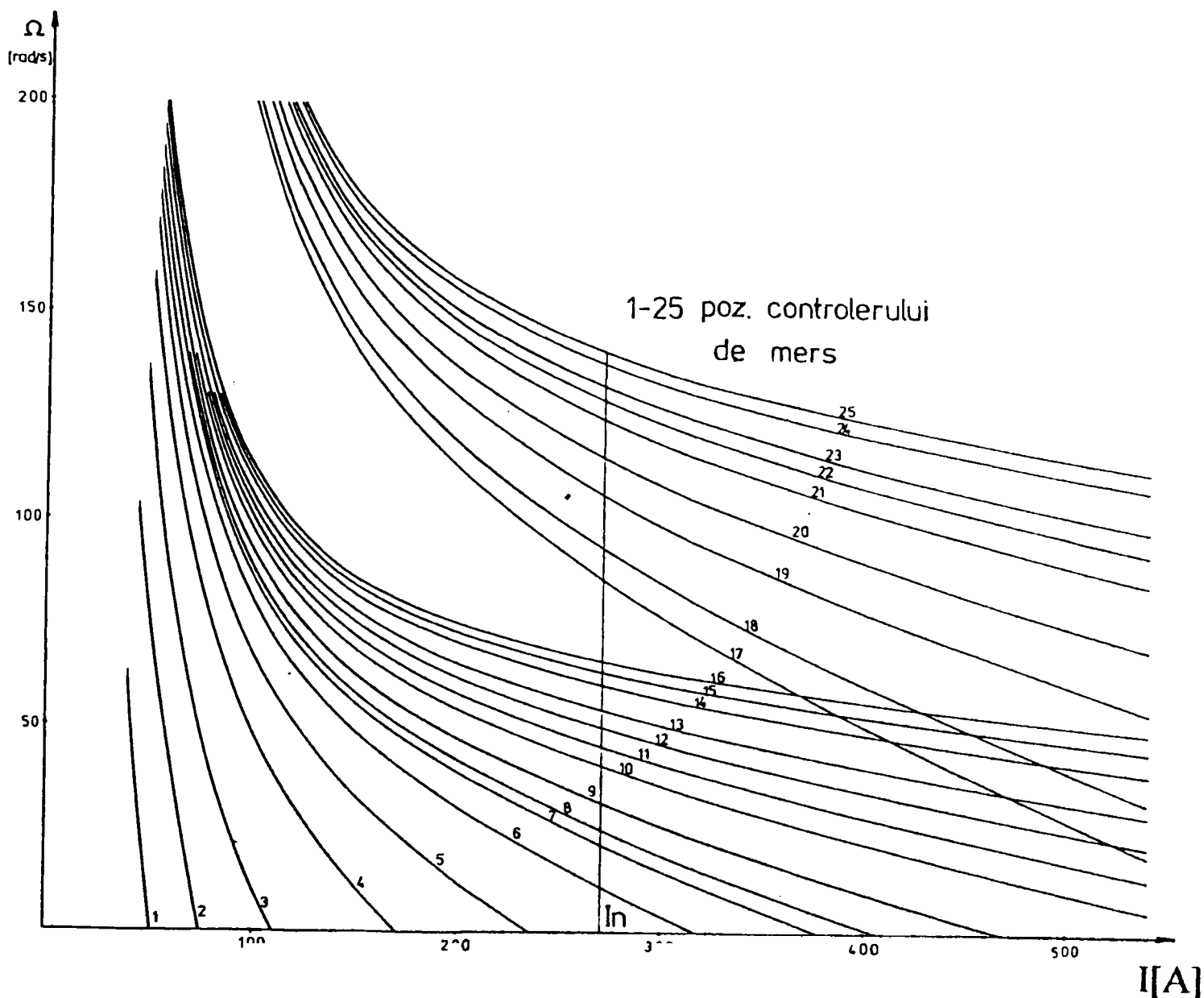


Figura 2.10. Caracteristicile vitezei unghiulare $\Omega(I)$

2.5.5. Caracteristicile randamentului

Randamentul se calculează cu relația:

$$\eta = 1 - \frac{RI}{U} - \frac{P}{UI} \quad (2.10)$$

Pentru motorul în cauză, randamentul la tensiunea nominală este dat în tabelul 2.4 (valori date de constructor) [90] și reprezentat în figura 2.11.

Tabelul 2.4.

I(A)	50	100	150	200	250	270	310	360	400	440	500	540
η	0,860	0,894	0,903	0,904	0,905	0,900	0,896	0,889	0,882	0,874	0,858	0,848

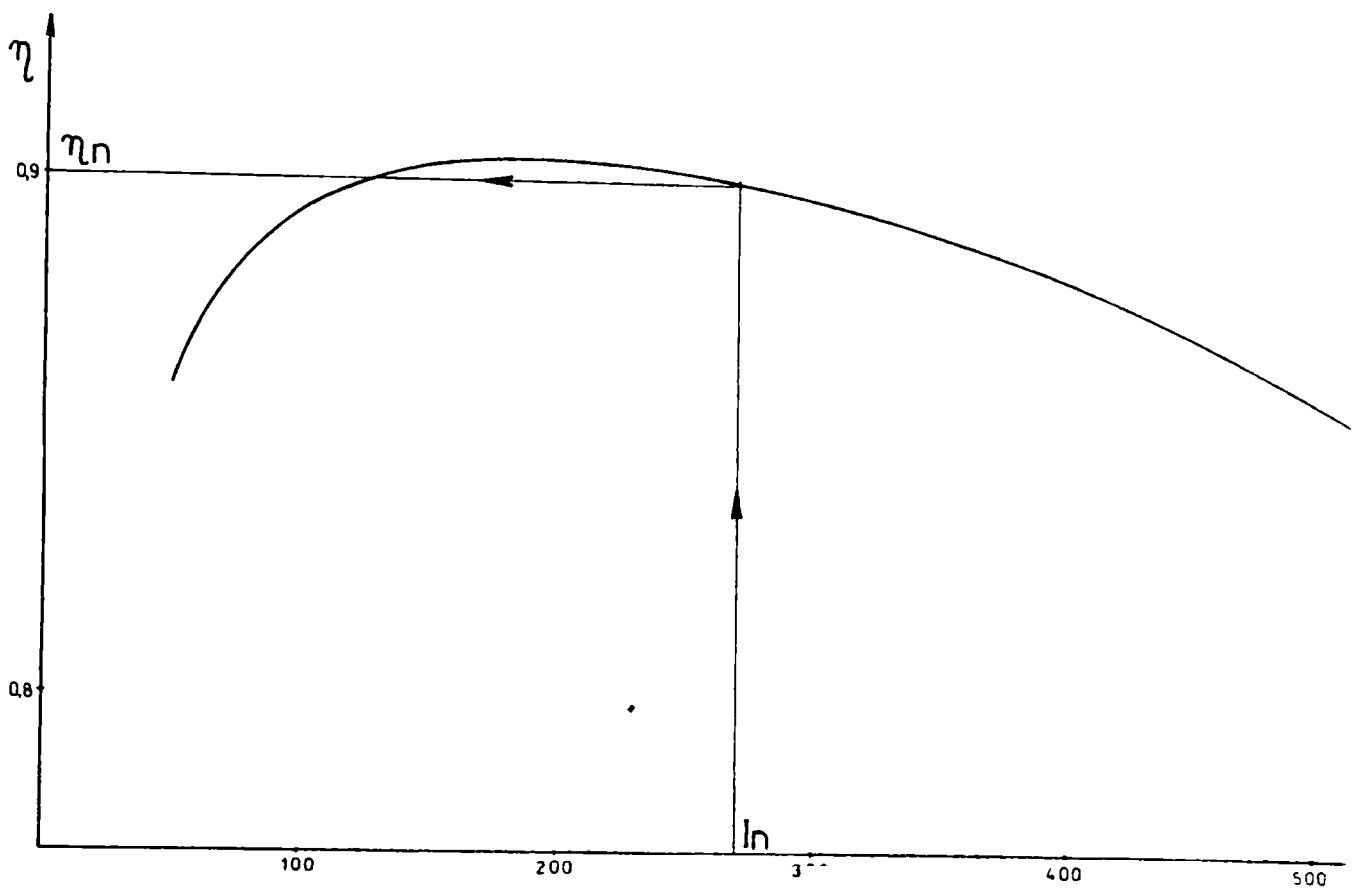


Fig. 2.11. Caracteristica randamentului $\eta(I)$

2.5.6. Caracteristicile cuplurilor

Cuplul electromagnetic este dat de relația:

$$M_e = K\phi I \quad (2.11)$$

Făcând calculele, se obțin valorile din tabelul 2.5, iar graficul de variație $M_e(I)$ este reprezentat în figura 2.12.

Cuplul util este dat de relația (2.13) și se obține prin egalarea ecuațiilor puterii mecanice și a puterii electrice.

$$M_u \Omega = UI\eta \quad (2.12)$$

$$M_u = \frac{UI\eta}{\Omega} \quad (2.13)$$

Calculând cu ecuația (2.13), se completează tabelul 2.5, iar graficul de variație $M_u(I)$ este reprezentat în figura 2.12.

Tabelul 2.5.

$I[A]$	50	100	150	200	250	270	310	360	400	440	500	540
$K\phi[Wb]$	1,64	3,20	4,08	4,56	4,90	5,00	5,20	5,35	5,50	5,60	5,75	5,85
$M_e[Nm]$	82	320	612	912	1225	1350	1612	1926	2200	2464	2875	3159
$M_u[Nm]$	71	290	561	847	1138	1248	1488	1778	2035	2271	2616	2862

2.5.7. Caracteristicile mecanice

Se determină prin eliminarea grafică sau analitică a curentului între $\Omega(I)$ și $M_u(I)$ din tabelul 2.3 și 2.5, rezultând caracteristicile $M_u(\Omega)$ reprezentate grafic în figura 2.13.

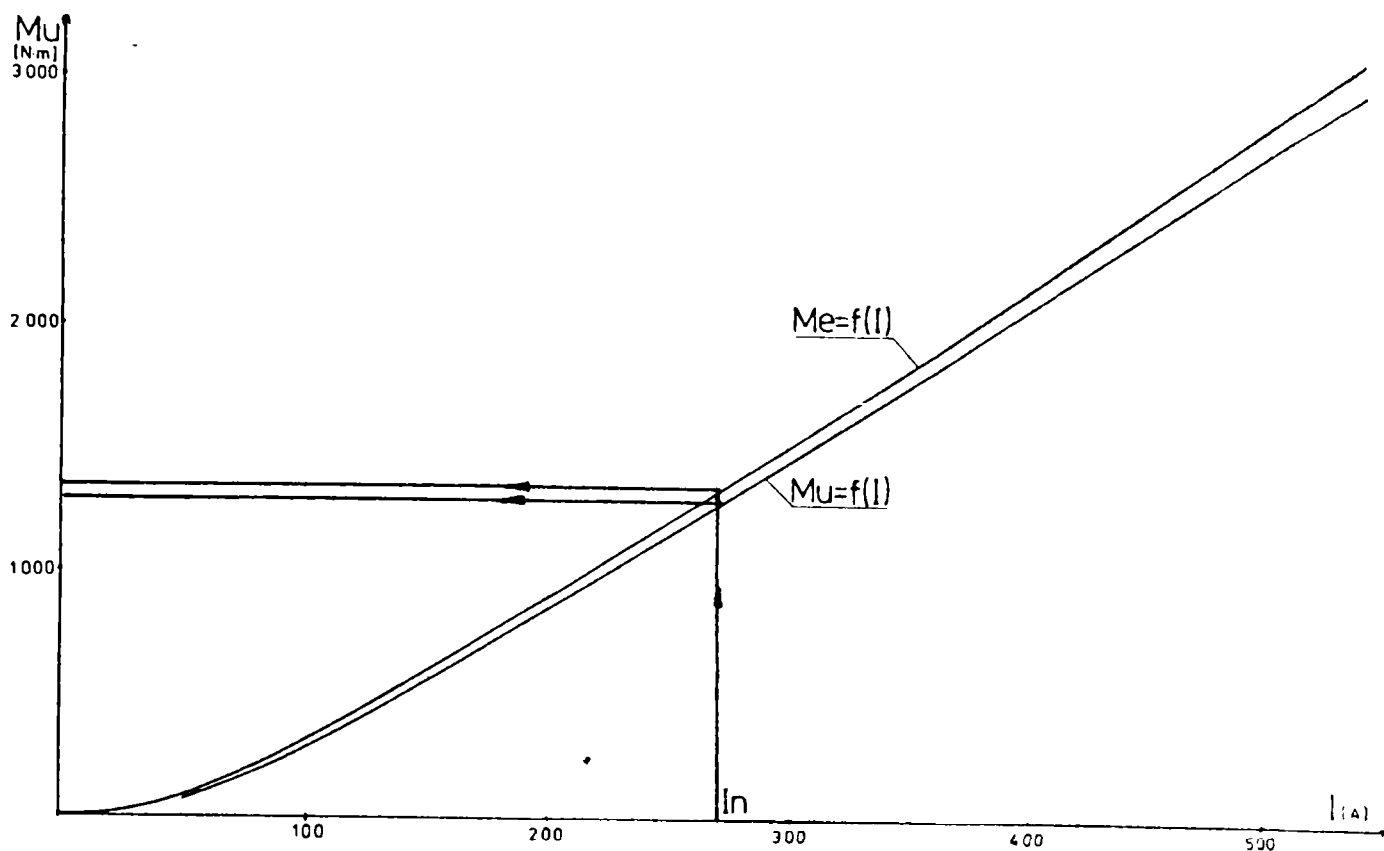


Figura 2.12. Caracteristicile cuplurilor $M_e(I)$, $M_u(I)$

2.6. Calculul caracteristicilor de frânare

Reprezintă diagramele de variație a cuplului de frânare în funcție de viteza unghiulară pentru pozițiile de funcționare ale controlerului, adică pentru diferite valori ale rezistenței de frânare.

Așa cum se constată din figura 2.3, la frânarea reostatică excitațiile celor 4 motoare de tracțiune sunt legate în serie și alimentate de la o sursă independentă de 110 Vcc, iar două motoare legate în serie debitează pe reostatul de frânare R_{xA} , înseriate cu reostatul adițional de frânare R_{a1} , reglarea făcându-se cu 8 trepte de frânare date de controlerul de frână.

Cele 8 trepte de frânare realizează modificarea rezistenței R_{xA} a cărei valoare este dată în tabelul 2.6.

Dacă la aceste valori ale rezistenței reostatului de frânare se adună rezistența adițională R_{a1} și rezistența rotorică a celor două motoare de tracțiune, atunci:

$$R_{tot} = R_{xA} + R_{a1} + 2 \cdot R_i. \quad (2.14)$$

Valorile sunt date în tabelul 2.6, rubrica a treia, unde: $R_i=0,07284\Omega$, respectiv $R_{a1} = 0,045 \Omega$.

Tabelul 2.6.

Treapta	1	2	3	4	5	6	7	8
$R_{xA} [\Omega]$	4	3,2	2,44	1,84	1,4	1	0,72	0,52
$R_{tot} [\Omega]$	4,1907	3,3907	2,6307	2,0307	1,5907	1,1907	0,9107	0,7107

Toată energia electrică debitată la funcționarea mașinilor electrice în regim de generator (frânare electrică), este disipată pe reostatul de frânare și apoi evacuată sub formă de căldură în tunel.

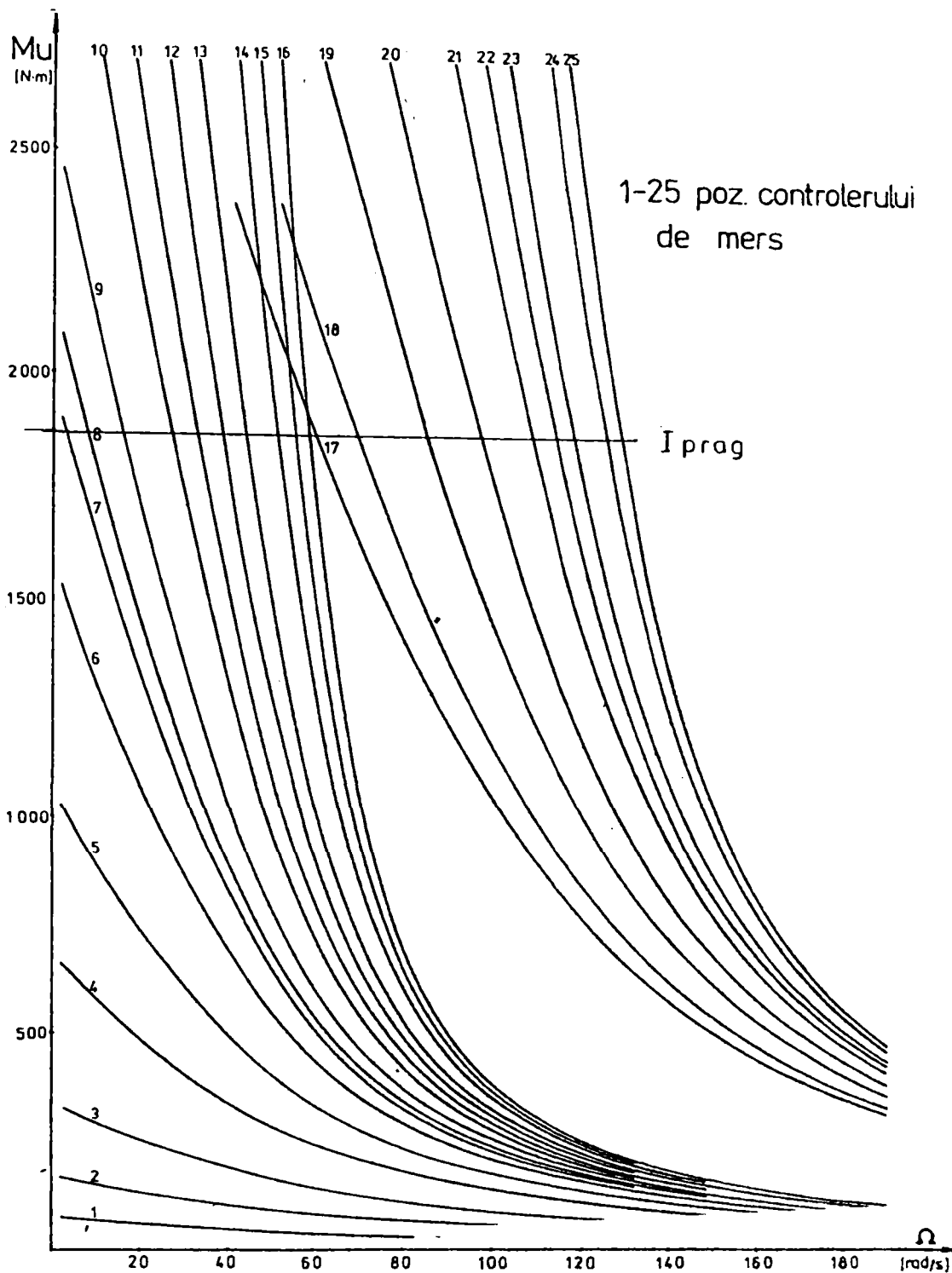


Figura 2.13. Caracteristicile mecanice $M_u(\Omega)$

Pornind de la expresia tensiunii electromotoare induse în timpul frânării, rezultă (vezi schema din figura 2.3)

$$2E = R_{tot} I_f \quad \text{s-au,} \quad (2.15)$$

$$2K\Phi\Omega = R_{tot} I_f ,$$

Atunci:
$$\Omega = \frac{R_{tot} I_f}{2K\Phi} \quad (2.16)$$

În relațiile de mai sus, I_f este curentul de frânare, iar cuplul de frânare este dat de relația:

$$M_f = K\Phi I_f \quad (2.17)$$

Înlocuind în (2.17) pe I_f din (2.16) rezultă:

$$M_f = \frac{2(K\Phi)^2}{R_{tot}} \Omega. \quad (2.18)$$

Dacă curentul de excitație $I_e = ct.$, atunci $K\Phi = ct.$, și în acest caz:

$$M_f = ct. \cdot \Omega. \quad (2.19)$$

Viteza unghiulară maximă este corespunzătoare vitezei maxime a vehiculului de la care începe frânarea, deci se poate scrie:

$$\Omega = (V / R) \cdot i_{tr}, \quad (2.20)$$

Unde: $V = 80 \text{ Km/h}$ - viteza maximă a vehiculului;

$R = D/2 = 550 \text{ mm}$ - raza cercului de rulare;

$i_{tr} = 43/8$ - raportul de transmitere.

Făcând înlocuirile în relația (2.20), rezultă viteza unghiulară maximă: $\Omega_{max} = 217 \text{ rad/s}$.

Curentul de excitație pe prima treaptă se alege la valoarea [53]:

$$I_{e1} = 0,5 \cdot I_n = 0,5 \cdot 270 = 135 \text{ A}$$

Curentul de frânare este: $I_{f1} = I_{max} = 440 \text{ A}$.

Frânarea cu valorile curenților de mai sus creează cuplul de frânare:

$$M_{f1} = (K\Phi)_{I_{e1}} \cdot I_{f1}. \quad (2.21)$$

Din caracteristica magnetică, rezultă: $(K\Phi)_{I_{e1}} = 3,85 \text{ Wb}$, deci:

$$M_{f1} = 3,85 \cdot 440 = 1694 \text{ Nm}.$$

Din ecuația (2.16), rezultă ecuația (2.22) care înlocuită în (2.17) va rezulta ecuația (2.23):

$$K\Phi = \frac{R_{tot} I_f}{2\Omega}, \quad (2.22)$$

$$M_f = \frac{R_{tot} I_f^2}{2\Omega} \quad (2.23)$$

Pentru valorile lui R_{tot} din tabelul 2.6, se completează tabelul 2.7 calculat cu relația (2.23) pentru $I_f = 440 \text{ A}$ și se obține cuplul de frânare $M_f[\text{Nm}]$.

Cu valorile din tabelul 2.7, se trasează graficul de variație al cuplului în funcție de viteza unghiulară și se reprezintă în figura 2.14.

Tabelul 2.7.

$\Omega[\text{s}^{-1}]$	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	217
Poz	$M_f[\text{Nm}]$										
1	19360	9600	6453	4840	3872	3225	2765	2420	2150	1936	1784
2	16410	8205	5470	4100	3280	2735	2344	2050	1823	1641	1512
3	12730	6366	4244	3183	2546	2122	1818	1590	1414	1273	1173
4	9828	4914	3276	2457	1965	1638	1404	1228	1092	982	905
5	7698	3850	2566	1925	1540	1283	1100	962	855	770	710
6	5760	2880	1920	1440	1150	960	825	720	640	576	530
7	4407	2204	1470	1100	8807	735	630	550	490	440	406
8	3440	1720	1145	860	688	573	490	430	382	344	317

Dacă în figura 2.3 se notează cu I_e curentul de excitație dat de sursa independentă de tensiune și cu I_f curentul din circuitul de frânare, atunci suma căderilor de tensiune din circuit va da tensiunea totală de alimentare de la sursa independentă, rezultând ecuația:

$$110 = I_e R_{a1} + I_f R_{a1} + 4I_e R_e + I_e R_{a2} + I_f R_{a2} \quad (2.24)$$

Prin scoaterea factorilor comuni, rezultă:

$$110 = I_e (R_{a1} + R_{a2} + 4R_e) + I_f (R_{a1} + R_{a2}) \quad (2.25)$$

Dacă se ține seama de egalitatea celor două rezistențe R_{a1} și R_{a2} , ecuația (2.25) devine:

$$110 = I_e (2R_{a1} + 4R_e) + 2I_f R_a \text{ adică,} \quad (2.26)$$

$$I_e = \frac{110 - 2I_f R_a}{4R_e + 2R_a} \quad (2.27)$$

Din analiza ecuației (2.27), se observă că la scăderea curentului de frânare I_f , curentul de excitație I_e crește, ducând la creșterea fluxului ($K\Phi$), adică și a tensiunii electromotoare, deci implicit la creșterea curentului de frânare I_f . Aceasta înseamnă auto-compensarea circuitului de frânare și menținerea constantă a curentului de frânare.

Valoarea tensiunii de alimentare a excitației independente poate fi modificată în 4 trepte, printr-un reostat conectat în acest circuit R_{fe} și care este eliminat treptat prin trecerea manetei de frânare pe cele 4 poziții consecutive F1, F2, F3, F4 (vezi figura 2.3).

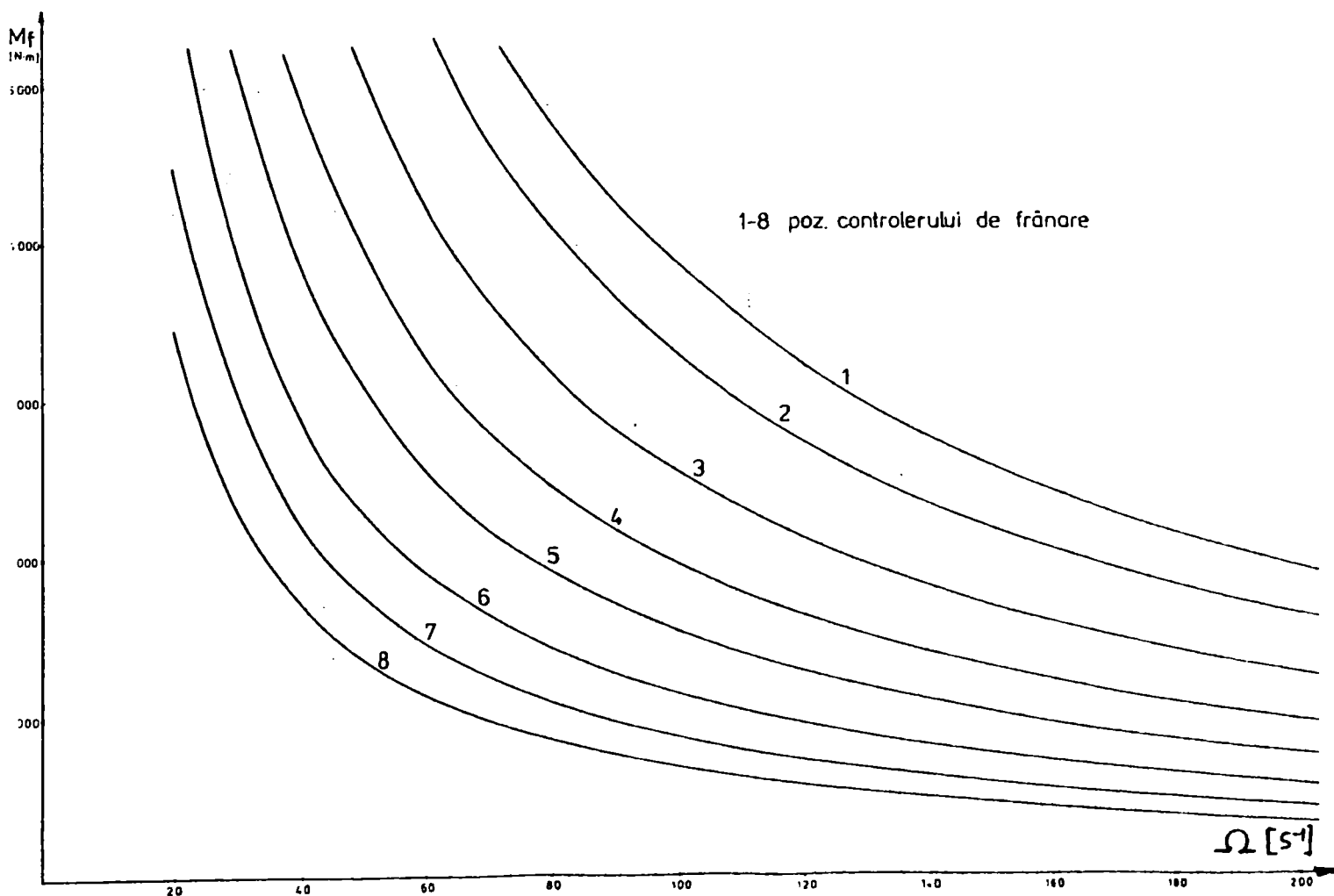


Figura 2.14. Diagramele de variație a cuplului de frânare $M_f(\Omega)$

2.7. Concluzii

Capitolul 2 este deosebit de util pentru că aici se prezintă metroul din București, cu actuala soluție de acționare electrică, cu toate avantajele, dar mai ales dezavantajele reglării reostatice a vitezei, punându-se astfel bazele unei analize temeinice în vederea găsirii și aplicării altor soluții mai moderne.

Aplicarea altor soluții de acționare electrică la metroul din România, mai fiabile și mai economice, implică cunoașterea amănunțită a soluției existente, cunoașterea tuturor modificărilor care s-au făcut pe parcurs și a îmbunătățirilor aduse.

Din capitolul prezentat, rezultă că circulația trenurilor de metrou se face cu trei unități cuplate (numai la ore mai puțin aglomerate din zi, circulația are loc doar cu două unități cuplate), motiv pentru care apariția unui defect la un vagon, poate să aibă influențe negative asupra întregului tren. De asemenea, circulația făcându-se în tunel, apariția unui defect care duce la blocarea unui tren, conduce implicit la blocarea întregului trafic. Dacă defectul necesită evacuarea din vehicul (respectiv evacuarea din tunel) a pasagerilor (datorate începuturilor de incendii sau incendii cu degajare de fum), atunci urmările pot fi chiar tragice.

Aceste urmări, datorate unor defecte, arată clar necesitatea funcționării cu fiabilitate foarte ridicată, iar dacă totuși apare un defect în timpul funcționării vehiculului cu pasageri, acesta nu trebuie să influențeze circulația celorlalte unități din tren și nici a celorlalte trenuri.

O unitate de metrou având 4 motoare de tracțiune creează posibilitatea modificării tensiunii de alimentare prin conexiunea motoarelor serie-paralel și paralel.

Între conexiuni, reglarea vitezei se realizează reostatic în trepte. Trecerea de la o treaptă de reglare la alta se face în funcție de curentul prin motor, curent măsurat de către un traductor a cărei valoare stă la baza comenzilor de reglare. La depășirea curentului de prag pe un motor de tracțiune, sistemul de comandă oprește controlerul de mers pe treapta respectivă, dar dacă creșterea a fost prea mare (datorată modificării rezistențelor de înaintare sau a unui defect), nu poate comanda reducerea corespunzătoare a tensiunii sau revenirea controlerului pe trepte inferioare.

Reglarea în trepte cauzează și apariția șocurilor mecanice în lanțul de transmitere al cuplului motor spre obada roții motoare.

Partea de reglare a circuitului de forță compus din contactoarele controlerului de mers și a contactoarelor de schemă, deține un număr mare de contacte. Datorită curentului mare, aparatura și agregatele de reglare au dimensiuni mari.

Reglarea reostatică implică existența unui reostat (de dimensiuni mari), a cărui consum energetic suplimentar este aproape egal cu cel necesar obținerii lucrului mecanic (în procesul de demaraj, consumul suplimentar se menține până la eliminarea integrală a reostatului).

Căldura degajată de acest reostat trebuie evacuată în exterior, motiv pentru care este necesară prezența unor ventilatoare acționate electric, ducând și în acest mod la creșterea consumului energetic.

Toate aceste agregate de dimensiuni mari au și greutatea mari, provocând astfel creșterea tării vagoanelor și implicit creșterea consumului energetic. Frânarea electrică de serviciu fiind tot reostatică, duce implicit la existența controlerului de frână, a contactoarelor de schemă și a altor agregate, toate de gabarit și greutatea mari.

Solicitarea termică, electrică și mecanică a motorului de tracțiune se face și în timpul procesului de frânare. Deoarece în circuitul de frânare mai există și reostate adiționale conectate în circuitul de alimentare a excitațiilor motoarelor de tracțiune (de la sursa exterioară a bateriilor de acumulare), au loc pierderi suplimentare de energie.

Frânarea electrică este în exclusivitate reostatică, iar energia electrică disipată pe reostatul de frânare (același cu cel de demaraj) este evacuată sub formă de căldură în tunel.

În mod normal, deplasarea între două stații se face printr-un proces de demaraj (cu mașinile electrice în regim de tracțiune), de mers lansat (cu motoarele deconectate de la rețea) și de frânare (cu mașinile electrice în regim de generatoare). Există însă manevre pentru care se realizează două sau mai multe cicluri ca cel prezentat anterior, motiv pentru care consumul energetic este și mai mare decât cel normal.

Instalația de comandă a schimbării treptelor de viteză este foarte complicată, fiind formată din foarte multe elemente a căror fiabilitate este scăzută, ducând astfel la reducerea fiabilității în ansamblu a acesteia.

Schemele circuitelor electrice de comandă sunt și ele foarte complicate și cu un număr de componente ridicat, ducând în final la reducerea fiabilității vehiculului. Din cauza lipsei unor componente de comandă fabricate în România, s-au folosit două surse de tensiune pentru circuitele de comandă, una de 24 Vcc și alta de 110 Vcc. Pentru o parte din serviciile auxiliare a fost necesară și a treia sursă de tensiune de 3x220 Vca.

Nu în ultimul rând, folosirea mașinii electrice de curent continuu cu colector duce la apariția dezavantajelor derivate din prezența colectorului și a periilor colectoare, și a dezavantajelor datorită funcționării cu trepte de tensiuni.

Pe lângă dezavantajele prezentate mai sus, sistemul de acționare cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei reostatic are și o serie de avantaje după cum urmează:

- fiind folosit în tracțiunea electrică de aproape 100 de ani, este foarte bine cunoscut în exploatare;
- fiind foarte vechi, el a fost modificat în permanență, devenind astfel și foarte simplu;
- necesită aparatură de comandă foarte simplă și este ușor de manevrat;
- întreținerea este foarte simplă;
- la trenurile suburbane sau metrourele de suprafață, disiparea căldurii din reostatele de demaraj-frânare poate fi folosită în timpul iernii pentru încălzirea saloanelor de pasageri;
- în multe orașe ale lumii, acest sistem mai este păstrat încă (dar prin automatizarea lui cu automat programabil cu microprocesor).

Deși orașul București deține și alte mijloace de transport în comun (autobuze, tramvaie, troleibuze), într-un număr foarte ridicat, cu toate problemele mari pe care exploatarea le are la ora actuală (datorate dezavantajelor prezentate mai sus și a unei fiabilități scăzute), nu s-a renunțat și nu se poate renunța la acest mijloc de transport în comun cu metroul (datorită investițiilor foarte mari, atât în trenurile de metrou cât și în tunelul echipat). Din acest motiv, este necesară menținerea lui în exploatare prin îmbunătățirea substanțială a fiabilității și implicit prin aplicarea unei soluții noi de acționare, care să ducă și la reducerea cheltuielilor de întreținere, reparație și exploatare.

Capitolul 3

Sisteme de acționare electrică reprezentative ale metrourilor din alte țări

3.1. Principalele tipuri de acționări electrice la metrou

Dezvoltarea constructivă a orașelor atât pe orizontală, cât și pe verticală, a dus la imposibilitatea asigurării transportului clasic de suprafață pentru călători, în special în marile orașe și capitale ale lumii.

A apărut deci, și s-a dezvoltat tot mai mult un nou mijloc de transport urban, METROUL. Construit să circule subteran, dar și la suprafață, acesta a reușit să transporte un număr foarte mare de pasageri, într-un timp foarte scurt. Numărul mare de călători, transportat pe oră și sens, se datorează în primul rând:

- creșterii dimensiunii utile a saloanelor de pasageri;
- creșterii vitezelor de circulație;
- creșterii accelerațiilor și decelerațiilor;
- creșterii numărului de trenuri aflate la un moment dat în circulație și posibilitatea modificării acestui număr în decursul unei zile, în funcție de aglomerațiile la anumite ore de vârf;
- micșorarea timpului de staționare prin majorarea substanțială a dimensiunilor ușilor care fac schimbul de călători, și eliminarea treptelor de urcare (sau coborâre), prin aducerea peronului la nivelul planșeului din vehicul.

Asigurarea unui ritm sigur de transport s-a putut face numai prin construirea unor linii speciale, atât în tunel, cât și la suprafață, care să nu fie incomodate de celelalte mijloace de transport, de anotimpuri sau de perioada unei zile. Aceste linii au fost dotate cu "*bloc de linie automat*" care să permită circulația la intervale foarte scurte de timp, în ambele sensuri, și cu o supraveghere centralizată și automatizată a tuturor trenurilor din rețea.

Alături de cele prezentate anterior, este necesară asigurarea unei fiabilități crescute și o funcționare cu cât mai puține defecțiuni ale trenurilor în parcurs. Liniile de alimentare cu energie electrică sunt realizate în două moduri, cu șina a III-a unde culegerea tensiunii se realizează cu captatoare, și cu linii aeriene când pentru captare se folosește pantograful.

Asigurarea energiei electrice este realizată de către substațiile de tracțiune, dotate cu redresoare, deci tensiunea este de curent continuu. Abia construcțiile moderne din ultimii ani au fost făcute și la tensiuni alternative și înalte.

Pe baza celor prezentate mai sus și a studiilor făcute, au rezultat în principiu trei mari sisteme de acționare reprezentative utilizate la metrou și anume:

- sistemul de acționare cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei reostatic;
- sistemul de acționare cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei cu VTC;
- sistemul de acționare cu mașina de curent alternativ trifazat asincronă (sincronă) și reglarea vitezei cu invertor de frecvență.

Cele trei sisteme au următoarele particularități specifice:

- toate trei sunt alimentate de substații în curent continuu;
- primele două folosesc pentru tracțiune mașina de curent continuu, iar al treilea mașina de curent alternativ;
- toate trei permit funcționarea și în regim de frânare electrică;
- ultimele două sisteme permit funcționarea în regim de frânare recuperativă;
- primul sistem realizând regimul de motor cu reglare reostatică, are consumul de energie electrică la demaraj aproape dublu față de celelalte două sisteme (care consumă numai atât cât se transformă în energie mecanică necesară la obada roților);
- primul sistem are nevoie de agregate pentru disiparea căldurii, iar următoarele două nu au consum rezistiv;
- primul sistem prezintă șocuri electrice și mecanice datorită treptelor de curent, celelalte două au o pornire și o funcționare lină.

Sistemul de acționare cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei reostatic este folosit și la metroul din România și a fost prezentat detaliat în capitolul anterior. Acest sistem mai este folosit încă de multe metrouri din lume cum sunt: metroul din Marsilia, Cairo, Budapesta, Praga (parțial), Viena (parțial), Berlin (parțial), Paris (parțial), Londra (parțial), Stockholm (parțial).

3.2. Acționarea cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei cu VTC

3.2.1. Introducere

Acționările moderne s-au diversificat foarte mult în ultimii 30 de ani și datorită folosirii elementelor statice apărute între timp: diode, tranzistoare, tiristoare, etc.

Variatorul de tensiune continuă (VTC), este convertorul care reglează circulația de energie în circuite de curent continuu după principiul comenzii prin variația frecvenței, a duratei impulsului de tensiune, sau și a frecvenței și a duratei impulsului de tensiune, obținută prin trecerea alternativă în stare de conducție și blocare a convertorului.

Valoarea medie a tensiunii de ieșire din VTC se poate modifica teoretic între zero și valoarea tensiunii la linia de alimentare, dând astfel posibilitatea reglării prin tensiune a motoarelor de curent continuu.

Una dintre schemele principale de acționare cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei cu VTC este prezentată în figura 3.1 [37], cu următoarele notații:

MT - motorul de tracțiune;

LM - inductivitatea din circuitul serie a MT;

LR - inductivitatea filtrului de intrare;

CF - condensatorul filtrului de rețea;

VTC - variatorul de tensiune continuă;

DF - diodă de fugă;

U_1 - tensiunea liniei de alimentare;

U_m - tensiunea aplicată motorului de tracțiune;

E - tensiunea electromotoare.

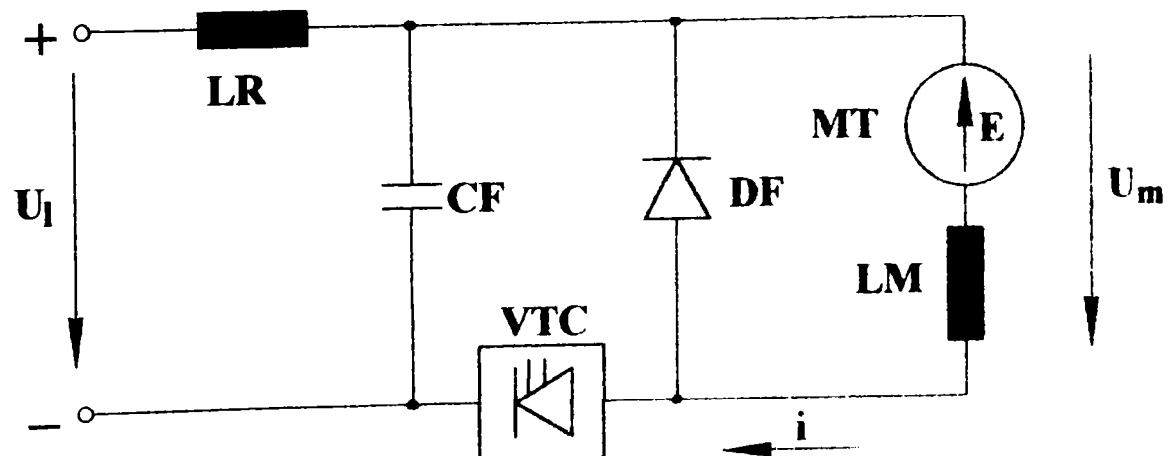


Figura 3.1. Schema principală de acționare cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei cu VTC

Notând cu: T_C - timpul de conducție;
 T - perioada de tact,
 atunci raportul de conducție va fi:

$$a = \frac{T_C}{T}. \quad (3.1)$$

În regim staționar, tensiunea medie aplicată pe MT va fi:

$$U_m = \frac{1}{T} \int_0^{T_C} U_1 dt = \frac{T_C}{T} U_1 = aU_1. \quad (3.2)$$

Pentru $0 < a < 1$ în regim tranzitoriu, se pot scrie relațiile [37]:

- în intervalul de la 0 la aT :

$$U_1 = Ri + L \frac{di}{dt} + E, \quad (3.3)$$

- în intervalul de la aT la T :

$$0 = Ri + L \frac{di}{dt} + E, \quad (3.4)$$

în care: R - rezistența circuitului motorului;
 L - inductanța totală a motorului;
 E - tensiunea electromotoare a motorului.

Dacă se notează cu $T_m = \frac{L}{R}$ constanta de timp a motorului, atunci ecuația (3.3) devine:

$$\frac{L}{R} \frac{di}{dt} + i = \frac{U_1 - E}{R}, \quad (3.5)$$

$$T_m \frac{di}{dt} + i = \frac{U_1 - E}{R}. \quad (3.6)$$

Prin rezolvarea acestei ecuații diferențiale, se obțin valorile curentului minim și maxim prin motor:

$$I_{\max} = \frac{U_1}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{aT}{T_m}}}{1 - e^{-\frac{T}{T_m}}} - \frac{E}{R}, \quad (3.7)$$

$$I_{\min} = \frac{U_1}{R} \cdot \frac{e^{\frac{aT}{T_m}} - 1}{e^{\frac{T}{T_m}} - 1} - \frac{E}{R}. \quad (3.8)$$

Atât tensiunea cât și curenții rezultați din relațiile anterioare au forma de variație simplificată ca în figura 3.2 [37].

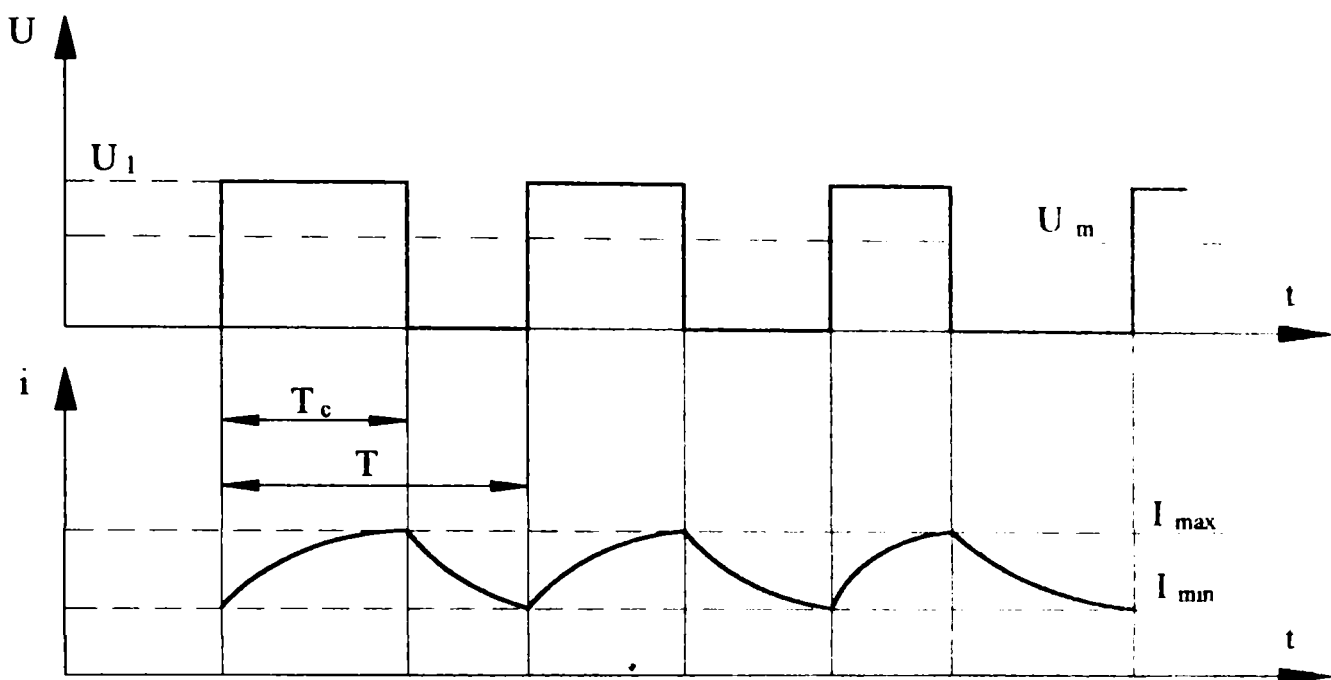


Figura 3.2. Diagrama de variație a curenților și tensiunii prin motor la reglarea cu VTC

După cum rezultă din relațiile (3.2), (3.7) și (3.8), prin variația mărimii “ a ”, se poate obține o variație a tensiunii medii la ieșire din variator și, respectiv, de reglare a curentului prin motor, cu pierderi relativ mici de energie în VTC.

Făcând comparație între un demaraj cu reostat și unul cu VTC, atunci pe această perioadă, puterea preluată de la rețea prin VTC, este folosită aproape în întregime numai pentru producerea de lucru mecanic necesar deplasării vehiculului (fiind unul dintre marile avantaje ale acestui sistem de acționare).

Primele vehicule de transport urban de putere alimentate de la linia de curent continuu prin VTC și propulsate de către motoare tot de curent continuu, au intrat în exploatare în anul 1967 la Chicago și San Francisco [59]. Firma Siemens a realizat primele locomotive miniere cu VTC, alimentate de la bateriile de acumulatori și mai târziu și de la linia de contact alimentată în curent continuu [59].

Funcționarea fiind în curent continuu, problema cea mai grea este de stingere a tiristorului principal, motiv pentru care instalația se complică prin prezența tiristoarelor și condensatoarelor de stingere. Apariția tiristoarelor cu stingere pe poartă GTO a permis folosirea acestora și în tracțiunea electrică. Ele intră în conducție prin impuls de curent pozitiv aplicat porții, iar stingerea se face aplicând porții un impuls negativ. În acest fel, construcția convertoarelor statice se simplifică foarte mult prin eliminarea elementelor de stingere, dar și prin posibilitatea folosirii fibrei optice pentru comanda tiristoarelor.

În măsura în care pe raza de alimentare a unei stații de tracțiune există și alte vehicule în regim de tracțiune, VTC-ul poate funcționa și în regim de frânare electrică recuperativă. Problema

frânării electrice recuperative este rezolvată definitiv, acolo unde substațiile de tracțiune sunt conectate în paralel sau acolo unde substația de tracțiune are o construcție mai modernă, dotată cu invertor, care permite livrarea energiei electrice în sistemul energetic național. Dacă substațiile de tracțiune nu beneficiază de caracteristicile prezentate mai sus, vehiculul va avea obligatoriu și un reostat pentru frânare, cu agregatele corespunzătoare disipării energiei și a căldurii.

O serie de țări din lume aplică acest sistem de acționare electrică la metrou, din care câteva vor fi enumerate în continuare. De asemenea, unele firme de prestigiu fabrică în continuare numai acționări cu VTC, cum este de exemplu Bombardier din Canada.

3.2.2. Metrourul din Bruxelles

Schema electrică de forță a metroului din Bruxelles este reprezentată în figura 3.3 [95], unde s-a notat:

- S_{III} - șina a III-a de alimentare;
- $S1, S2$ - siguranțe fuzibile ultrarapide;
- THP - tiristoare pentru funcționarea în regim de tracțiune;
- THF - tiristoare pentru funcționarea în regim de frânare;
- L_L - inductivitatea din circuitul serie a MT;
- L_R - inductivitatea filtrului de intrare;
- $M1, M2$ - motoarele de tracțiune;
- KI_v - inversorul de sens;
- SP - sursă de preexcitare;
- CF - condensator filtru rețea;
- DRL - dioda de fugă;
- K_{sc} - contactoarele pentru comanda slăbirii câmpului;
- DSJ1, DSJ2 - disjunctoarele;
- PD - protecție diferențială;
- TI - traductorul de curent al MT;
- KF - contactorul pentru funcționarea în regim de frânare;
- KT - contactorul pentru funcționarea în regim tracțiune;
- KF1,2,3 - contactoarele pentru conectarea reostatelor adiționale de frânare;
- Raf - reostatul adițional de frânare;
- RF - reostatul de frânare;
- R_{sc} - reostatul pentru slăbirea câmpului;
- Db - diodă de blocare;
- Da - diodă de accelerare;

CF_f – condensatorul din circuitul de frânare;

$E_{x 1,2}$ – excitațiile MT;

KT2 – contactor pentru funcționarea în regim de tracțiune a vagonului 2.

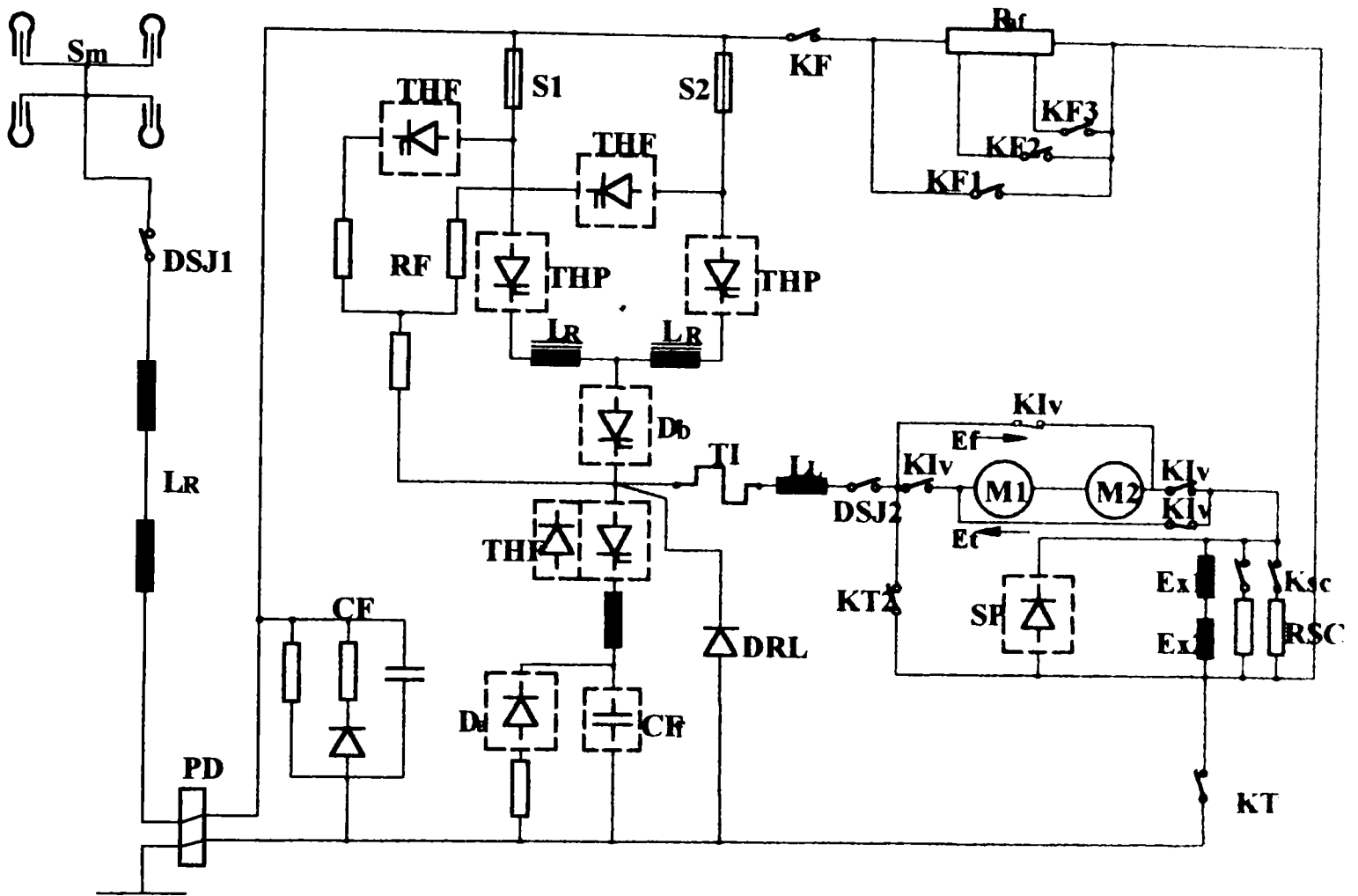


Figura 33. Schema electrică a metroului din Bruxelles

Tensiunea de alimentare de la rețea este de 750 Vcc, iar schema funcționează cu două motoare de tracțiune legate permanent în serie.

Pentru funcționarea în regim de tracțiune se comandă tiristoarele principale THP, care permit alimentarea motoarelor de tracțiune de la rețea.

În perioada când tiristoarele de tracțiune sunt blocate, curentul prin motoare este asigurat prin dioda de fugă DRL.

Deoarece la frânare motoarele de tracțiune funcționează în regim de generatoare cu excitație serie, este necesară existența unei surse de preexcitare SP, care să forțeze apariția tensiunii electromotoare la începutul procesului, după care aceasta este deconectată. Circuitul frânei electrice recuperative este asigurat prin contactorul KF cu rezistența R_{af} scoasă din circuit, iar dioda de fugă are rol de cale de întoarcere a curentului la motoarele de tracțiune.

În cazul în care nu există consumatori (adică alt vehicul în regim de tracțiune), prin comanda tiristorului de frânare THF, energia debitată de generatoare este consumată pe reostatul de frânare RF și Raf.

Comanda schemei în regim de tracțiune se face printr-o electronică de comandă, care supraveghează în mod automat viteza vehiculului, curenții prin motoare și tensiunea din circuit.

3.2.3. Metrouri fabricate de firma GEC – ALSTHOM

a). Metroul din Paris

Este un vehicul de tipul MF 77, iar trenul este format din 5 vagoane din care 3 vagoane motoare și două vagoane remorcă intercalate. Ele sunt atât de clasa I-a, cât și clasa a II-a.

Principalele caracteristici ale acestui tren sunt:

- lungimea totală este de 77,5 m; locuri pe scaune 246; număr de călători în picioare (pentru 5 călători/m²) este de 594;
- masa totală a trenului gol este de 117,7 t;
- masa totală încărcată a trenului este de 168,3 t;
- puterea totală de tracțiune este de 1590 kW.

Pentru trenul format din 6 vagoane de călători, lungimea totală crește cu 15,5 m, dar puterea este aceeași, deoarece există tot 3 vagoane motoare. Pentru trenul format din 7 vagoane, lungimea totală crește cu încă 15,5 m, iar puterea devine 2120 kW, adică 530 kW pe un vagon motor.

Performanțe:

- viteza maximă 100 km/h;
- accelerația la demaraj, între 0-40 km/h este de 0,8m/s²;
- decelerația medie este de 1 m/s²;
- conducere normală cu pilot automat;
- posibilitate de conducere manuală de către mecanic;
- alimentarea la 750 Vcc prin șina a III-a.

Echipamente:

- captatoarele pentru șina a III-a sunt montate pe boghiu;
- tracțiunea și frânarea se realizează prin VTC;
- comutația tracțiune – frânare se face integral static;
- o parte din rame sunt pilotate prin microprocesor;
- frâna electrică recuperativă este conjugată cu frâna mecanică pe jumătate din osii;
- grupul convertizor rotativ furnizează o tensiune de 380 Vca, 50 Hz și o putere de 40 kVA, pentru circuitele de iluminat, compresor, încărcarea bateriilor de acumulare la 79 V;
- dispozitiv de antipatinaj de tip SAB;
- cupla dintre vagoane este centrală.

Transmisia electrică:

- 2 motoare de tracțiune autoventilate;
- tensiunea în regim continuu 720 V;
- curent în regim continuu 420 A;
- izolație în clasa H;
- motor de tracțiune complet suspendat.

Boghiul:

- boghiul este monomotor;
- transmisia între motor și osie se realizează cu punți reductoare și cardan în raportul de 1:4,45;
- suspensia primară este din bloc de cauciuc;
- suspensia secundară este pneumatică;
- frâna mecanică cu disc și saboți, cu comanda electro-pneumatică;
- frână de ținut pe toate osiile.

b). Metrourul din Lyon – liniile A și B

Trenul este format din 2 vagoane și o remorcă.

Caracteristici dimensionale:

- lungimea totală 54 m;
- locuri pe scaune 160;
- locuri în picioare 224;
- masa totală 78 t;
- masa totală cu călători 104 t;
- puterea totală 868 kW.

Performanțe:

- viteza maximă 90 km/h;
- accelerația maximă între 0-30 km/h este de 1,3 m/s²;
- decelerația medie 1,2 m/s²;
- conducere normală cu pilot automat.

Echipamente:

- alimentare electrică la 750 Vcc prin captatoare de la șina a III-a;
- tracțiunea și frânarea realizată prin VTC, cu tiristoare răcite prin ventilație;
- frâna electrică este cu recuperare;
- comutarea din regimul de tracțiune în regimul de frânare se face electro-pneumatic;
- frână mecanică comandată pneumatic prin cilindri cu resort, în completarea frânei electrice;
- alimentarea serviciilor auxiliare se face de la un convertor static.

Transmisia electrică:

- 2 motoare de tracțiune autoventilate;
- reglarea cu VTC;
- excitație serie;
- caracteristicile unui motor de tracțiune sunt:
 - tensiunea în regim continuu 750 V;
 - curent în regim continuu 340 A;
 - izolație în clasă H.

Boghiul:

- există 2 boghiuri monomotoare pe vagon;
- transmisia între motor și osie se realizează cu punți reductoare și cuplaje elastice;
- roți purtătoare pneumatice la diametrul de 1005 mm;
- roți de ghidare pneumatice;
- roți de securitate monobloc de oțel la diametrul $D = 860$ mm;
- suspensia primară este din blocuri de cauciuc;
- suspensia secundară pe pernă de aer;
- frâna mecanică este cu saboți, acționată de cilindrii cu resort;

c). Metrourul din Lyon – linia D

Trenul este format din 2 vagoane motoare, care rulează pe pneuri

Caracteristici dimensionale:

- lungimea totală 36 m;
- locuri pe scaune 112;
- locuri în picioare 152 (4 călători/m²);
- masa totală 51 t;
- masa totală cu călători 69 t;
- puterea totală 512 kW.

Performanțe:

- viteza maximă 75 km/h;
- accelerația maximă între 0-26 km/h este de 1,33 m/s²;
- decelerația medie 1,2 m/s²;
- conducere cu pilot automat integral, fără conducător.

Echipamente:

- alimentare electrică la 750 Vcc prin captatoare de la șina a III-a, retractabile;
- energia serviciilor auxiliare se obține de la o sursă statică de 15 kW, la 110 Vcc, și 380 Vca;
- un grup moto-pompă de curent continuu produce pe fiecare boghiu energia hidraulică necesară frânării mecanice.

Transmisia electrică:

- un motor de tracțiune pe fiecare vagon, autoventilat;
- reglarea cu VTC;
- excitație independentă;
- caracteristicile unui motor de tracțiune sunt:
 - tensiunea în regim continuu 750 V;
 - curent în regim continuu 350 A;
 - izolație în clasă C.

Boghiul:

- există un boghiu bimotor pe fiecare vagon;
- suspensia secundară este cu pernă de aer;
- pneurile au rol de suspensie primară;
- frâna disc este comandată electro-hidraulic;
- roți de ghidare pneumatice;
- roți de securitate monobloc din oțel;
- antene de emisie recepție pentru pilotul automat.

d). Metrourul din Mexic

Trenul este format din 6 vagoane, din care 4 motoare sau 9 vagoane, din care 6 vagoane motoare.

Caracteristici dimensionale:

- lungimea totală 99 m, respectiv 147 m;
- capacitate 1020, respectiv 1530 pasageri;
- greutate 222 t, respectiv 341 t, cu călători.

Performanțe:

- viteza maximă 80 km/h;
- accelerația maximă la demaraj $1,4 \text{ m/s}^2$;
- decelerația maximă la frânare $1,8 \text{ m/s}^2$;
- conducere normală cu pilot automat, cu posibilități de conducere manuală de către mecanic;
- circulație pe cale specială cu pistă de rulare, bare de ghidare și cu șine de securitate conferindu-i astfel siguranță maximă în exploatare.

Echipamente:

- alimentare electrică la 750 Vcc prin bare de ghidare;
- alimentarea serviciilor auxiliare de la o sursă statică de tensiune 220 V– 60 Hz și 72 Vcc;
- frâna electrică este conjugată cu frâna mecanică.

Transmisia electrică:

- 4 motoare de tracțiune conectate serie în permanență, pe fiecare vagon motor;
- puterea pe un vagon motor 456 kW;
- reglarea vitezei se face cu VTC;

- caracteristicile unui motor de tracțiune sunt:
 - tensiunea în regim continuu 360 V;
 - curent în regim continuu 400 A;
 - clasa de izolație rotor – H, și stator – F.

Boghiul:

- există două boghiuri bimotoare la fiecare vagon motor;
- roțile alergătoare și de ghidare sunt cu pneuri;
- suspensia primară este cu blocuri de cauciuc;
- suspensia secundară este realizată cu arcuri elicoidale din oțel, cu bară de torsiune;
- frâna mecanică cu 2 saboți pe fiecare roată de siguranță.

e).Metroul din Caracas

Trenul este format din 2, 3, 4, 5, 6 și 7 vagoane motoare, lungimea, numărul de călători și puterea absorbită modificându-se după numărul de vagoane din tren.

Performanțe:

- viteza maximă 80 km/h;
- accelerația maximă la demaraj $1,35 \text{ m/s}^2$;
- decelerația maximă la frânare $1,1 \text{ m/s}^2$;
- conducere normală cu pilot automat.

Echipamente:

- posibilități de conducere normală cu mecanic.
- alimentare la 750 Vcc din șina a III-a;
- serviciile auxiliare alimentate prin grup convertizor de 110 kVA (cu tensiuni de: $3 \times 200 \text{ Vca}$, 60 Hz, respectiv 72 Vcc)

Transmisia electrică:

- reglarea vitezei se face cu VTC;
- frânarea electrică este cu recuperare, dar și reostatică, conjugată cu frâna mecanică;
- pe un vagon motor se află 2 motoare de tracțiune autoventilate, legate în permanență în serie;
- caracteristicile unui motor de tracțiune sunt:
 - tensiune în regim continuu 680 V;
 - curent în regim unioară 630 A;
 - curent în regim de durată 400 A;
 - putere instalată pe un vagon 488 kW.

Boghiul:

- există două boghiuri bimotoare la fiecare vagon motor;
- transmisia se realizează prin reductor complet elastic;
- suspensia primară este realizată din inele de cauciuc;
- suspensia secundară este cu pernă de aer;
- frâna mecanică cu saboți cu comandă electro-pneumatică.

3.2.4. Metrouri fabricate de firma ABB

Și după anul 1990, firma ABB a realizat o serie de vehicule în sistemul de acționare cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei cu VTC. În ANEXA II, se vor prezenta câteva dintre caracteristicile acestora.

Se poate astfel constata că firma ABB a fabricat un număr însemnat de vehicule de tracțiune electrică, la care reglarea vitezei se face cu VTC, iar sistemul de comandă este atât cu control electronic clasic, cât și cu automat programabil cu microprocesor.

3.3. Acționarea cu mașina de curent alternativ trifazat asincronă și reglarea vitezei cu invertor de frecvență

3.3.1. Necesitatea introducerii acestui sistem

Începutul tracțiunii electrice a fost în curent continuu, cu motoare electrice de tracțiune de curent continuu cu excitație serie, pe de o parte datorită simplității lor, iar pe de altă parte datorită formei de variație a caracteristicilor $\Omega(I)$ și $M_u(\Omega)$, adică a forței de tracțiune $F_0(V)$.

Odată cu creșterea vitezei și a tonajelor de transport, a fost necesară construirea unor motoare de tracțiune cu puteri mari, care să asigure un excedent de putere suficient de mare pentru asigurarea unei accelerații ridicate, în special la trenurile cu opriri dese. Creșterea puterii s-a făcut prin creșterea tensiunii și a curentului parcurs prin motor. Toate aceste majorări ale parametrilor (putere, tensiune și curent), precum și neajunsul că mașina de curent continuu este cu colector și perii colectoare, a dus la reducerea fiabilității motorului de tracțiune și la creșterea substanțială a numărului defectelor.

A apărut apoi și s-a folosit la majoritatea acționărilor electrice motorul asincron de curent alternativ trifazat cu rotorul în scurtcircuit, a cărei fiabilitate a fost și este mult mai ridicată.

Linia de contact și stațiile de tracțiune fiind de curent continuu, s-a impus realizarea unui vehicul electric alimentat de la aceeași rețea, dar motorul de tracțiune să fie asincron trifazat.

Vehiculelor de transport urban au început să li se impună o serie de exigențe după cum urmează:

- reducerea consumului de energie electrică în perioada demarajului, regim care este destul de frecvent;
- asigurarea frânării electrice combinate (recuperativ-reostatică);

- eliminarea pe cât posibil a elementelor de conectare electro-mecanice în regim de tracțiune, respectiv în regim de frânare electrică, dar mai ales la trecerea de la un regim la altul;
- reglarea continuă și rapidă a forței de tracțiune, respectiv a forței de frânare.

Utilizarea motoarelor asincrone a fost posibilă odată cu introducerea elementelor semiconductoare comandate.

Motorul asincron cu rotorul în scurtcircuit, utilizat în tracțiunea electrică de curent continuu, prezintă următoarele avantaje, comparativ cu motorul de curent continuu cu colector:

- la același gabarit, dezvoltă putere și turație mai mare;
- la puteri egale, are dimensiuni și greutate mai redusă;
- fiabilitatea este mai mare prin absența colectorului;
- este robust și necesită întreținere minimă;
- frânarea electrică recuperativă este inerentă și nu sunt necesare contactoare pentru trecerea din regimul de tracțiune în cel de frânare;
- caracteristicile mecanice rigide ale motorului asincron permit restabilirea aderenței, fără riscul ambalării turației osiilor care au pierdut aderența;
- consumul de metale neferoase este mai mic.

La utilizarea în tracțiunea electrică a mașinii asincrone de curent alternativ trifazat, reglarea vitezei se face cu ajutorul invertorului. Singura posibilitate de modificare a vitezei mașinii asincrone trifazate, cu performanțe acceptabile [38], este aceea de alimentare prin convertoare statice de frecvență (CSF), care permit modificarea independentă a frecvenței și tensiunii la ieșirea lui.

La vehiculele echipate cu convertoare statice de frecvență, comanda se face astfel ca până la viteza nominală corespunzătoare tensiunii maxime de ieșire, CSF să funcționeze la flux magnetic constant, condiție care echivalează cu un regim de cuplu constant.

În domeniul de la viteza nominală la viteza maximă, se lucrează la tensiune constantă, deci la flux magnetic slăbit, adică cu un regim de putere constantă, conducând astfel la reducerea hiperbolică a forței de tracțiune cu viteza.

Invertoarele se pretează fără modificări mari și la transferul energiei de frânare de la mașină spre linia de contact. O serie de firme cu renume în construcția metrourilor au început să aplice sistemul de acționare cu mașina de curent alternativ trifazat și reglarea vitezei cu inverter de frecvență.

3.3.2. Tracțiunea electrică HOLEC

În figura 3.4, este reprezentată schema de forță a unui metrou din Olanda, realizată de firma Holec [119]. Schema permite alimentarea atât prin pantograf la 25 kVca și frecvență de 50 Hz, cât și prin captatoare la 750 Vcc.

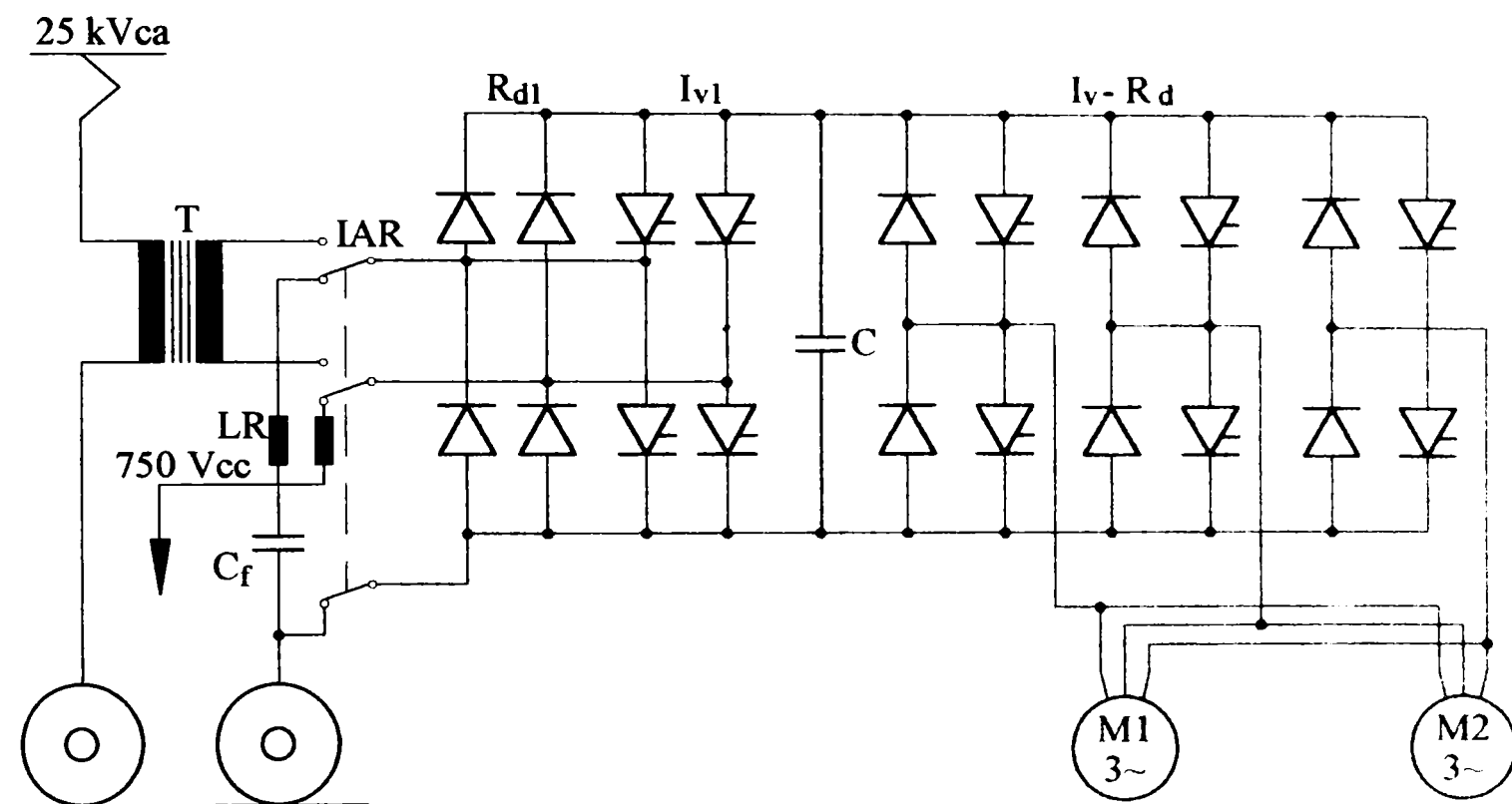


Figura 3.4. Schema electrică de forță a metroului Holec

Notățiile corespunzătoare folosite în figura 3.4, sunt:

T - transformatorul coborâtor de tensiune;

IAR - întrerupătorul automat cu selector;

LR - inductivitatea filtrului de intrare;

C_f - condensatorul filtrului de intrare;

Rd1 - redresor pentru funcționarea pe linia de curent alternativ;

Iv1 - invertor pentru funcționarea în regim de frânare recuperativă;

C - condensatorul filtru din circuitul tensiunii redresate;

Iv - invertor pentru funcționarea în regim de tracțiune;

Rd - redresor pentru funcționarea în regim de frânare;

Transformatorul coborâtor reduce tensiunea de 25 kVca la valoarea necesară tracțiunii.

Rd1 redresează tensiunea alternativă în tensiune continuă, în procesul de tracțiune prin diodele corespunzătoare, iar în regim de frânare recuperativă, **Iv1** permite conversia energiei electrice de curent continuu în energie electrică de curent alternativ.

Iv converge energia electrică de curent continuu în energie electrică de curent alternativ trifazat, necesară funcționării motoarelor electrice prin intermediul tiristoarelor.

În regim de frânare electrică, **Rd** redresează tensiunea alternativă în tensiune continuă, iar de aici prin tiristoarele invertorului **Iv1** este trimisă la rețea.

Alimentarea invertorului fiind în curent continuu, echipamentul de putere operează independent de tensiunea de alimentare.

Alimentarea poate fi făcută atât în curent continuu prin captatoare de la șina a III-a, cât și prin pantograf de la linia de contact la tensiunea de 25 kVca și frecvența de 50 Hz, permițând astfel trecerea foarte simplă de la un sistem de alimentare la altul, putând utiliza în acest fel vehiculul de metrou, și în transportul suburban, unde alimentarea se face prin pantograf de la linia aeriană 25 kVca.

3.3.3. Tracțiunea electrică TOSHIBA [115]

Acest sistem de tracțiune electrică, alimentat în curent continuu la 750 V, cu motorul de tracțiune alternativ trifazat asincron și reglarea vitezei prin invertor, este reprezentat în figura 3.5, unde s-au făcut notațiile:

CP - captatoare;

S1 - siguranță fuzibilă ultrarapidă;

IA - întrerupătorul automat;

TTR - traductorul de tensiune rețea;

FL - inductivitatea filtrului de intrare;

HB - contactor disjunctor pentru funcționarea în regim de tracțiune-frânare;

R_{af} - reostatul adițional de frânare;

U, V, W - invertoare de faze;

T1...T6 - tiristoarele invertorului;

D1...D6 - diodele invertorului;

$CI_{U, v, w}$ - traductoarele de curent pe faze;

FCS - contactor pentru funcționarea în regim de frânare reostatică;

TF – tiristor pentru funcționarea în regim de frânare;

RF – reostatul de frânare;

FC - condensator filtru;

DCPTR - rezistența traductorului.

DCPT - traductor de tensiune la funcționarea în regim de frânare;

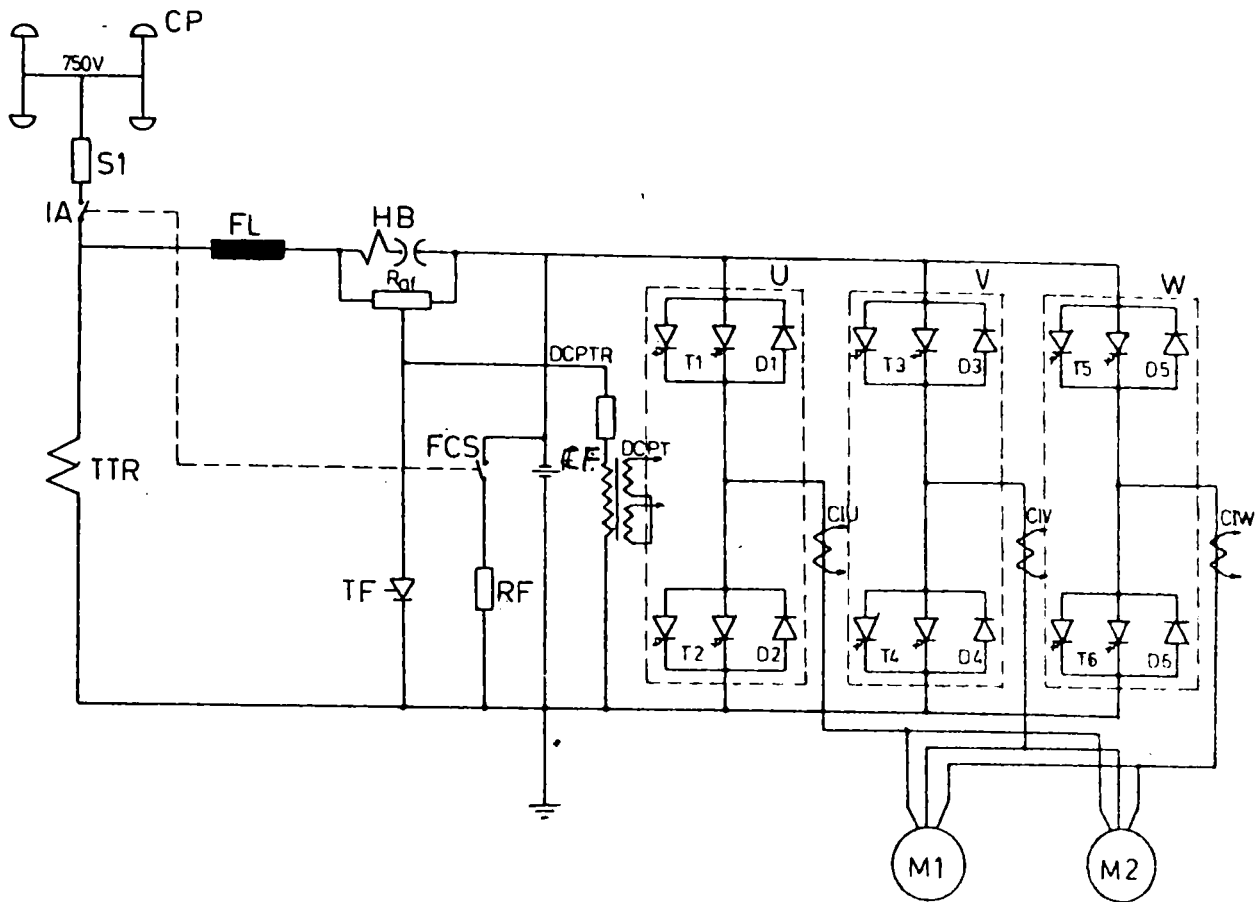


Figura 3.5. Schema electrică de forță a metroului Toshiba

În timpul funcționării, prin sistemul de control, se asigură putere riguros constantă, pentru a îmbunătăți performanțele la viteză mare.

La frânarea recuperativă, se adoptă un control al cuplului, și menținerea lui constantă pentru a realiza o frânare eficientă de la viteza maximă.

Pentru obținerea unui demaraj lin și fără șocuri, se realizează un control al tensiunii și al frecvenței. Coeficientul de modulație este controlat cu scopul de a nu altera armonica fundamentală a tensiunii de ieșire din inverter, la schimbarea pulsului.

Datorită inductivităților din inverter și a energiei înmagazinate, pierderile interne ale inverterului au fost reduse, rezultând o creștere a randamentului.

Prin alegerea frecvenței de alimentare optime, s-a îmbunătățit atât randamentul, cât și factorul de putere al motorului de tracțiune.

Frecvența fundamentalei pentru tracțiune la viteze mici corespunde frânării la viteze mari. Această metodă este eficientă chiar și în cazul patinării roții.

Inverterul este realizat cu tiristoare GTO cu aprindere și stingere pe poartă având următorii parametrii:

- tensiunea repetitivă directă 2500 V;
- curent direct 400 A;
- curent anodic maxim de decuplare 800 A.

Inverterul are următorii parametrii:

- tensiunea repetitivă directă 2500 V;

- $P_{inv} = 600 \text{ kVA}$;
- Frecvență = 5-125 Hz;
- $L = 8 \text{ mH}$;
- $C = 600 \mu\text{F}$.

În timpul funcționării în regim de tracțiune, reglarea vitezei se realizează prin tiristoarele T1 – T6, iar recuperarea energiei de frânare se face prin diodele D1 – D6.

Dacă frânarea recuperativă nu este permisă, se trece automat la frânarea rezistivă prin tiristorul de frânare TF.

3.3.4. Tracțiunea electrică ELIN

Unii constructori ai vehiculelor de tracțiune electrică au făcut un salt în aplicarea sistemelor, trecând direct de la sistemul de acționare cu motorul de curent continuu și reglarea vitezei prin reostat, la sisteme de acționare cu mașina asincronă de curent alternativ trifazat și reglarea vitezei cu invertor.

Parametrii caracteristici ai acționării realizate de ELIN sunt:

- tensiune nominală 600 Vcc;
- curentul nominal 500 A;
- putere nominală 250 kW;
- frecvența de lucru a invertorului 3 kHz;
- puterea de pornire 500 kW și maxim 1000 A;

De asemenea, tensiunea de alimentare de la linia de contact poate fi și 750 Vcc, iar atunci parametrii caracteristici sunt:

- tensiunea nominală 750 Vcc;
- curentul nominal 400 A;
- puterea nominală 250 kW;
- frecvența de lucru a invertorului 3 kHz;
- puterea de pornire 500 kW și maxim 800 A;
- debitul aerului de răcire 1750 m³/h;
- frecvența la frânare 2x2 kHz 180°.

Schema electrică de forță a metroului fabricat de firma Elin este prezentată în figura 3.6, unde s-au făcut notațiile:

LC – linia de contact;

P – pantograf;

QAR – întrerupătorul automat ultrarapid;

KR – contactor pentru încărcarea inițială a condensatorului CF;

RP – rezistența de încărcare inițială a condensatorului filtru;

LR – inductivitatea filtrului de intrare;

CF – condensatorul filtrului de intrare;

TI – traductorul curentului de intrare;

TI_f – traductor de curent pentru funcționarea în regim de frânare;

TI_m – traductorul curentului pe faze;

$T1...T6$ – tranzistor pentru funcționarea în regim de tracțiune;

TFR – tranzistor pentru funcționarea în regim de frânare recuperativă;

TF – tranzistor pentru funcționarea în regim de frânare reostatică;

DT – diodă de sens pentru funcționarea în regim de tracțiune;

$D1...D6$ – diode pentru frânarea recuperativă;

$D_{7,8,9}$ – diode de protecție;

$RF_{1,2}$ – reostatul de frânare;

M – motorul de tracțiune asincron trifazat;

μP – microprocesor (automatul programabil).

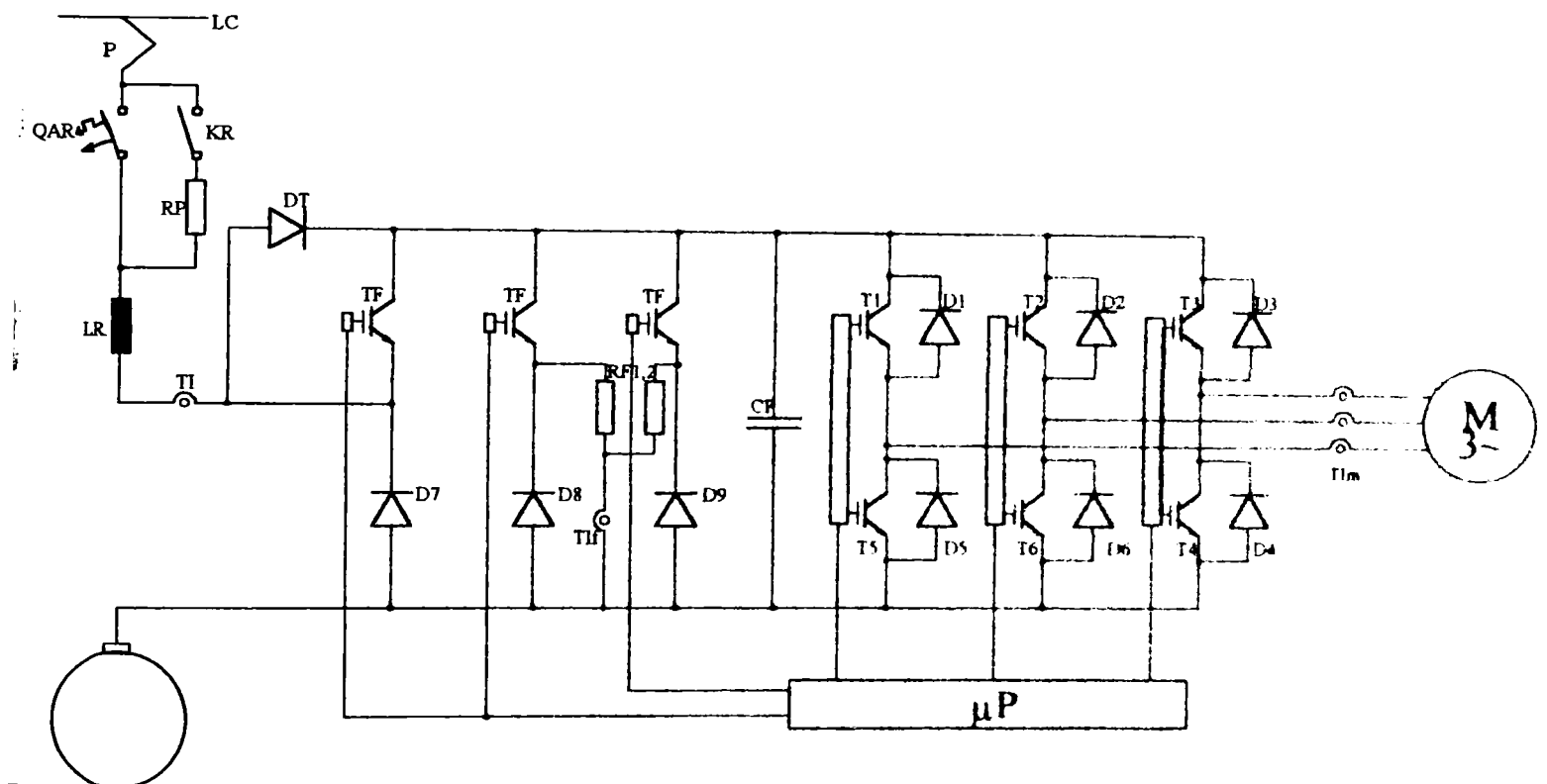


Figura 3.6. Schema electrică de forță a metroului ELIN

La conectarea schemei la rețea, se încarcă condensatorul filtru CF prin contactorul KR, rezistența RP, inductivitatea LR și dioda DT.

După încărcarea lui prin conectarea întrerupătorului automat ultrarapid, se alimentează cu tensiune de la rețea schema de tracțiune.

Tranzistoarele T1-T6 asigură tensiunea alternativă trifazată la motorul M, iar comanda lor este realizată de la microprocesor. Curentul pe fiecare fază este măsurat de traductorul TI_m , iar curentul total de intrare pe vehicul este măsurat de traductorul TI.

Frânarea recuperativă este realizată prin diodele D1...D6 și tranzistorul TFR, care livrează tensiunea debitată de mașina electrică, la linia de contact. Frânarea reostatică se face prin intermediul tranzistoarelor TF și a rezistențelor RF1,2.

Comanda tuturor tranzistoarelor se realizează de la automatul programabil cu microprocesor prin fibre optice.

3.3.5. Tracțiunea electrică ABB

Alături de alte mari companii care au realizat vehicule de tracțiune electrică, acționate de mașina de curent alternativ trifazat asincronă și reglarea vitezei cu inverter, se numără și ABB. Câteva dintre caracteristicile acestora sunt prezentate în ANEXA II.

Invertoarele utilizate pe vehiculele de tracțiune construite de ABB sunt atât cu tranzistoare, cât și cu tiristoare, comanda lor realizându-se electronic.

3.4. Concluzii

Acest capitol prezintă cele 3 sisteme de acționare electrică reprezentative ale metrourilor din alte țări și anume:

- sistemul de acționare cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei reostatic;
- sistemul de acționare cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei cu VTC;
- sistemul de acționare cu mașina de curent alternativ asincron (sincron) trifazat și reglarea vitezei cu inverter de frecvență;

Această ordine este și cea cronologică apărută în timp.

Deoarece primul sistem a fost cel care a apărut prima dată, el se menține și astăzi nu numai în București, dar și în alte orașe ale lumii (Marsilia, Cairo, Budapesta, Praga, Viena, Berlin, Paris, Londra, Stockholm etc.).

Datorită marilor neajunsuri ale primului sistem de acționare electrică (consumul rezistiv la demaraj, imposibilitatea frânării electrice recuperative, reglarea în trepte a tracțiunii și frânării precum și folosirea mașinii de curent continuu cu colector), specialiștii au căutat înlocuirea acestuia, astfel încât să se elimine pe cât posibil măcar o parte din dezavantajele lui.

Apariția celorlalte două sisteme a fost posibilă și datorită dezvoltării și fabricării elementelor statice de mare putere: diode, tranzistoare, tiristoare și tiristoare cu stingere pe poartă GTO.

Folosirea sistemului de acționare electrică cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei cu VTC a dus la eliminarea multor dezavantaje ale primului sistem. Cu acest prilej, reglarea vitezei nu se

mai face în trepte, pornirea și oprirea este lină și fără șocuri, se elimină consumul rezistiv la demaraj și este permisă frânarea electrică recuperativă, ducând astfel la o reducere substanțială a energiei electrice consumate.

Al treilea sistem de acționare electrică care folosește mașina de curent alternativ, s-a introdus pentru eliminarea marilor deficiențe ale mașinii de curent continuu cu colector. Acesta prezintă o serie de avantaje care au condus la aplicarea lui pe scară tot mai largă și la metrou. O parte dintre acestea sunt: dimensiune și greutate mai mică, fiabilitate crescută datorită lipsei collectorului, caracteristicile mecanice rigide permit restabilirea aderenței, consumul de metale neferoase este mai mic și nu necesită contactoare pentru trecerea din regimul de tracțiune în cel de frânare.

Marile firme producătoare de instalații și agregate de tracțiune electrică pentru metrou s-au împărțit în 3 categorii:

- firme care produc numai VTC (Bombardier din Canada);
- firme care produc numai invertoare de frecvență (Elin din Austria);
- firme care produc atât VTC-uri, cât și invertoare de frecvență (Holec din Olanda, Toshiba din Japonia, Gec-Alsthom din Franța, ABB din Germania și altele);

Alături de aceste 3 categorii mari, mai există și varianta constructivă cu invertoare de frecvență, dar alimentarea se face atât din linia de curent continuu, cât și dintr-o linie de curent alternativ la tensiunea de 25 kV și frecvența de 50 Hz. Acest vehicul mai are în plus un transformator coborâtor de tensiune și un redresor comandabil, permițând astfel circulația atât în tunel, cât și interurban la suprafață, trecerea făcându-se chiar în timpul mersului. Acest sistem de acționare electrică cu mașina de curent alternativ trifazat folosește pentru reglarea vitezei convertorul format dintr-un redresor comandabil și inverterul de frecvență.

Din analizele făcute de către autor, rezultă că se pot adapta oricare din cele două sisteme de acționare electrică modernă în funcție de specificul local și de posibilitățile locale de realizare (de personal, de trafic și financiare).

Având în vedere stadiul la care s-a ajuns în lume în tracțiunea electrică de la metrou, precum și numeroasele dezavantaje ale actualului sistem de acționare în România (care au dus la reducerea substanțială a fiabilității), autorul propune (vezi capitolul 5) aplicarea și la noi în țară cât mai rapid a sistemului de acționare cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei cu VTC (avându-se în vedere condițiile concrete ale metroului din București, precum și aspectul tehnico-economic).

Capitolul 4

Aplicarea unei soluții de acționare reglabilă de concepție nouă la metrou

4.1. Deficiențele și neajunsurile actualei soluții

Actuala soluție are un mare dezavantaj dat de existența motorului de tracțiune de curent continuu cu colector și perii colectoare (unde transferul de energie electrică se realizează între piese în mișcare), care creează o serie de neajunsuri, ducând în același timp și la cheltuieli mari de întreținere și reparație.

Apariția cercului de foc datorită comutației și a străpungerilor de izolație duc implicit la scăderea fiabilității acestei mașini electrice în exploatare. Greutatea unei mașini electrice de curent continuu este mai mare, volumul de asemenea, și implicit crește consumul de cupru care atrage după sine și ridicarea prețului de cost.

Aceste mașini electrice sunt montate pe boghiuri pentru acționarea osiei și atunci volumul lor este bine să fie cât mai mic.

Un alt mare neajuns al actualei soluții de acționare electrică, îl constituie consumul mare de energie la demaraj, care este aproape dublu în această perioadă. Acest consum energetic este datorat modificării reostatice a turației motorului de tracțiune. Pentru disiparea căldurii este necesară o altă instalație de răcire și ventilație, cu un alt consum de energie electrică. Cele două agregate ale reostatului de demaraj au o greutate de peste o tonă, ducând astfel la creșterea tarei vagoanelor și implicit la creșterea consumului de energie electrică.

Tot din cauza reglării reostatice în trepte consumul de conductoare de secțiune mare (70 și 95 mm²) este foarte ridicat, și, implicit, prețul de cost.

Reglarea vitezei se face în trepte și în acest fel apar șocuri de curent însoțite de solicitări termice și mecanice. Șocurile electrice și termice vor duce la încălzirea motoarelor de tracțiune și, implicit, la necesitatea stabilirii unui curent de durată mai mic [2]. Modificarea rezistenței reostatului de demaraj se realizează cu un controler de mers respectiv de frânare, dotat cu contactoare a căror dimensiune (datorită curentului mare) măresc foarte mult greutatea și gabaritul acestora.

Cu actualul sistem de acționare nu se poate realiza decât frânarea reostatică nerecuperativă, prin folosirea mașinii electrice în regim de generator cu excitație independentă. Din acest motiv, crește foarte mult consumul energetic din bateria de acumulatori, care are rolul de sursă de tensiune independentă la frânare.

Instalația de comandă și a serviciilor auxiliare este foarte complicată și cu un consum mare de energie electrică. Componentele instalațiilor electrice ale acestora sunt formate dintr-un număr foarte mare de: relee, contactoare, conductoare de legătură din cupru și papuci de conexiuni.

Apariția unui număr însemnat de defecte s-a datorat și nerespectării programului de revizii prevăzut în cartea tehnică, nerespectare cauzată de lipsa accesibilității la foarte multe componente.

În concluzie, toate neajunsurile și deficiențele enumerate mai sus duc la creșterea consumului de energie electrică, a greutateii și volumului, la scăderea fiabilității și creșterea cheltuielilor de fabricație, întreținere și exploatare.

Alături de acestea, se mai adaugă și apariția unor defecte în masă, cauzate de fiabilitatea redusă a componentelor schemei de acționare, deficiențe care au fost stabilite de către autor în timpul fabricației, probelor, dar mai ales în timpul exploatării, când: a participat la toate dezbaterile care au avut loc pe această temă, a propus și realizat modificări în instalațiile metroului, acestea având drept scop final să ducă la creșterea fiabilității și siguranței în exploatare.

4.2. Posibilitățile de perfecționare a actualei soluții

Având în vedere numeroasele neajunsuri arătate la subcapitolul 4.1, se impune ca strictă necesitate, creșterea fiabilității și reducerea cheltuielilor de întreținere, reparație și exploatare.

Din acest motiv, orice perfecționare a actualei soluții de acționare electrică la metrou este justificată și binevenită [1].

În acest sens, există mai multe direcții în care se poate acționa pentru perfecționarea actualei soluții, care vor fi enumerate în continuare.

4.2.1. Înlocuirea motorului electric de tracțiune de curent continuu cu motorul asincron

Actualul motor de tracțiune este de curent continuu cu excitație serie, iar pentru eliminarea multiplelor neajunsuri specifice acestuia prima măsură ce se impune ar fi eliminarea lui și înlocuirea cu un motor asincron de curent alternativ trifazat.

Această înlocuire însă cere implicit schimbarea întregului sistem de acționare prin folosirea invertorului de frecvență ca element de alimentare al motorului de tracțiune și de reglare a vitezei vehiculului. Odată cu folosirea motorului asincron trifazat de curent alternativ, se va schimba sistemul de comandă și cel al serviciilor auxiliare, precum și numeroase modificări constructive.

4.2.2. Modernizarea motorului electric de tracțiune

Problemele mari pe care le cunoaște exploatarea actualului motor de tracțiune ne îndreptățește să credem și să afirmăm că în actuala construcție, el nu mai poate fi folosit în tracțiunea electrică la metrou [3]. Din acest motiv, una dintre soluții ar fi construirea unui motor tot de curent continuu, dar într-o realizare tehnologică mult îmbunătățită și modernă la o greutate și gabarit mult mai redus (actualul motor cântărind cca. 1500 kg la o putere de 185 kW), și cu materiale care să-l poată încadra în clasa H de izolație (când temperatura poate ajunge la 180°C). Folosirea unor materiale electroizolante anorganice fac posibilă funcționarea înfășurărilor la temperaturi mult mai ridicate. La ora actuală într-o clasă de izolație H în Europa se pot realiza MT foarte bune care necesită întreținere minimă, adică numai înlocuirea periilor colectoare și suflarea cu aer comprimat.

Dimensiunea gabaritică și greutatea ar fi mai reduse dacă s-ar înlocui și răcirea naturală a motorului de tracțiune, cu o răcire forțată.

De asemenea, transferul de căldură în mașină poate fi substanțial intensificat prin răcire forțată.

Cu aceste modificări și cu un control riguros al curentului în regim de tracțiune și frânare, s-ar îmbunătăți foarte mult fiabilitatea motorului de tracțiune, ar crește siguranța în exploatare și s-ar reduce foarte mult prețul de cost al întreținerii lui.

4.2.3. Simplificarea cablajului de forță și reducerea cantitativă a lui

Curenții mari din circuitul motoarelor de tracțiune (450 A) conduc la folosirea în schemele electrice de forță a conductoarelor de secțiune mare care ajung (la acest tip de metrou) până la 70 și 95 mm². Aceste secțiuni însă nu pot fi micșorate din cauza încălzirii lor excesive (RI^2), apărute în timpul funcționării vehiculului. În schimb, lungimile conductoarele de legătură pot fi reduse printr-o proiectare și o raționalizare de trasee bună și o reamplasare pentru agregatele de forță care să permită în final un consum minim [2].

Consumul cel mai mare de conductoare îl favorizează însă reglarea rezistivă a vitezei vehiculului (pentru realizarea legăturilor electrice între fiecare treaptă din reostat și contactele controlerelor), care mai introduce suplimentar reostatul de demaraj și frânare, controlerul de mers și frână (sau contactoarele de reglare a treptelor de viteză).

Din acest motiv, pe lângă raționalizările propuse mai sus, este necesară înlocuirea soluției de reglare a vitezei cu una modernă, cum ar fi acționarea cu variatoare de tensiune continuă, care reduce la minim posibil lungimile de conductoare de legătură ale instalației de forță.

La simplificarea cablajului de forță autorul și-a adus aportul prin modificări, care s-au finalizat prin reducerea consumului de cupru.

4.2.4. Schimbarea principiului de acționare

Actualul principiu de acționare electrică la metrou s-a păstrat datorită conducerii centralizate a economiei și industriei Românești (până în anul 1989), care nu mai permitea în ultima perioadă nici un import, dar printre altele și datorită unor avantaje, care nu sunt de neglijat cum ar fi:

- sistemul este folosit în tracțiunea electrică de peste 100 de ani și astfel este foarte bine cunoscut în exploatare;
- fiind foarte vechi, a fost modificat în continuu, devenind astfel foarte simplu;
- aparatura folosită este simplă ușor de manevrat, întreținut și reparat.

Din analiza amănunțită a tuturor neajunsurilor actualei scheme de acționare electrică și a dezavantajelor sale, se poate desprinde ideea necesității înlocuirii ei cu alta, mai performantă și mai fiabilă.

Studiind soluțiile moderne folosite pe scară largă la metrou în lume, se desprind două mari principii de acționare mai reprezentative:

- acționarea cu mașina de curent alternativ trifazat asincronă și reglarea vitezei cu invertorul de frecvență;
- acționarea cu motorul de curent continuu și reglarea vitezei cu variatorul de tensiune continuă (VTC).

Primul sistem enunțat mai sus are la bază folosirea motorului alternativ trifazat sincron sau asincron pentru obținerea forței de tracțiune, iar tensiunea continuă luată de la linia de contact este transformată în tensiune alternativă prin intermediul invertorului static de frecvență. Acesta are rolul de reglare a turației motorului de tracțiune, în scopul obținerii unei viteze variabile a vehiculului. Pentru obținerea unei caracteristici de tracțiune $F_0(v)$ cu o variație de forma unei hiperbole, invertorul static modifică atât tensiunea, cât și frecvența curentului electric, menținând un raport a acestora mereu constant pentru a realiza o putere constantă.

Marele avantaj al folosirii motorului asincron trifazat este construcția acestuia mai simplă, nu are colector, iar rotorul este în scurtcircuit, bobinajul rotoric este din aluminiu, greutatea și gabaritul sunt mai reduse iar prețul de cost este mai mic. De asemenea, sistemul permite folosirea frânării recuperative. Această soluție este utilizată de multe firme producătoare și companii de transport din lume cum sunt: ELIN, GEC-ALSTROHM, ABB, TOSHIBA, HOLEC.

Al doilea sistem de acționare electrică la metrou mai modern este cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei cu VTC.

Această acționare folosește același motor de curent continuu din tracțiunea electrică clasică, aceeași linie de alimentare cu energie electrică, dar reglarea vitezei se face continuu cu ajutorul VTC-ului.

Odată cu apariția tiristorului cu stingere pe poartă GTO (folosit și în construcția VTC-ului), schema electrică de acționare se simplifică foarte mult, dar și componența lui internă, eliminându-se astfel foarte multe componente.

La acționarea electrică cu VTC apar o serie de avantaje, cum sunt:

- instalația de forță este simplă;
- consumul de energie electrică este redus;
- nu necesită reostat pentru demaraj (cu toate componentele aferente);
- permite frânarea electrică recuperativă;
- reglarea vitezei se face continuu, fără salturi electrice la MT, cu accelerație respectiv decelerație constantă, ducând astfel la funcționarea lină și fără șocuri;
- funcționează atât la demaraj, cât și la frânare cu accelerații respectiv decelerații constante, adică fără șocuri;
- se realizează ușor netezirea energiei absorbită din rețea și a energiei redată la rețea cu ajutorul filtrului de la intrare;
- comanda conducerii vehiculului și a reglării vitezei se pretează la folosirea automatului programabil cu micro-procesor.

Acest tip de acționare electrică este folosit de foarte multe firme producătoare și companii de transport din lume, cum sunt: TOSHIBA, GEC-ALSTHOM, ABB, metroul din BRUXELLES și altele.

Ținându-se seama de avantajele enumerate mai sus, în condițiile actuale specifice de la metrou, acest sistem de acționare se poate introduce mai ușor pe actualele rame de metrou clasice cu prilejul reparațiilor capitale, fără modificări majore la caroseria vehiculului și la boghiu (comparativ cu sistemul de acționare cu mașina asincronă).

Din studiul și analiza făcută de autor referitoare la prețul de cost pentru toate componentele eliminate din acționarea ramei clasice prin introducerea VTC-ului (controlerul de tracțiune și de frânare, reostatul de demaraj, agregatele pentru răcirea reostatului, conductoarele de legătură din instalația de forță, un număr foarte mare de relee și contactoare de comandă și instalația de reglare a vitezei), a rezultat că acesta este comparabil cu prețul de cost al componentelor noi introduse (VTC-ul, inductivitățile, condensatorul filtru și automatul programabil). Din punct de vedere al greutăților și volumelor, noul sistem de acționare este mai avantajos.

În ansamblu, mai ales datorită automatului programabil și a numărului mare de tiristoare din componența inverterului, prețul de cost al sistemului de acționare cu mașina asincronă alimentată prin inverter, este mai mare decât a sistemului de acționare cu mașina de curent cuntinuu și reglarea vitezei cu VTC.

4.2.5. Perfecționarea blocului automat de comandă a reglării vitezei

Sistemul actual de comandă este dotat cu aparatură care a permis automatizarea până la un anumit nivel [4], iar alături de agregatele de forță a dus la reglarea vitezei în trepte, fără depășirea unui anumit prag al curentului la motoarele de tracțiune.

Cel mai modern mijloc de automatizare a conducerii și reglării vitezei acestui vehicul este AUTOMATUL PROGRAMABIL cu microprocesor [7].

Automatul programabil cu microprocesor este un aparat electronic central, construit în tehnologie modernă, care funcționează pe baza unui program bine stabilit, putând fi foarte simplu modificat la nevoie.

În el trebuie să intre toate informațiile referitoare la starea contactoarelor de schemă, starea diferitelor butoane de acționare din posturile de conducere, valorile parametrilor unor mărimi electrice și neelectrice, precum și informații referitoare la viteza cerută de către conducătorul vehiculului prin traductoarele inductive și viteza efectivă.

Informațiile de intrare sunt logice și analogice.

Din automatul programabil cu microprocesor vor ieși semnalele care vor comanda:

- întrerupătorul automat;
- contactoarele de schemă;
- contactoarele de tracțiune;
- contactoarele de frânare;
- contactoarele serviciilor auxiliare;
- comanda de aprindere și stingere a tiristoarelor;
- lămpi de semnalizare cu indicația bunei funcționări sau apariția unor defecte.

Un mare avantaj al folosirii automatului programabil cu microprocesor îl constituie posibilitatea comenzii tiristoarelor prin fibră optică, eliminând astfel toate distorsiunile sau paraziții care ar putea să apară în funcționare și care să denatureze procesul de reglare, iar timpul de răspuns este foarte mic. De asemenea, verificarea bunei funcționări a automatului programabil, cât și a instalației de pe vehicul poate fi foarte ușor făcută pe baza unui program și a unui calculator conectat la interfața sa.

Verificarea instalației electrice înaintea conectării la automatul programabil cu microprocesor pentru vehiculele noi fabricate, se poate face cu un dispozitiv special construit în acest scop [9]. Acesta poate să reducă de exemplu numărul de ore pentru probe de la 800 la 40, pentru o unitate de metrou.

4.2.6. Perfecționarea instalațiilor electrice auxiliare ale metroului și folosirea unor componente fiabile

a). Înlocuirea unor aparate și agregate auxiliare și de forță

Rata mare a defectelor apărute în exploatare este dată și de fiabilitatea scăzută a componentelor și agregatelor folosite în instalațiile electrice atât de comandă, cât și de forță. Dintre acestea se vor aminti câteva în continuare.

Contactoarele de comandă. Datorită numărului mare de conectări sau deconectări, datorită vibrațiilor mari introduse de suspensie și neregularitățile căii de rulare, fiabilitatea acestor aparate este foarte scăzută, ducând la avarii și la scoaterea din circulație a vehiculelor cu perturbări mari ale traficului. Din acest motiv, acestea vor trebui înlocuite cu contactoare rezistente la vibrații și cu un număr foarte mare de conectări garantate (cca. 10^7 conectări).

Contactoarele de forță. Și aici numărul de anclanșări este foarte mare. Fiabilitatea redusă se datorează în primul rând neajunsurilor industriei electrotehnice românești pe orizontală, prin folosirea unor materiale electroizolante care nu rezistă la vârfurile de tensiuni care apar în exploatare.

Dimensiunile în gabarit și greutate ale acestora sunt foarte mari, iar funcționarea defectuoasă a dus deseori la apariția incendiilor. Înlocuirea acestor contactoare de tip MTU sau EJC cu altele din fabricația unor firme cu renume, va duce la creșterea substanțială a fiabilității, reducerea greutății și a volumului și implicit la creșterea fiabilității altor agregate pe care le deserveșc. Numărul mare de conectări garantate de furnizor și folosirea contactelor speciale (la deconectare) pentru bobina de suflaj, asigură o funcționare de durată și o întreținere ușoară.

Convertorul static pentru serviciile auxiliare [5]. Folosirea convertizorului rotativ (pentru încărcarea bateriilor de acumulare și alimentarea serviciilor auxiliare), conectat direct de la rețeaua de 750 Vcc, creează multe neajunsuri la funcționarea lui în exploatare.

Înlocuirea lui cu un convertor static va simplifica foarte mult instalația electrică a metroului. Alimentat direct de la tensiunea rețelei de 750 Vcc, convertorul static produce tensiunea de 3×380 Vca, necesară funcționării motoarelor de curent alternativ trifazat care antrenează ventilatoarele de răcire a reostatelor de demaraj-frânare și lămpile de iluminat din salonul de pasageri. În această variantă se poate trece la înlocuirea consumatorilor alimentați direct din rețea, cu alții a căror funcționare să se facă la tensiunea de 3×380 Vca. Unul dintre consumatorii alimentați direct la tensiunea de 750 Vcc este și compresorul pentru prepararea aerului comprimat necesar funcționării instalației pneumatice a vehiculului.

Acesta poate fi înlocuit și cu un compresor rotativ la care fiabilitatea este mult ridicată față de cel cu pistoane. Având la dispoziție o sursă de tensiune de 3 x 380 Vca, aceasta poate alimenta și instalația de climatizare respectiv de încălzire din cabinele de conducere.

Încărcarea bateriilor de acumulate în acest caz face prin redresarea tensiunii alternative și printr-un transformator corespunzător, dând posibilitatea controlului în orice moment a curentului de încărcare. Buna funcționare a convertorului static va fi transmis prin semnale logice spre microprocesor, indicând astfel:

- existența tuturor fazelor;
- valoarea critică a curentului de încărcare a bateriilor de acumulate;
- depășirea curentului critic pe faze;
- starea anclanșată a protecțiilor tuturor mașinilor electrice alimentate la 3 x 380 Vca;
- depășirea temperaturii critice pentru unele agregate alimentate din convertorul static (temperatura compresorului, a rezistențelor de încălzire, etc.).

Conductoarele electrice de legătură. Acestea se împart în două mari categorii:

- conductoare pentru alimentarea circuitelor de joasă tensiune;
- conductoare pentru alimentarea agregatelor din schema electrică de forță (înaltă tensiune).

Din prima categorie, fac parte conductoare a căror secțiune este foarte variată, având următoarele valori în [mm²]: 1; 1,5; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 35; 50; 70, totalizând o lungime de 25.000 m pentru o unitate de metrou [112]. Aceste conductoare nu sunt pretențioase și pot rămâne de fabricație indigenă (CFY-LE).

Conductoarele folosite la alimentarea agregatelor de forță pe lângă faptul că trebuie să reziste la tensiuni de până la 3 KV, ele mai trebuie să îndeplinească și alte condiții cum ar fi:

- rezistență mare la foc;
- să nu ardă în lipsa flăcării;
- să nu degajă fum pentru anumite limite;
- să nu degajă fum toxic;
- să fie foarte flexibile.

O parte din aceste condiții nu sunt îndeplinite, de aceea conductoarele vor trebui înlocuite cu altele de la furnizori străini (care să îndeplinească condițiile de mai sus), avându-se în vedere și faptul că prețul de cost nu-l depășește pe cel din fabricația românească. Ele sunt folosite la metrou cu următoarele secțiuni în mm²: 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 35; 50; 70; 90. Lungimea totală a acestora se ridică la 1.000 m numai la ultimele trei secțiuni [112].

Conexiunile conductoarelor la aparate se realizează prin îmbinare demontabilă cu papuci sertizați și șuruburi de fixare. Numărul acestora este foarte mare ajungându-se la cifra de 24.000 de papuci [112]. Fiecare conexiune în plus înseamnă o rezistență de contact suplimentară introdusă în circuit.

Din acest motiv este absolut necesar raționalizarea traseelor și legăturilor electrice, astfel încât să se poată elimina o cantitate cât mai mare de conductoare și de papuci, mai ales pentru faptul că o analiză amănunțită creează posibilitatea reducerii până la 30 % atât a conductoarelor, cât și a papucilor de legătură.

În prezent, legăturile în instalația de joasă tensiune sunt realizate cu șuruburi fixate pe șiruri de cleme. Acestea pot fi înlocuite cu șiruri de cleme speciale construite fără șurub de strângere, fixarea făcându-se prin lamele elastice, asigurând un contact electric bun, precum și o montare respectiv o demontare foarte ușoară.

b). Realizarea schemelor în varianta execuției tehnologice

Încă din proiectare, schemele electrice pot fi realizate astfel încât ele să ușureze munca tehnologului, dar și a executantului [6]. Aceste scheme se vor reprezenta în așa fel, încât să redea fidel legăturile electrice așa cum ele sunt executate. De felul cum sunt realizate aceste scheme, depinde în foarte mare măsură corectitudinea executării pe fluxul de fabricație, ușurința realizării probelor, a întreținerii, a exploatării și reparațiilor în caz de defect.

Realizarea principială a schemelor este foarte simplă, ușor de înțeles, dar nu poate sta la baza elaborării documentației de execuție.

Dacă schemele însă sunt realizate în forma finală a execuției tehnologice, ele necesită un timp mai îndelungat de elaborare și proiectare, dar este mult mai ușor de urmărit procesul tehnologic de execuție, de control, de probe și de depanare a eventualelor defecte apărute în exploatare.

Nu în ultimul rând într-o astfel de reprezentare se poate urmări ușor și calcula în același timp secțiunea conductoarelor, realizarea legăturilor galvanice într-o anumită ordine preferențială (adică funcțională), dar și dimensionarea legăturilor (șuruburi, papuci) și eventual eliminarea unor legături suplimentare.

Legăturile suplimentare sunt dăunătoare atât prin creșterea numărului componentelor de legătură, cât și prin posibilitatea apariției încălzirilor locale și creșterea rezistențelor de contact pe de o parte, dar și prin creșterea numărului de defecte pe de altă parte.

În acest fel, proiectantul are posibilitatea realizării legăturilor (conexiunilor) respectând forma funcțională a schemei încă din faza de proiect tehnic, eliminând foarte multe greșeli și neconcordanțe care pot

să apară pe parcurs, dar și folosirea unui consum rațional de conductoare electrice și papuci de legătură.

c). Proiectarea schemelor de comandă cu fiabilitate ridicată [8]

Numărul mare de defecte și de incendii apărute la metrou s-a datorat în mare parte fiabilității scăzute a componentelor electrice și electropneumatice folosite (din fabricația indigenă), dar și datorită proiectării unor scheme a căror principiu de funcționare nu a fost întotdeauna bine cunoscut sau nu s-a ținut seama de toți factorii care intervin în exploatare. Nu în ultimul rând datorită lipsei de accesibilitate la majoritate componentelor, acestea nu au putut fi verificate în cadrul procesului de revizie, ele funcționând fără nici o verificare periodică până la apariția unui defect care de obicei necesita înlocuirea lor. În acest fel, cheltuielile de întreținere erau foarte mari.

Din motivele enumerate mai sus, schemele electrice trebuie să fie proiectate astfel încât să apară cât mai puține defecte [8], dar să respecte și toate condițiile impuse. La proiectarea schemelor trebuie să se țină seama de elementele de protecție necesare, pentru a proteja toate componentele, concomitent cu semnalizarea acestora.

La proiectarea amenajărilor trebuie avut în vedere ca accesibilitatea la toate aparatele să fie bună, putând astfel din timp lua măsuri atunci când unele componente dau semne de oboseală.

Este bine de știut faptul că funcționarea cu trei unități de metrou cuplate, cu o conducere unitară dintr-un singur post de conducere complică foarte mult schemele de comandă și duce de multe ori la funcționarea cu 3 sau 4 siguranțe automate conectate în paralel.

Dacă se ține seama și de faptul că schemele electrice de comandă sunt numeroase și foarte complicate (vezi subcapitolul 2.4 și figura 2.6), ele trebuie să fie proiectate astfel încât să poată fi ușor urmărite, atât în procesul de fabricație cât și în timpul exploatării și întreținerii.

Reprezentarea lor trebuie să se facă foarte simplu, să poată fi ușor înțelese și urmărite, dar mai ales să fie grupată după anumite criterii, și cu cât mai puține trimiteri dintr-o schemă în alta (excepție făcând contactele auxiliare față de cele principale ale unor contactoare).

4.3. Criterii de alegere a soluției optime

În capitolul precedent, am prezentat stadiul actual al sistemelor de acționare electrică utilizate la metrou în lume. Au rezultat atunci cele 3 mari sisteme mai semnificative aplicate în toată lumea, și anume:

- acționarea cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei reostatic
- acționarea cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei cu VTC;

- acționarea cu mașina de curent alternativ trifazat asincronă și reglarea vitezei cu invertor static de frecvență.

Fiecare sistem în parte are o serie de avantaje și dezavantaje.

În prezent în București liniile de alimentare cu energie electrică la metrou sunt la tensiunea de 750 Vcc, iar circulația se face în tunel, cu excepția unei stații și a unui depou de reparații care se află la suprafață. Problema reglării vitezei se rezumă la eliminarea curentului foarte mare la pornire și obținerea unor caracteristici artificiale de turație $n(I)$, care să evite solicitările foarte mari electrice, termice, mecanice și pentru menținerea unui curent la motorul de tracțiune cât mai constant, astfel încât să se evite depășirea forței de aderență.

Numărul ramelor de metrou construite în prezent este de 252, cu un sistem de acționare prezentat în primul aliniat al clasificării de mai sus. De aici rezultă faptul că orice extindere a stațiilor care ar putea să mai apară va fi făcută tot cu aceleași tipuri de substații. Deci nu se pune problema, cel puțin în viitorul apropiat, de înlocuire a sistemului de alimentare cu energie electrică.

Acționarea în continuare în curent continuu cu motorul de curent continuu și reglare rezistivă, dar cu modificarea configurației căii, ar fi posibilă, chiar ar simplifica aparatura de reglare, prin faptul că demarajul s-ar face la coborârea pantei, iar frânarea la urcarea rampei. În această situație, stațiile de călători ar trebui construite în vârful rampei, iar stațiile de pompare ale apei subterane, la poalele rampei. În momentul de față însă acest lucru nu mai este posibil pentru liniile deja construite.

Acționarea în curent alternativ cu motorul asincron trifazat este posibilă și ar aduce mari avantaje create de simplitatea acestei mașini electrice, de dimensiunea redusă și de prețul ei de cost scăzut. Marele dezavantaj al acestei soluții aplicată în momentul de față îl constituie:

- electronica de comandă foarte sofisticată;
- complexitatea întreținerii în exploatare, necesitând atât aparatură complicată pentru depanare și întreținere, cât și mulți specialiști cu pregătire diversificată;
- prețul de cost mai ridicat;
- foarte multe modificări constructive la caroserie.

Soluția propusă de autor în continuare pentru execuția imediată este de acționare cu mașina de curent continuu cu excitație serie și reglarea vitezei cu VTC, sistem folosit de multe țări din lume pe de o parte, și pe de altă parte pentru faptul că acestea sunt condițiile date din România, cu linia de alimentare la 750 Vcc și cu actualele vehicule construite care nu pot fi scoase din circulație și înlocuite definitiv. Noutatea actuală constă în faptul că acest tip de acționare și de reglare a vitezei se aplică la un produs de anvergură și perspectivă cum este METROUL, soluție neexistentă încă la noi în țară.

Așa cum am prezentat anterior, alături de soluția propriu-zisă de acționare mai există și alte posibilități de perfecționare, cum sunt:

-**Modernizarea** motorului electric de tracțiune prin reducerea gabaritului, reducerea greutateii, construirea într-o clasă de izolație superioară H sau C, îmbunătățirea comutației și eventual răcirea forțată.

-**Simplificarea** cablajului de forță, odată cu reducerea consumului de conductoare de secțiune mare printr-o proiectare care să permită amplasarea agregatelor de forță într-o manieră economică și simplă cu un traseu minim a conductoarelor de legătură. Legăturile să fie realizate într-o variantă reprezentând regula funcțională.

-**Perfecționarea blocului automat** de comandă a reglării vitezei prin folosirea automatului programabil cu microprocesor, construit într-o tehnologie modernă. El are marele avantaj de a putea funcționa pe baza unui program bine stabilit anterior, având totodată o flexibilitate foarte mare, timp de răspuns foarte mic și nu în ultimul rând posibilitatea automatizării afișării unor coduri de erori pentru depistarea defectelor, precum și conectarea la interfața sa a unui calculator pentru diagnosticare. Automatul programabil cu microprocesor permite comanda aprinderii și stingerii tiristoarelor prin fibră optică.

-**Perfecționarea celorlalte instalații electrice** auxiliare și de comandă prin înlocuirea unor componente cu altele foarte fiabile (contactoare, rele), prin folosirea convertorului static pentru serviciile auxiliare, prin înlocuirea conductoarelor de forță, realizarea schemelor în varianta execuției tehnologice și proiectarea schemelor electrice cu fiabilitate ridicată, supravegheate și acestea de automatul programabil cu microprocesor.

Aceste posibilități de perfecționare au rezultat ca urmare a implicării autorului în modificarea schemei de acționare electrică existentă în prezent, activitate desfășurată pe o perioadă de 15 ani.

Pe durata fabricării celor 250 de unități de metrou și a reparațiilor capitale, autorul și-a adus aportul făcând completări la actualul sistem de acționare, prin simplificarea schemelor electrice ale circuitelor de comandă și de forță, printr-o reamenajare a amplasării aparaturii de comandă și a agregatelor de forță în vederea creșterii accesibilității la toate componentele, prin separarea componentelor de comandă de cele de forță și amplasarea lor în spații tehnice corespunzătoare.

Reamenajarea aparaturii de comandă și a agregatelor de forță, modificarea și simplificarea schemelor electrice, precum și înlocuirea unor agregate (realizate de către autor), au dus la reducerea consumului de cupru din conductoarele de legătură (cu aproximativ 30%), dar și la reducerea tarei vagonului cu aproximativ 2 tone.

Autorul a mai realizat și reprezentarea schemelor electrice într-o variantă de execuție tehnologică, ușurând astfel foarte mult procesul de fabricație și întreținere, dar mai ales de depistare a defectelor apărute în timpul probelor de fabricație, probelor de control și de recepție și a exploatării vehiculelor în circulație. Această nouă reprezentare a schemelor permite înțelegerea mai ușoară a principiilor de funcționare, de către personalul de execuție, de întreținere și de exploatare.

4.4. Concluzii

Acest capitol are rolul să prezinte una dintre soluțiile de acționare reglabilă de concepție nouă care se poate aplica și la metroul de la noi.

La început, sunt prezentate câteva din deficiențele actualei soluții mai ales cele legate de prezența motorului electric de tracțiune de curent continuu. Datorită reglării reostatice, consumul energetic este foarte mare, iar reostatul de demaraj necesită conductoare de legătură de secțiuni și lungimi mari, precum și agregate suplimentare pentru disiparea căldurii și pentru răcire.

Reglarea în trepte dă naștere la șocuri electrice și mecanice care vor duce la creșterea temperaturii motorului de tracțiune.

Frânarea electrică recuperativă nu este posibilă, ea făcându-se numai reostatic.

Alături de aceste dezavantaje, se mai adaugă și apariția unor defecte în masă, datorate fiabilității scăzute a componentelor schemei electrice de acționare. Aceste defecte au fost stabilite de către autor pe parcursul fabricării celor 250 de rame de metrou, a probelor, a punerilor în circulație și pe perioada exploatării.

Din acest capitol, se desprind care sunt posibilitățile de perfecționare ale sistemului de acționare la metrou. Aceste sunt date în continuare.

Înlocuirea MT de curent continuu cu motorul electric asincron. Gravele și multiplele probleme pe care le ridică motorul de tracțiune ar putea fi rezolvate dacă acesta se înlocuiește cu motorul asincron trifazat cu rotorul în scurtcircuit. În această situație, se impune înlocuirea întregului sistem de acționare și folosirea invertorului de frecvență având astfel loc numeroase modificări constructive.

Modernizarea motorului de tracțiune. Este cert că în continuare motorul actual nu mai poate fi folosit, fiind necesar construirea unui motor îmbunătățit, cu gabarit redus și greutate redusă, cu materiale electroizolante în clasa de izolație H sau C și cu răcire forțată.

Simplificarea cablajului de forță și reducerea lui. Aceasta se poate rezolva printr-o reproiectare și o raționalizare a traseelor, dar reducerea cea mai substanțială se poate obține dacă se elimină reostatul de demaraj și frânare. Eliminarea acestui reostat se poate face prin folosirea acționării cu VTC.

Schimbarea principiului de acționare. Înlocuirea actualului sistem este absolut obligatorie. Cele două mari sisteme reprezentative ar putea să înlocuiască actualul sistem. Sistemul de acționare cu motorul de curent alternativ trifazat asincron și reglarea cu invertor de frecvență ar aduce o serie de avantaje, dar și dezavantaje. Aceste dezavantaje sunt legate de modificările mari constructive și de prețul de cost ridicat. Acționare cu motorul de curent continuu și reglare cu VTC ar fi cel mai adecvat sistem la ora actuală în special pentru variatorul de tensiune continuă cu tiristoare GTO. Folosind acest sistem apar o serie de avantaje după cum urmează: instalația de forță este foarte simplă, consumul de energie este redus, nu necesită reostat de demaraj, permite frânarea recuperativă, reglarea vitezei se face continuu, iar comanda conducerii și reglării vitezei o poate face automatul programabil cu microprocesor. Acest sistem de acționare electrică este folosit de multe firme producătoare din lume : TOSHIBA, GEC-ALSTHOM, ABB și altele.

Perfecționarea blocului automat de comandă este necesar pentru că actualul sistem de comandă și reglare este foarte complicat și nefiabil. Folosirea automatului programabil cu microprocesor pentru automatizarea conducerii și reglării vitezei este cel mai modern mijloc la ora actuală. El permite introducerea fibrei optice pentru comanda tiristoarelor, și folosirea calculatorului pentru diagnosticarea întregii instalații a vehiculului. În acest fel, reglarea tensiunii se face în mod continuu, iar curentul poate fi menținut riguros constant. Aprinderea tiristorului după realizarea schemei de tracțiune (frânare) duce la protejarea contactoarelor de schemă care nu mai rup curentul la conectare. Stingerea tiristorului înaintea deschiderii schemei de tracțiune (frânare), permit contactoarelor de schemă să nu rupă curent la deconectare.

Perfecționarea instalațiilor auxiliare și folosirea unor componente fiabile. Acest subcapitol se referă la celelalte instalații auxiliare care ajută la buna funcționare a sistemului de acționare respectiv. Numai înlocuirea sistemului de acționare sau a motorului de tracțiune nu rezolvă problemele cu care se confruntă exploatarea metroului la ora actuală, fiind necesare o serie de alte modificări și înlocuiri de componente după cum urmează:

- înlocuirea releelor și contactoarelor de comandă cu altele cu un număr ridicat de conectări garantate;
- înlocuirea contactoarelor de forță (de construcție românească), cu altele mai fiabile;
- introducerea convertorului static pentru serviciile auxiliare în locul convertizorului rotativ;
- alimentarea celorlalți consumatori la tensiunea de 3x380 Vca;
- înlocuirea conductoarelor de forță cu altele cu rezistență mare la foc, care să nu degajă fum toxic și să fie foarte flexibile;

- raționalizarea și refacerea schemelor electrice în forma execuției tehnologice;
- proiectarea schemelor de comandă cu fiabilitate ridicată și care să elimine alimentările în paralel, în cazul funcționării cu unități cuplate;

La sfârșitul capitolului, se desprinde concluzia că cel puțin în viitorul apropiat, tensiunea de alimentare a liniei de contact va rămâne aceeași, pentru metroul din București. De asemenea, este absolut necesar înlocuirea actualului sistem.

Modificarea configurației căii de rulare cu un traseu în pantă la demaraj și în rampă la frânare nu mai este posibilă.

Acționarea cu mașina de curent alternativ trifazat și reglarea viteze cu invertor ar fi posibilă, dar ar mări prețul de cost și ar crește volumul modificărilor constructive.

De aceea soluția imediată, propusă de autor este acționarea cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei cu VTC, la care modificările constructive ale caroseriei sunt minime și poate fi aplicată cu prilejul reparațiilor capitale. Această soluție (ca și celelalte de altfel) trebuie însoțită însă și de celelalte modificări propuse de autor anterior, referitoare la: modernizarea motoarelor de tracțiune, simplificarea cablajului de forță și comandă, folosirea microprocesorului și perfecționarea celorlalte instalații electrice auxiliare și de comandă.

Aceste modificări au rezultat ca urmare a studiului și implicării autorului în construcția metroului existent. Astfel în timpul fabricării celor 250 rame de metrou, autorul a făcut foarte multe completări la actualul sistem de acționare, a simplificat schemele electrice ale circuitelor de comandă și forță, a reamplasat aparatura de comandă și agregatele de forță (separându-le în același timp) în vederea creșterii accesibilității la toate componentele.

Pentru ușurarea procesului de fabricație, întreținere, reparație și depistare a defectelor apărute în timpul probelor de control și recepție, autorul a realizat reprezentarea schemelor electrice într-o variantă a execuției tehnologice.

Modificările realizate de autor au dus la reducerea consumului de conductoare din cupru cu aproximativ 30 %, și a tarei cu 2 tone.

Capitolul 5

Schema electrică de acționare propusă folosind variatorul de tensiune continuă

5.1. Descrierea schemei electrice principale de acționare

5.1.1. Varianta schemei principale alese

În continuare, autorul va prezenta varianta proprie a schemei de acționare, care va sta la baza proiectării schemelor electrice de comandă, a proiectului de execuție pentru prototip, completat cu tehnologia de execuție și cu desenele de amenajare detaliată a vehiculului.

Aceste soluții se pot implementa pe o ramă de metrou din fabricația de serie la care construcția caroseriei să rămână aceeași, modificările urmând să se facă la amenajarea aparaturii sub șasiu și în panourile de comandă din spațiul tehnic.

Modificările pot fi făcute cu prilejul reparațiilor capitale, programate eşalonat pentru toate unitățile de metrou construite până în prezent.

Acționarea propusă folosește motorul de curent continuu modernizat și variatorul de curent continuu pentru reglarea vitezei.

Contactoarele de schemă (care nu intervin în procesul de reglare a vitezei) vor fi înlocuite cu altele de la o firmă producătoare renumită și cu o fiabilitate crescută.

Conductoarele folosite în instalația de forță trebuie asigurate din import, alături de componentele electronice de putere din VTC. Construcția VTC-ului se poate realiza în România cu tiristoare GTO, iar comanda aprinderii și stingerii tiristorului din circuitul regimului de tracțiune se va face cu fibră optică.

Alte componente ale instalației de forță cum sunt inductivitățile filtrului, asamblarea condensatorului filtru rețea, sursa statică de preexcitare, întrerupătorul automat ultrarapid, precum și convertorul static pentru serviciile auxiliare, pot fi fabricate în țară.

În soluția acționării cu un motor de tracțiune pentru fiecare boghiu, rama de metrou va avea 4 motoare și 4 VTC-uri.

Una din variantele posibile ale schemei electrice principale, pe care autorul a folosit-o în actuala lucrare, este o schema cunoscută și a fost prezentată în figura 3.1.

5.1.2. Folosirea tiristorului GTO

Odată cu apariția semiconductoarelor de putere, diode, tranzistoare de putere sau tiristoare, s-a produs al doilea impact în utilizarea energiei electrice și anume în acționări electrice, redresoare, invertoare și convertoare statice. Acest impact a fost puternic [75], asigurând astfel o dezvoltare fără precedent în utilizarea energiei electrice în toate domeniile și sub diferite forme.

Realizarea tiristorului de putere implică tehnologii de vârf, dar utilizarea în diferite domenii necesită doar un minim de cunoștințe pentru corecta lui folosire. Aceste cunoștințe sunt necesare pentru că tiristoarele sunt foarte sensibile la supratensiuni și supracurenți, chiar și de scurtă durată. O alegere corectă a tiristoarelor și a echipamentelor de protecție poate duce la o viață de exploatare (a echipamentelor cu tiristoare), de peste 20 de ani.

Pentru asigurarea acestor performanțe la echipamentele cu tiristoare, este necesar nu numai cunoașterea din catalog a valorilor caracteristice ale acestor dispozitive electronice, dar și rațiunea care a stat la baza alegerii acestora.

Folosirea tiristorului GTO la fabricarea VTC-ului simplifică foarte mult construcția acestuia, prin eliminarea altor tiristoare de încărcare și stingere, precum și a condensatoarelor de stingere și a electronicii de comandă respectivă.

Tiristorul cu stingere pe poartă GTO este un tiristor rapid de putere mare, făcând parte din semiconductoarele de putere comandate, [75] care au cunoscut o dezvoltare impresionantă.

Astfel de la tiristoarele care nu depășeau tensiuni de blocare de câteva sute de volți și curenți de ordinul zecilor de amperi, s-a ajuns la realizări unde tensiunea de blocare este de 2500V - 4500V, iar curentul maxim controlat este de 2000 A - 3000 A.

La tiristoarele GTO de construcție modernă, se urmărește reducerea timpului de intrare în conducție în scopul reducerii pierderilor la aprindere și pentru a nu ajunge la temperaturi ridicate în joncțiune, recurgând la creșterea amplitudinii impulsurilor de curent aplicate pe poarta tiristorului GTO.

Foarte multe aprecieri, care se pot face la tiristoarele obișnuite, sunt valabile și la tiristoarele GTO. Curentul pe poartă necesar stingerii depinde de valoarea curentului de sarcină prin tiristor.

Folosirea fibrelor optice pentru comanda aprinderii și stingerii tiristoarelor constituie un foarte mare avantaj eliminând astfel distorsiunile și paraziții care ar putea să apară în funcționare prin mărirea distanței dintre tiristor și instalația de comandă (folosind automatul programabil cu microprocesor).

5.2. Comportarea motorului de curent continuu la alimentarea prin VTC

5.2.1. Regimul pulsator de alimentare al motorului de curent continuu

Având mărimile periodice ne-sinusoidale, care satisfac condițiile lui Dirichlet, când curentul prin motor (fig.5.1) este pulsatoriu periodic, acesta poate fi reprezentat printr-o serie trigonometrică sau serie Fourier, conform următoarei relații [74]:

$$i(t) = A_0 + \sum (M_k \cos k\omega t + N_k \sin k\omega t), \quad (5.1)$$

în care A_0 ; M_k și N_k sunt coeficienții seriei Fourier, iar ω este pulsația fundamentală. Valorile coeficienților seriei Fourier sunt date de relațiile [74]:

$$A_0 = \frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} i(t) dt ; \quad (5.2)$$

$$M_k = \frac{2}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} i(t) \cos k\omega t dt ; \quad (5.3)$$

$$N_k = \frac{2}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} i(t) \sin k\omega t dt . \quad (5.4)$$

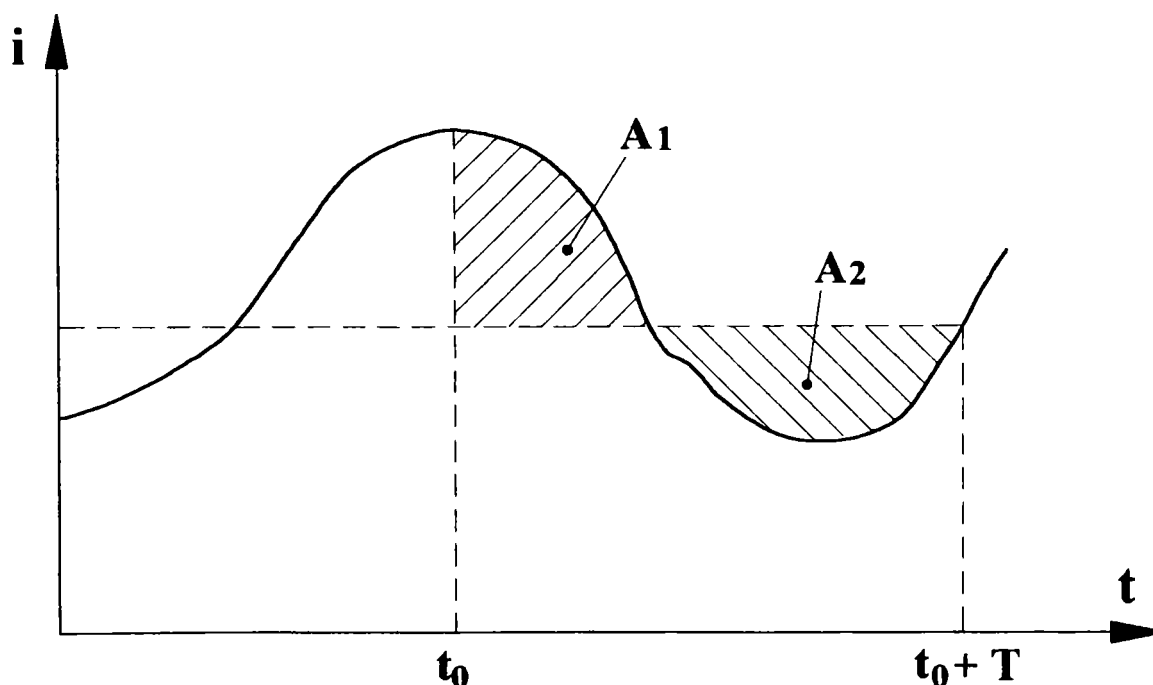


Fig. 5.1. Variația curentului prin motor

Reunind termenii de același argument, o mărime periodică mai poate fi pusă sub forma [74]:

$$i(t) = A_0 + A_{1_m} \sin(\omega t + \varphi_1) + A_{2_m} \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots \\ \dots + A_{k_m} \sin(k\omega t + \varphi_k); \quad (5.5)$$

$$A_{km} = \sqrt{M_k^2 + N_k^2}; \quad (5.6)$$

$$\varphi_k = \operatorname{arctg} \frac{M_k}{N_k}. \quad (5.7)$$

La alimentarea cu VTC, are importanță în primul rând mărimea A_0 , care reprezintă valoarea medie a curentului, armonica întâi fiind perturbatoare la fel ca și cele superioare.

În conformitate cu figura 5.1, se constată că forma triunghiulară a curentului pulsator se suprapune peste componenta continuă a curentului.

5.2.2. Solicitări suplimentare ale motorului la alimentarea cu VTC

Motorul de curent continuu alimentat prin VTC va suporta o serie de solicitări suplimentare de natură mecanică, termică și electrică. Aceste solicitări suplimentare sunt consecința a două proprietăți fundamentale, și anume:

- existența unei tensiuni sub formă de impulsuri de tensiune la bornele motorului, și deci un curent ondulat prin motor;
- rapiditatea mare de răspuns a sistemului, o viteză mare de variație a tensiunii de alimentare, adică a curentului prin motor.

O undulație de curent poate fi limitată de reactanța totală a circuitului și de inductanța suplimentară de netezire. În cazul motorului de curent continuu, din cauza armonicilor de curenți, apar pierderi în fier suplimentare, datorate fenomenului de histerezis și curenților Foucault.

Cu formula empirică dată de Steinmetz și cu unele valori stabilite experimental [74], se pot calcula pierderile suplimentare datorită curenților turbionari și de histerezis:

$$P_t = C_t f^2 B^2; \quad (5.8)$$

$$P_h = C_h f B^\alpha; \quad (5.9)$$

unde: C_t – constantă ce depinde de grosimea materialului;

C_h – constantă ce depinde de material;

f – frecvența armonicilor;

B – valoarea maximă a densității de flux;

α – exponent determinat experimental în funcție de B .

Suma celor două tipuri de pierderi va da relația:

$$P_s = P_t + P_h = \sigma_t \left(\frac{f}{100} \right)^2 B^2 + \sigma_h \left(\frac{f}{100} \right) B^\alpha, \quad (5.10)$$

unde coeficienții σ_t și σ_h se dau în funcție de material și descresc odată cu reducerea grosimii tablei. În acest fel, rezultă obligatoriu folosirea tablelor silicioase sub 1 mm, atât la fabricarea indusului, cât și a polilor de excitație și de comutație.

Mai există și pierderi suplimentare în cupru, date de relația:

$$P_{cu} = RI^2. \quad (5.11)$$

Așa cum se știe [74], în cazul trecerii unui curent continuu printr-o înfășurare, aceasta are rezistența R_0 , și R_a dacă prin ea trece curent alternativ. Această modificare a rezistenței se datorează variației în timp a câmpului magnetic transversal al crestăturilor, care induce curenți turbionari în conductoarele masive, provocând apariția efectului pelicular. Acesta la rândul lui modifică densitatea locală a curentului electric pe suprafața secțiunii conductorului.

Raportul $K_a = R_a/R_0$ se numește factor de mărire a rezistenței electrice în curent alternativ. Pentru un conductor, care are o înălțime optimă, $K_a = 1,33$.

Solicitările suplimentare sunt reduse dacă motorul de tracțiune este realizat din tole și cu conductoare de înălțime optimă.

Din cauza ondulației de curent, apare o pulsație a tuturor fluxurilor din mașina electrică care o solicită mecanic suplimentar introducând vibrații generale.

Valorile mari di/dt pot da momente mari, care solicită suplimentar rotorul.

Datorită alimentării cu VTC, apar și solicitări mari electrice, cum sunt:

- apariția de tensiuni importante de natură capacitivă între rotor și scuturi;
- o degradare a comutației.

La motorul de curent continuu cu excitație serie alimentat în curent pulsatoriu, intervine și tensiunea electromotoare E_t de transformare, datorită pulsației fluxului din polii principali. În contradicție cu ce se întâmplă la motorul monofazat cu colector [74], tensiunea electromotoare de transformare are aici un efect favorabil asupra comutației.

Tensiunea electromotoare rezultantă poate lua o valoare minimă, dacă se leagă în paralel cu polii principali de excitație un șunt, prin care se închide o fracțiune importantă din armonicile de curent.

5.3. Calculul și determinarea parametrilor componentelor principale

5.3.1. Calculul puterii motorului de tracțiune și a vitezei comerciale

În cazul vehiculelor cu frecvență mare a ciclurilor de mers, trenuri suburbane, urbane, metrouri, tramvaie, troleibuze, unde demarările și frânările sunt dese cu accelerații și decelerații mari, criteriul de bază pentru alegerea optimă a mașinilor electrice de tracțiune este încălzirea și răcirea, verificându-se apoi la suprasarcină și pornire, motiv pentru care puterea se determină mai exact din aceste condiții. Relațiile se vor stabili în condițiile unui mers economic între 2 stații. Variația vitezei în timp pentru un demaraj, mers lansat, frânare și staționare arată principal ca în figura 5.2. .

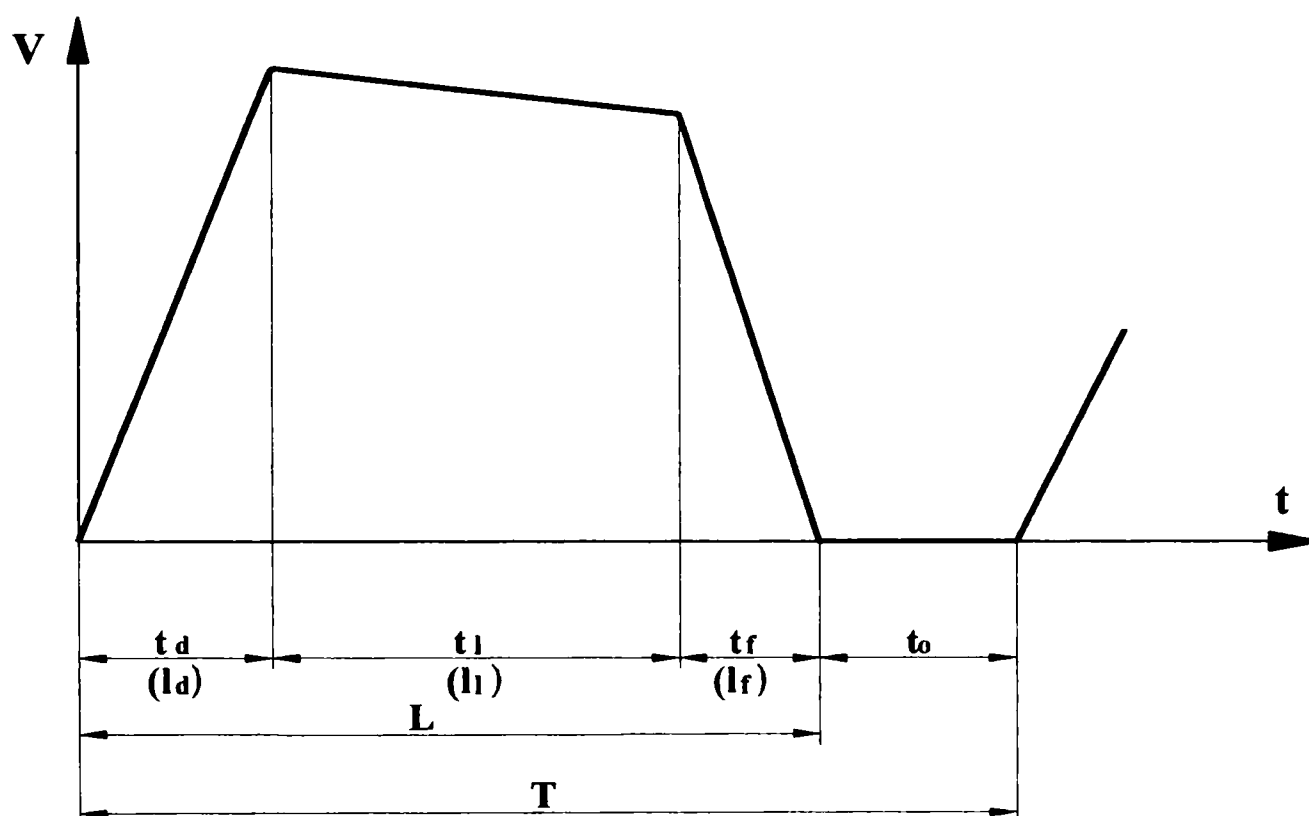


Figura 5.2. Variația vitezei în timp

În figura 5.2 s-au făcut notațiile:

- t_d – timpul de demaraj;
- t_l – timpul de mers lansat;
- t_f – timpul de frânare;
- t_o – timpul de staționare (oprire);
- l_d – spațiul parcurs la demaraj;
- l_l – spațiul parcurs la mers lansat;
- l_f – spațiul parcurs la frânare;
- T – perioada ciclului;
- L – spațiul total parcurs între două stații.

După cum se poate constata din diagramă:

$$T = t_d + t_l + t_f + t_o, \quad (5.12)$$

$$L = l_d + l_l + l_f. \quad (5.13)$$

Motoarele de tracțiune funcționând în general la demaraj și frânare (adică la curenți mari de sarcină), se pot neglija pierderile mecanice și în fier.

Se poate echivala energia pierdută în timpul demarajului și frânării cu energia pierdută, dacă motorul de tracțiune ar fi solicitat continuu la curent de durată [53].

În acest caz scriind ecuația de egalitate între cele 3 energii, rezultă:

$$Q_d + Q_f = Q_\infty, \text{ sau} \quad (5.14)$$

$$RI_d^2 t_d + RI_f^2 t_f = RI_\infty^2 T, \quad (5.15)$$

unde: I_d – curentul de demaraj;

I_f – curentul de frânare;

I_∞ – curentul de durată;

R – rezistența motorului de tracțiune.

Dacă se consideră timpii de frânare și de demaraj egali, la fel și curenții corespunzători egali, atunci relația (5.15) se mai poate scrie:

$$RI_\infty^2 T = 2RI_d^2 t_d, \text{ sau}$$

$$\frac{I_\infty^2}{I_d^2} = 2 \frac{t_d}{T}. \quad (5.16)$$

Presupunând că pierderile sunt proporționale cu puterile, se poate scrie:

$$\frac{P_{v\infty}^2}{P_d^2} = \frac{(UI_\infty)^2}{(UI_d)^2} = \frac{I_\infty^2}{I_d^2}. \quad (5.17)$$

Prin înlocuirea relației (5.16) în (5.17) rezultă:

$$\frac{P_{v\infty}^2}{P_d^2} = 2 \frac{t_d}{T}, \quad (5.18)$$

iar puterea de durată a vehiculului va fi:

$$P_{v\infty} = P_d \sqrt{2 \frac{t_d}{T}}. \quad (5.19)$$

Puterea de demaraj P_d este determinată de energia cinetică înmagazinată în masa m a trenului, la viteza v_d obținută la sfârșitul procesului de demaraj după scurgerea timpului t_d a demarajului [52]:

$$P_d = \frac{mv_d^2}{2t_d}. \quad (5.20)$$

Deoarece: $t_d = \frac{v_d}{a_d}, \text{ și} \quad (5.21)$

$$T = \frac{L}{v_c}, \quad (5.22)$$

unde: a_d – accelerația de demaraj;

v_c – viteza comercială;

atunci prin înlocuirile corespunzătoare va rezulta:

$$P_{v\infty} = \frac{1}{\sqrt{2}} m v_d^2 \left(\frac{a_d v_c}{L} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (5.23)$$

Dacă se aproximează că viteza în timpul lansării este chiar viteza obținută la sfârșitul procesului de demaraj $v_d = ct$. (datorită distanței mici dintre stații și implicit a timpului mic de mers lansat, când viteza nu ajunge să scadă simțitor), atunci potrivit ecuației de mișcare cu $v = \text{constant}$, rezultă spațiul parcurs în perioada de demaraj ca fiind:

$$l_d = \frac{v_d^2}{2a_d}. \quad (5.24)$$

Spațiul parcurs în perioada de mers lansat este:

$$l_1 = L - 2l_d, \quad (5.25)$$

iar timpul corespunzător va fi:

$$t_1 = \frac{l_1}{v_d} = \frac{L - 2l_d}{v_d}. \quad (5.26)$$

Înlocuind pe (5.24) în (5.26) rezultă:

$$t_1 = \frac{L}{v_d} - \frac{v_d}{a_d}. \quad (5.27)$$

Viteza comercială se calculează cu relația:

$$v_c = \frac{L}{T}, \quad (5.28)$$

unde: $T = 2t_d + t_1 + t_0 = 2 \frac{v_d}{a_d} + \left(\frac{L}{v_d} - \frac{v_d}{a_d} \right) + t_0,$

$$v_c = \frac{L}{\frac{v_d}{a_d} + \frac{L}{v_d} + t_0} \quad (5.29)$$

Ținând seama de (5.23) se poate calcula puterea unui motor de tracțiune din puterea totală a vehiculului:

$$P_{\infty} = \frac{P_{v\infty}}{Z_m}, \quad (5.30)$$

unde Z_m este numărul motoarelor de tracțiune, iar P_{∞} va fi:

$$P_{\infty} = \frac{m}{\sqrt{2Z_m}} \sqrt{\frac{v_d^3 a_d}{\frac{v_d}{a_d} + \frac{L}{v_d} + t_0}} \quad [W]. \quad (5.31)$$

Datele cunoscute pentru o ramă de metrou, timpul de staționare și distanțele posibile dintre stații sunt:

1. $Z_m = 4$
2. $m = 111\ 000$ kg (cu încărcarea maximă)
3. $a_d = 1,2$ m/s²
4. $v_{max} = 80, 85, 90, 95, 100$ km/h
5. $t_0 = 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45$ s
6. $L = 650, 700, 800, 1000, 1250$ m

Dacă se calculează puterea necesară motorului de tracțiune cu relația (5.31), în funcție de valorile variabile pe care le-am admis anterior, se vor obține datele din tabelele următoare 5.1 ÷ 5.5.

$v_d = 80$ km/h - Tabelul 5.1.

238370	231996	226107	220644	215560	210810	206360
254789	247130	240048	233540	227534	221910	216800
270879	261633	253270	245664	238704	232300	226390
280097	270880	261633	253270	245665	238700	232424
285191	274356	264760	256106	249000	241072	234484

$v_d = 85$ km/h - Tabelul 5.2.

264190	257017	260112	243945	238214	232869	227866
281680	272950	264994	257692	250964	244737	238950
298642	288300	278972	270490	262738	255616	249045
308361	297020	286845	277650	269285	261633	254598
313578	301670	291030	281439	272736	264797	257510

$v_d = 90$ km/h - Tabelul 5.3.

290866	282746	275272	268359	261945	255965	250380
309450	299726	290866	282746	275272	268360	261958
327190	315759	305450	296086	287536	279684	272443
337287	324806	313614	303505	294315	285910	278190
342697	329630	317950	307430	297890	289186	281200

$v_d = 95$ km/h - Tabelul 5.4.

318157	309169	300866	293162	286053	279438	273262
337670	326935	317162	308262	299987	292383	285330
356228	343695	331530	322133	312774	304383	296264
366674	353040	340825	329795	319770	310609	302191
372254	358014	345294	333835	323254	313978	305126

345385	335486	326394	318000	310225	302993	296243
364515	354750	344047	334260	325264	316957	309255
385575	371945	359667	348530	338365	329042	320450
396527	381747	368507	356555	345696	335768	326565
402284	386876	373115	360724	349490	339244	329879

Din analiza tabelelor 5.1 ÷ 5.5, rezultă variația puterii în funcție de timpul de staționare, viteza maximă și distanța L dintre stații după cum urmează:

- prin creșterea timpului de staționare, puterea motorului de tracțiune scade;
- prin creșterea distanțelor dintre stații, puterea motorului de tracțiune scade;
- prin creșterea vitezei maxime atinse la sfârșitul demarajului, puterea motorului de tracțiune crește.

Din ecuația (5.31), rezultă că puterea crește și odată cu creșterea accelerației impuse.

Dacă se reface calculul puterii de durată a unui motor de tracțiune pentru o încărcare medie cu 5 călători/m², pentru care masa totală a vehiculului este m_1 , distanța medie dintre stații L_1 , accelerația a_{d1} , timpul de staționare t_{01} și viteza maximă la sfârșitul demarajului v_{max1} unde:

$$\begin{aligned} m_1 &= 98\,000 \text{ kg;} \\ L_1 &= 1250 \text{ m;} \\ a_{d1} &= 1,2 \text{ m/s}^2; \\ t_{01} &= 40 \text{ s;} \\ v_{max1} &= 80 \text{ km/h;} \end{aligned}$$

rezultă:

$$P_\infty = \frac{98000}{\sqrt{2} \cdot 4} \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{80}{3,6}\right)^3 \cdot 1,2}{\frac{80}{3,6 \cdot 1,2} + \frac{1250}{80} \cdot 36 + 40}};$$

$$P_\infty = 185573 \text{ W.}$$

Această valoare este identică cu puterea actuală a motorului de tracțiune ($P = 185 \text{ kW}$) în condiții nominale. Puterea unioară este de 215 kW, care permite funcționarea în aceleași condiții de viteză și accelerație, dar cu o sarcină mai mare timp de o oră.

Reprezentând grafic variația puterii în funcție de parametrii ecuației (5.31), cu valorile calculate din tablele 5.1÷5.5, rezultă diagramele din figura 5.3.

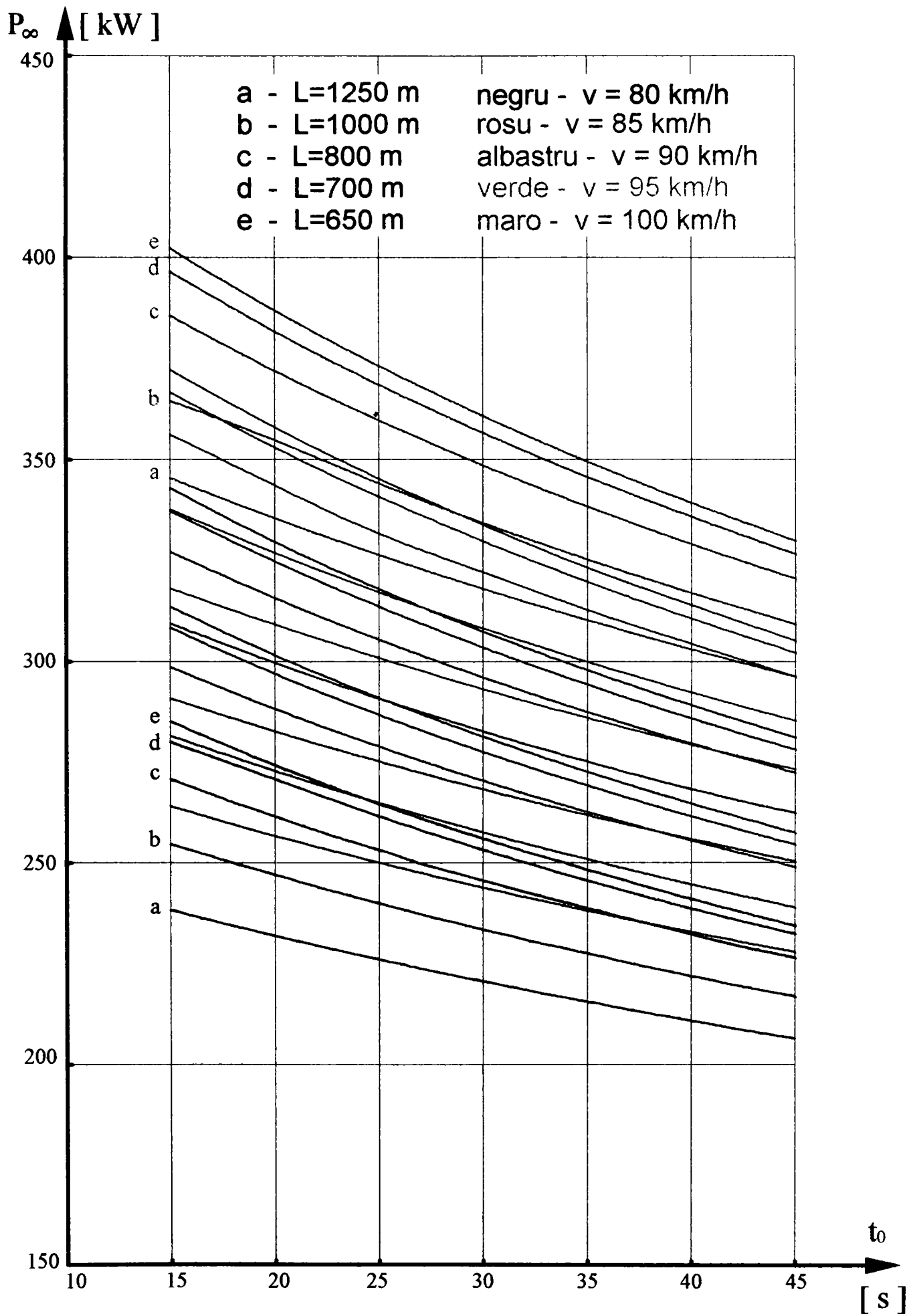


Fig.5.3. Diagramele parametriche de variatie ale puterii de durată a MT

Fiecare curbă de variație $P_{\infty}(t_0)$ corespunde unei distanțe dintre stații, iar o familie de aceeași culoare, corespunde unei viteze. În cadrul familiei având aceeași culoare diagramele superioare au distanța dintre stații mai mică, iar cele inferioare mai mare.

Culorile corespunzătoare vitezelor sunt trecute pe diagrama din figura 5.3.

Analizând diagramele din figura 5.3, se constată că la viteza de 100 km/h (comparativ cu celelalte viteze inferioare), scăderea puterii de durată a motorului de tracțiune odată cu creșterea timpului de staționare este mai mare:

- de la 402 kW la 330 kW (72 kW), pentru $L = 650$ m;
- de la 345 kW la 296 kW (40 kW), pentru $L = 1250$ m.

La viteza de 80 km/h, scăderea puterii de durată a motorului de tracțiune, odată cu creșterea timpului de staționare este:

- de la 285 kW la 234 kW (51 kW), pentru $L = 650$ m;
- de la 238 kW la 206 kW (32 kW), pentru $L = 650$ m.

Diferența de putere diferită în funcție de viteză, distanța dintre stații și timpul de staționare, poate fi constatată și direct pe diagrame prin unghiul de înclinare al acestora.

Aceste diagrame sunt utile pentru alegerea puterii motorului de tracțiune în condițiile date ale metroului din București.

Cu relația (5.29) determinată anterior:

$$v_c = \frac{L}{\frac{v_d}{a_d} + \frac{L}{v_d} + t_0},$$

se poate determina viteza comercială $v_c = f(t_0)$, luând ca parametrii distanța dintre stații și viteza la sfârșitul demarajului. Cu aceste valori L , v_d , a_d și t_0 enumerate anterior:

$$L = 1250, 1000, 800, 700, 650 \text{ m};$$

$$t_0 = 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 \text{ s};$$

$$a_d = 1,2 \text{ m/s}^2;$$

$$v_d = 80, 85, 90, 95, 100 \text{ km/h};$$

rezultă vitezele comerciale din tabelele 5.6÷5.10.

$v_d = 80 \text{ km/h}$ - Tabelul 5.6

49,3	46,8	44,3	42,1	40,3	38,5	37
45,8	42,1	40	37,8	36	34,2	32,4
40,3	37,8	35,6	33,5	31,7	30	28,4
37,8	35,5	32,7	31,3	29,1	27,3	25,9
36,3	33,8	31,3	29,5	27,7	26,28	24,8

$v_d = 85 \text{ km/h}$ - Tabelul 5.7

50,4	47,5	45,3	43,2	41	39,2	37,8
45,3	42,8	40,7	38,2	36,6	34,6	32,8
41,1	38,1	36	33,8	32	30,2	28,8
38,1	35,2	33,1	31,3	29,5	23,3	26,2
36,7	33,8	31,7	29,5	27,3	26,3	24,8

 $v_d = 90 \text{ km/h}$ - Tabelul 5.8

51,1	48,6	46	43,9	41,7	40	38,1
46,5	43,6	41	38,9	36,7	35	33,1
41,4	38,5	36	33,9	32	30,3	28,8
38,5	35,6	33,4	31,3	29,5	28	26,3
36,7	34,2	31,7	29,5	28	26,3	24,8

 $v_d = 95 \text{ km/h}$ - Tabelul 5.9

52,2	49,3	46,8	44,2	42,5	40,3	38,5
44,8	43,9	41,4	39,2	37	35,3	33,5
41,6	38,9	36,3	34,2	32,4	30,6	29,2
38,6	35,6	33,5	31,4	29,5	28,4	26,3
36,7	34,2	31,7	29,9	28	26,3	24,8

 $v_d = 100 \text{ km/h}$ - Tabelul 5.10

53	50	47,1	45	42,8	40,7	38,9
47,2	44,28	41,8	39,6	37,4	35,6	33,8
41,8	39,1	36,3	34,2	32,4	30,7	29,2
38,6	35,6	33,5	31,4	29,5	28,4	26,3
36,7	34,2	31,7	29,2	28,1	26,3	24,8

Analizând tabelele 5.6 ÷ 5.10, se poate constata modificarea vitezei comerciale în funcție de viteza de demaraj v_d , timpul de staționare t_0 și distanța dintre stații L .

Viteza comercială scade cu creșterea timpului de staționare, crește cu creșterea distanțelor dintre stații și crește cu creșterea vitezei.

Reprezentând grafic variația vitezei comerciale în funcție de parametrii ecuației (5.29), cu valorile calculate din tabelele 5.6...5.10, rezultă diagramele din figura 5.4.

Fiecare curbă de variație $v_c(t_0)$ corespunde unei distanțe dintre stații, iar o familie de aceeași culoare corespunde unei viteze.

Culorile corespunzătoare vitezelor sunt trecute în diagrama din figura 5.4.

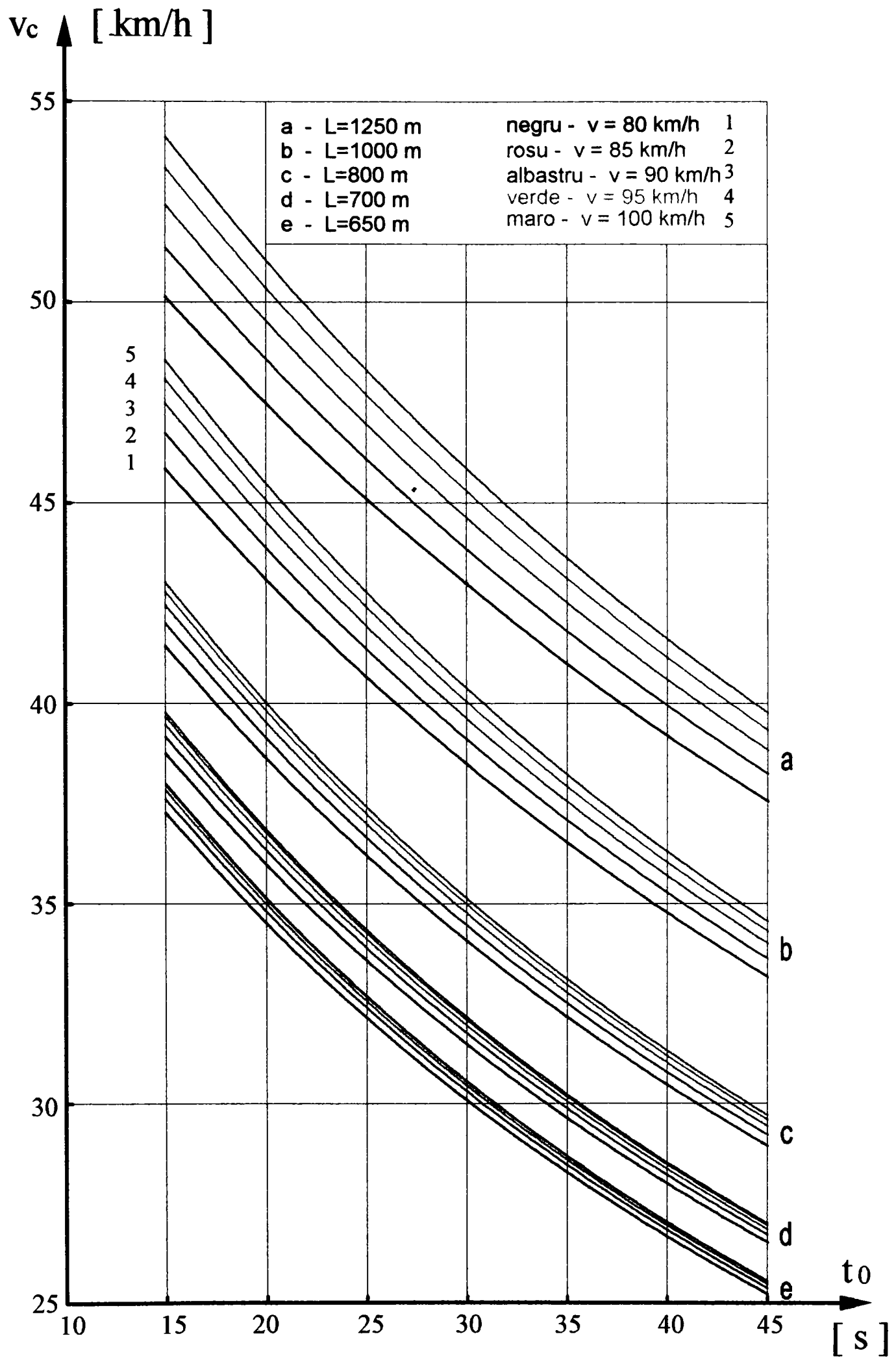


Fig.5.4. Diagramele parametrice de variatie ale vitezei comerciale

5.3.2. Calculul de dimensionare al filtrului de intrare

La folosirea VTC-ului în tracțiunea electrică, au apărut o serie de complicații dintre care cea mai importantă este rezonanța variatorului cu linia. Odată cu deplasarea vehiculului, frecvența de oscilație a liniei variază și în cazul în care este multiplu de cea a VTC-ului, apar supratensiuni la linie, care pot duce la distrugerea diodelor și tiristoarelor. Din acest motiv, prezența filtrului de la intrare este obligatorie pe aceste vehicule [74]

Condensatorul filtrului de rețea permite funcționarea VTC-ului cu impulsuri de curent, având astfel și rol de rezervor de energie. El reduce supratensiunile la bornele variatorului în limite acceptabile. Supratensiunile în linia de alimentare pot să apară la întreruperea bruscă a curentului de sarcină de către VTC-urile vecine, la intrarea în funcție a dispozitivelor electronice de protecție la supracurenți sau la întreruperea bruscă a curentului prin alte vehicule aflate sub tensiune pe aceeași stație de tracțiune.

Inductanța din circuitul de intrare reduce ondulațiile de curent în linia de alimentare la o amplitudine suficient de coborâtă pentru ca să nu perturbe alți consumatori. Aceasta este foarte importantă la metrou, unde prezența curentului alternativ în linie din cauza VTC-ului poate perturba circuitele de semnalizare sau de telecomandă.

Frecvența de lucru se alege, astfel încât să fie mai mare decât frecvența cea mai mare din sistemele de telecomandă și telesemnalizare.

Cele 4 VTC-uri ale unei rame de metrou (câte unul pe fiecare MT) vor putea lucra în paralel cu impulsuri decalate cu 90° electrice.

Schema de principiu la acționarea cu VTC și filtru de intrare a fost prezentată în figura 3.1.

La dimensionarea filtrului, se ține seama că frecvența de lucru a variatorului de tensiune continuă este constantă.

Se fac în continuare următoarele notații:

T – perioada de tact a VTC-ului;

$f = 1/T$ – frecvența de lucru a VTC-ului;

T_c – perioada de conducție a VTC-ului;

$a = \frac{T_c}{T}$ – raportul de conducție a VTC-ului;

$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_F C_F}}$ – frecvența proprie a filtrului rețea;

$U_{\min} = 525 \text{ V}$ – tensiunea minimă admisă la linia de curent continuu în exploatare;

$I_{\max} = 540 \text{ A}$ – curentul maxim de pornire luat de VTC;

$$\begin{aligned}\Delta U_{C0 \max} &= (0,1 \dots 0,2) U_{\min} - \text{ondulația maximă a tensiunii}; \\ \Delta I_{L0 \max} &= (0,01 \dots 0,05) I_{\max} - \text{ondulația maximă a curentului}; \\ (\Delta U_{C0 \max} \text{ și } \Delta I_{L0 \max} &\text{ sunt valori recomandate în practică}) [74].\end{aligned}$$

La dimensionarea filtrului de intrare se pune condiția $\frac{f_0}{f} < 1$, caz în care influența impedanței liniei de alimentare la deplasarea vehiculului este neglijabilă.

La metrou, trebuie făcute experimentări minuțioase pentru determinarea gradului de perturbare dat de VTC, în sistemul de semnalizare al căii.

În practică, o problemă principală constă în alegerea frecvenței de lucru a variatorului. Cu o frecvență foarte joasă, se obține o gamă de reglaj mare, în schimb, crește foarte mult filtrul de intrare și inductanța de netezire serie cu motorul de tracțiune. O frecvență ridicată duce la creșterea pierderilor în VTC și se micșorează gama de reglaj [74].

În conformitate cu metodologia de calcul [74], unduțiile maxime ale tensiunii și curentului alese, potrivit recomandărilor din practică, vor fi următoarele:

$$\Delta U_{C0 \max} = 0,2U_{\min} = 0,2 \times 525 = 105 \text{ V} \quad (5.32)$$

$$\Delta I_{L0 \max} = 0,05I_{\max} = 0,05 \times 540 = 27 \text{ A} \quad (5.33)$$

Variatorul de tensiune continuă propus are următoarele performanțe:

$$f = 400 \text{ Hz};$$

$$a_{\min} = 5\%$$

$$a_{\max} = 98\%$$

$$I_{\max} = 540 \text{ A}$$

Motorul de tracțiune propus are următoarele caracteristici nominale:

$$U_n = 750 \text{ V}$$

$$P_n = 185 \text{ KW}$$

$$I_n = 270 \text{ A}$$

$$I_p = 360 \text{ A}$$

$$L_{\text{motor}} + L_{\text{excitație}} = 11 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

$$\Delta I_M = 30 \text{ A}$$

Scriind ecuațiile de curent, de tensiune la bornele condensatorului și de tensiune la bornele mașinii electrice în două situații și anume: cu VTC conectat, respectiv deconectat, prin diferențiere și aplicarea transformatei La Place, se pot obține ecuațiile pentru determinarea unduției maxime a tensiunii la bornele condensatorului respectiv a unduției maxime a curentului prin inductivitatea filtrului rețea.

Prin dezvoltare în serie de funcții, se pot folosi doar primii doi termeni ai funcției, fără ca eroarea să fie mai mare de 4%, situație în care rezultă ecuațiile următoare [74]:

$$(\Delta U_{C_0})_{\max} = \frac{I_{\max}}{4C_0} \cdot \frac{1}{f} \cdot \left(1 - \frac{\pi^2}{24} \cdot \frac{f_0}{f} \right); \quad (5.34)$$

$$(\Delta I_{L_0})_{\max} = \frac{I_{\max}}{32f^2 C_0 L_0} \left[1 + \frac{5\pi^3}{24} \cdot \left(\frac{f_0}{f} \right)^3 \right]. \quad (5.35)$$

În relațiile de mai sus, C_0 , L_0 și f_0 sunt: capacitatea condensatorului filtru, inductivitatea filtrului și frecvența proprie a filtrului.

Neglijând al doilea termen din paranteză, cu aproximație se poate determina C_0 și L_0 , rezultând astfel:

$$C_0 = \frac{I_{\max}}{4(\Delta U_{C_0})_{\max} \cdot f} = \frac{540}{4 \cdot 105 \cdot 400} = 3,2142 \cdot 10^{-3} \text{ F.}$$

$$L_0 = \frac{I_{\max}}{32f^2 C_0 (\Delta I_{L_0})_{\max}} = \frac{540}{32 \cdot 400^2 \cdot 3,2142 \cdot 10^{-3} \cdot 27} = 1,2153 \cdot 10^{-3} \text{ H.}$$

Frecvența proprie a filtrului va fi:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{1,2153 \cdot 10^{-3} \cdot 3,2142 \cdot 10^{-3}}} = 80,52 \text{ Hz.}$$

Dacă se fac calculele cu relațiile (5.34) și (5.35) complete, va rezulta:

$$(\Delta U_{C_0})_{\text{real}} = \frac{I_{\max}}{4C_0} \cdot \frac{1}{f} \cdot \left(1 - \frac{\pi^2}{24} \cdot \frac{f_0}{f} \right) = \frac{540}{4 \cdot 3,2142 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{1}{400} \cdot \left(1 - \frac{\pi^2}{24} \cdot \frac{80,52}{400} \right) = 96,3 \text{ V;}$$

$$(\Delta I_{L_0})_{\text{real}} = \frac{I_{\max}}{32f^2 C_0 L_0} \left[1 + \frac{5\pi^3}{24} \cdot \left(\frac{f_0}{f} \right)^3 \right]$$

$$(\Delta I_{L_0})_{\text{real}} = \frac{540}{32 \cdot 400^2 \cdot 3,2142 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2153 \cdot 10^{-3}} \left[1 + \frac{5\pi^3}{24} \cdot \left(\frac{80,52}{400} \right)^3 \right] = 28,42 \text{ A}$$

Acste valori înlocuite în relațiile (5.24) și (5.25) vor permite calculul foarte precis a condensatorului și inductivității filtru rețea.

$$C_F = \frac{I_{\max}}{4f(\Delta U_{C_0})_{\max}} \left(1 - \frac{\pi^2}{24} \cdot \frac{f_0}{f} \right) = \frac{540}{4 \cdot 400 \cdot 105} \left(1 - \frac{\pi^2}{24} \cdot \frac{80,52}{400} \right) = 2,9482 \cdot 10^{-3} \text{ F.}$$

$$L_F = \frac{I_{\max}}{32f^2 C_F (\Delta I_{L0})_{\max}} \left[1 + \frac{5\pi^3}{24} \left(\frac{f_0}{f} \right)^3 \right]$$

$$L_F = \frac{540}{32 \cdot 400^2 \cdot 2,9482 \cdot 10^{-3} \cdot 27} \left[1 + \frac{5\pi^3}{24} \cdot \left(\frac{80,52}{400} \right)^3 \right] = 1,3948 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_F \cdot C_F}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{1,3948 \cdot 10^{-3} \cdot 2,9482 \cdot 10^{-3}}} = 78,48 \text{ Hz.}$$

Modificarea valorilor inductivității filtrului L_F și a condensatorului filtru C_F , în funcție de ondulația maximă a tensiunii și a curentului recomandate în practică, calculate cu relațiile anterioare, sunt trecute în tabelele 5.11÷5.16 și prezentate în figurile 5.5 și 5.6.

Determinarea lui $\Delta U_{C0\max}$, C_0 ,

Tabelul 5.11.

$\Delta U_{C0\max}$	$0,10 \cdot U_{\min}$	$0,12 \cdot U_{\min}$	$0,14 \cdot U_{\min}$	$0,16 \cdot U_{\min}$	$0,18 \cdot U_{\min}$	$0,20 \cdot U_{\min}$
U [V]	52,5	63	73,5	84	94,5	105
C_0 [mF]	6,4	5,4	4,6	4	3,6	3,2

Determinarea lui $\Delta I_{L0\max}$, f_0 , $f_{0\text{real}}$

Tabelul 5.12.

$\Delta I_{L0\max}$	$0,01 \cdot I_{\max}$	$0,02 \cdot I_{\max}$	$0,03 \cdot I_{\max}$	$0,04 \cdot I_{\max}$	$0,05 \cdot I_{\max}$
I [A]	5,4	10,8	16,2	21,6	27
$\Delta I_{L0\text{real}}$ [A]	5,42	10,94	16,59	22,41	28,42
f_0 [Hz]	36,01	50,92	62,37	72,02	80,52
$f_{0\text{real}}$ [Hz]	35,92	50,59	61,62	70,70	78,48

Determinarea lui L_0

Tabelul 5.13.

$\Delta U_{C0\max}$	$0,10 \cdot U_{\min}$	$0,12 \cdot U_{\min}$	$0,14 \cdot U_{\min}$	$0,16 \cdot U_{\min}$	$0,18 \cdot U_{\min}$	$0,20 \cdot U_{\min}$
$\Delta I_{L0\max}$	L_0 [mH]					
$0,01 \cdot I_{\max}$	3,0382	3,6458	4,2535	4,8611	5,4687	6,0764
$0,02 \cdot I_{\max}$	1,5191	1,8229	2,1267	2,4306	2,7344	3,0382
$0,03 \cdot I_{\max}$	1,0127	1,2153	1,4178	1,6204	1,8229	2,0255
$0,04 \cdot I_{\max}$	7,5955	9,1146	1,0634	1,2153	1,3672	1,5191
$0,05 \cdot I_{\max}$	6,0764	7,2917	8,5069	9,7222	1,0937	1,2153

Determinarea lui ΔU_{C0real}

Tabelul 5.14.

ΔU_{C0max} [V]	52,5	63	73,5	84	94,5	105
ΔI_{L0max} [A]	ΔU_{C0real} [V]					
5,4	50,55	60,66	70,77	80,89	91	101,11
10,8	49,75	59,70	69,65	79,60	89,55	99,50
16,2	49,13	58,96	68,78	78,61	88,44	98,26
21,6	48,61	58,33	68,05	77,78	87,50	97,22
27	48,15	57,78	67,41	77,04	86,67	96,30

Determinarea lui C_F

Tabelul 5.15.

ΔU_{C0max} [V]	52,5	63	73,5	84	94,5	105
ΔI_{L0max} [A]	C_F [mF]					
5,4	6,1906	5,1588	4,4218	3,8691	3,4392	3,0953
10,8	6,0920	5,0766	4,3514	3,8075	3,3844	3,0460
16,2	6,0163	5,0136	4,2974	3,7602	3,3424	3,0082
21,6	5,9525	4,9605	4,2518	3,7203	3,3070	2,9763
27	5,8964	4,9136	4,2117	3,6852	3,2758	2,9482

Determinarea lui L_F

Tabelul 5.16.

ΔU_{C0max} [V]	52,5	63	73,5	84	94,5	105
ΔI_{L0max} [A]	L_F [mH]					
5,4	3,1699	3,8039	4,4378	5,0718	5,7058	6,3398
10,8	1,6244	1,9493	2,2742	2,599	2,9239	3,2488
16,2	1,1086	1,3304	1,5521	1,7738	1,9955	2,2173
21,6	0,85122	1,0215	1,1917	1,362	1,5322	1,7024
27	0,6974	0,8368	0,9763	1,1158	1,2553	1,3948

Fiecare curbă de variație corespunde unei ondulații a curentului ΔI_{L0max} , iar culorile corespunzătoare sunt:

- negru – $\Delta I_{L0max} = 0,01 \cdot I_{max} = 5,4$ A
- roșu – $\Delta I_{L0max} = 0,02 \cdot I_{max} = 10,8$ A
- albastru – $\Delta I_{L0max} = 0,03 \cdot I_{max} = 16,2$ A
- verde – $\Delta I_{L0max} = 0,04 \cdot I_{max} = 21,6$ A
- maro – $\Delta I_{L0max} = 0,05 \cdot I_{max} = 27$ A

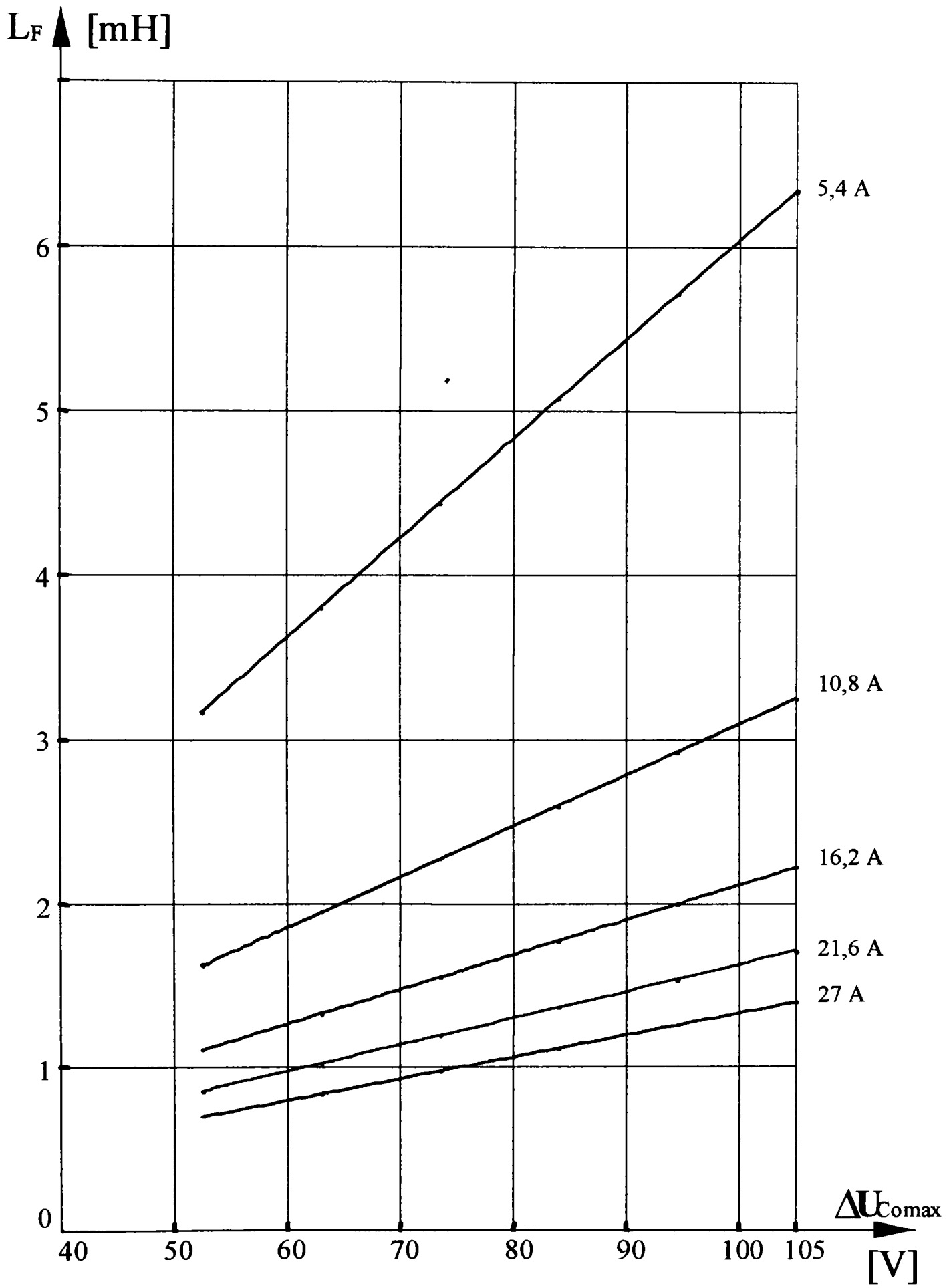


Figura 5.5. Modificarea valorii L_F funcție de ondulațiile maxime ale tensiunii și curentului recomandate

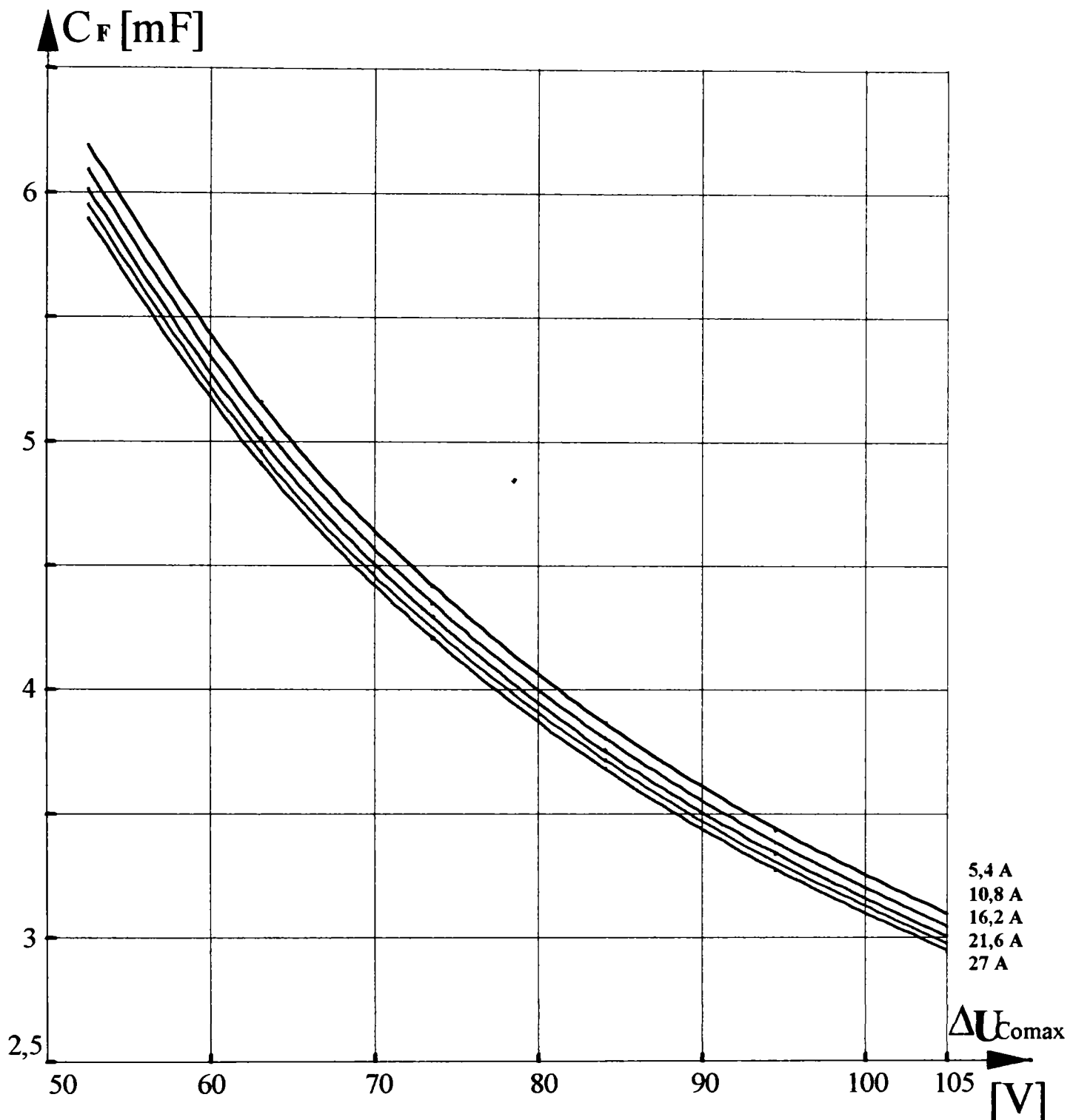


Figura 5.6. Modificarea valorii C_F funcție de ondulațiile maxime ale tensiunii și curentului recomandate

Din analiza făcută diagraamelor din figurile 5.5 și 5.6, rezultă:

- **inductivitatea** filtrului L_F se modifică foarte mult cu ondulația tensiunii ΔU_{C0max} la ondulații mici ale curentului, dar se modifică foarte puțin la ondulații mari ale curentului ΔI_{L0max} .

- **capacitatea** condensatorului filtru C_F se modifică foarte mult cu ondulațiile tensiunii ΔU_{C0max} , dar foarte puțin cu ondulațiile curentului ΔI_{L0max} , variația fiind neliniară;

Alegerea inductivității de netezire serie cu motorul de tracțiune după [74] se face în baza relației de mai jos.

$$L_M = \frac{0,25 \cdot U_{\max} \cdot T}{\Delta I_M} - L_{MT} = \frac{0,25 \cdot 900 \cdot \frac{1}{400}}{30} - 11 \cdot 10^{-3} = 7,75 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

Calcululele de dimensionare prezentate anterior sunt foarte apropiate de cele ale unor componente deja fabricate pentru un motor de tracțiune de 150 kW (folosite la troleibuzul 415 T de la R.A.T. București), de către SAERP București, vezi tabelul 5.17. Excepție face inductivitatea de netezire serie cu MT care este mai mare, deoarece la metrou s-a impus o variație ΔI_M mai mică datorată telecomenzilor și telesemnalelor existente.

Tabelul 5.17.

Parametri	Valori determinate de autor la metrou pentru P=185 KW	Valori determinate la troleibuz pentru P=150 KW
L_F [H]	$1,3948 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$
C_F [F]	$2,9482 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
L_M [H]	$4,25 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$

5.3.3. Protecția la depășirea valorilor parametrilor tiristoarelor

Tiristoarele sunt solicitate la curent și tensiune, atât pe partea de forță, cât și pe partea de comandă a porții [75]. Dacă valorile limită ale tiristoarelor precizate în catalog nu sunt depășite în funcționarea normală, ele pot funcționa un timp nelimitat, practic 18 – 20 de ani. Pentru evitarea deteriorării elementelor semiconductoare, se urmărește o proiectare judicioasă pentru a se asigura funcționarea, astfel încât să se încadreze în valorile limită prescrise în catalog. Alegerea efectivă a tipului de protecție cel mai adecvat este un lucru foarte important.

Valorile limită ale parametrilor tiristoarelor, ce nu trebuie depășite pentru a se garanta buna funcționare a acestora sunt:

- valorile limită la temperatură;
- valorile limită la du/dt ;
- valorile limită de tensiune;
- valorile limită la di/dt ;
- valorile limită de curent în regim de staționare;
- curenți limită de suprasarcină;
- valorile limită ale parametrilor de comandă a porții;
- valorile limită ale frecvențelor de lucru.

Încadrarea în valorile limită, maxime și minime, ale temperaturii joncțiunii, permit tiristoarelor să funcționeze corect. Respectarea valorii minime se obține prin montarea tiristoarelor în încăperi, în care temperatura mediului ambiant să nu scadă sub -40°C . Valorile maxime

nu trebuie să fie nici ele depășite și de aceea se alege corect radiatorul și sistemul de răcire folosit.

Tiristorul are o capacitate și inerție termică limitată, astfel că depășirea valorilor limită pentru curenți, tensiuni, di/dt și du/dt , pot duce la distrugerea rapidă sau lentă prin oboseală a tiristorului, motiv pentru care aceste valori nu trebuie să fie depășite.

Comanda porții cu valori ale curenților prea mici sau prea mari poate duce la deteriorarea tiristorului. Comanda cu curenți de poartă prea mici poate duce la scăderea valorii limită a lui di/dt suportate de tiristor față de valoarea nominală din catalog, de aproximativ 10 ori. Comanda porții cu un curent sau tensiune prea mare duce la distrugerea termică a porții. În general, curenții mari pe poartă se obțin greu. Și distrugerea porții prin supratensiune este puțin probabilă. Aceste tensiuni mari pot apărea numai accidental. Montarea unei diode cu avalanșă controlată în paralel cu poarta asigură protecția la supratensiune pentru poartă.

Valoarea limită a frecvenței de lucru nu trebuie depășită, pentru a evita depășirea valorilor limită pentru di/dt și respectiv temperatura limită maximă admisă pentru joncțiune. Până la frecvențe de lucru de 50 Hz, se folosesc tiristoare convenționale, între 50-500 Hz tiristoare rapide, iar peste 500 Hz tiristoare foarte rapide.

a). Protecția la supracurent

Protecția tiristorului la supracurent este hotărâtoare în asigurarea funcționării pe timp nelimitat, deoarece constanta de timp termică a acestuia este foarte scăzută, datorită capacității termice foarte scăzute. Tiristoarele pot fi supuse în timpul funcționării la supracurenți cuprinși între curentul nominal și curentul de scurtcircuit. Supracurenții pot fi clasificați în două mari grupe:

- **Supracurenți** voșiți sau accidentali dați de o depășire a valorii nominale a curentului în circuitul în care este montat tiristorul. Acești supracurenți sunt pentru o anumită durată în procesul tehnologic și practic, nu depășesc de $1,5 \div 2,5$ ori curentul nominal. Ei sunt numiți curenți de suprasarcină.

- **Curenți** de tip scurtcircuit, care apar prin creerea unor căi particulare de circulație, căi de foarte mică impedanță.

Tiristoarele montate pe radiatoare de răcire se dimensionează astfel, încât să poată suporta curenți de suprasarcină timp de mai multe minute, fiind considerați pentru tiristoare curenți de durată. Dispozitivele termice de protecție obișnuite pentru întregul echipament pot să asigure și protecția lor la suprasarcină.

Protecția la scurtcircuit trebuie să se facă neapărat, deoarece distrugerea tiristorului se poate realiza în aproximativ câteva zeci de milisecunde. Scurtcircuitele pot fi de două feluri: interne și externe.

Scurtcircuitul intern are loc chiar în interiorul tiristorului, care poate duce la apariția unei căi cu rezistență foarte mică și implicit la apariția unui curent de scurtcircuit pentru întreaga instalație. În general, protecția la scurtcircuit intern se realizează cu elemente de protecție conectate în serie cu fiecare tiristor.

Scurtcircuitul extern apare în afara tiristorului, cum ar fi de exemplu scurtcircuitul la bornele sarcinii.

Protecția exterioară trebuie să lucreze înaintea celei interioare, dar cu asigurarea rapidității de lucru.

Elementele de protecție împotriva scurtcircuitelor pot fi împărțite [75] în două categorii:

- **elemente** capabile să reducă viteza de creștere a curenților de scurtcircuit sau să limiteze valoarea lor în timp, cum sunt inductanțele suplimentare;

- **elemente** capabile să întrerupă curentul de scurtcircuit, cum sunt întrerupătoarele rapide de curent continuu sau siguranțele fuzibile ultrarapide, montate în serie cu fiecare tiristor sau grup de tiristoare.

Inductanțele montate în serie cu sarcina sau cu sursa de curent continuu limitează variația di/dt , astfel încât dispozitivele de protecție cu acțiune rapidă să poată întrerupe curentul de scurtcircuit, dar ele prezintă surse de supratensiune în cazul întreruperii circuitului, motiv pentru care valoarea acestor inductanțe nu trebuie aleasă excesiv de mare (vezi subcapitolul 5.3.2).

Siguranța fuzibilă ultrarapidă este elementul care se adaptează cel mai bine protecției la supracurent, putând asigura protecția pentru întreg domeniul de funcționare al tiristorului, atât la suprasarcină, cât și la scurtcircuit.

Folosirea ca element de protecție a întrerupătorului ultrarapid este tot mai des utilizată, mai ales pentru protecția externă. Pentru că pot exista suprasarcini și scurtcircuite de durată mai mare, protecția tiristoarelor numai cu siguranțe fuzibile nu este suficientă. Întrerupătoarele rapide și ultrarapide pot fi echipate cu relee, care acționează la curent de scurtcircuit, la curent invers, sau la di/dt .

Pentru protecție, se poate folosi și proprietatea de blocare a tiristorului prin suprimarea comenzii porții și comanda stingerii acestuia pentru blocare.

b). Protecția la supratensiuni

Este necesar ca și supratensiunile să fie controlate eficient, astfel încât tensiunile maxime și minime la care sunt supuse tiristoarele să nu depășească tensiunile nominale în sens direct și invers. Supratensiunile sunt create atât de factori interni, cât și externi.

Supratensiunile externe sunt supratensiuni atmosferice și supratensiuni date de întreruperea bruscă a curentului în circuite inductive.

Supratensiunile interne sunt cauzate de însuși echipamentul cu tiristoare și de arderea fuzibilelor.

Pentru protecția echipamentelor cu tiristoare la supratensiunile de origine internă și externă, există mai multe dispozitive de protecție, care pot limita sau suprima supratensiunile periculoase. Acestea sunt dispozitivele ce conțin elemente clasice neliniare, semiconductoare, rețele RCL sau RC.

Supratensiuni provocate de întreruperea repetată a curentului continuu. Atunci când curentul este întrerupt forțat cu o anumită frecvență, pentru limitarea supratensiunilor în paralel cu sarcina inductivă, se montează o diodă de nul-anodă (de fugă). Aceasta pentru frecvențe mari va fi o diodă rapidă.

c). Protecția tiristoarelor la di/dt

Limitarea lui di/dt se face de regulă prin folosirea unei inductanțe conectată serie cu tiristorul. În cazul cel mai simplu la aplicarea unei tensiuni treaptă asupra unui circuit RL, bobina L va limita curentul ce o traversează, la valoarea:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U}{L} \quad (5.36)$$

Trebuie avut în vedere ca variația di/dt calculată cu relația de mai sus să fie mai mică de 2÷3 ori decât valoarea di/dt dată în catalog pentru tiristorul respectiv.

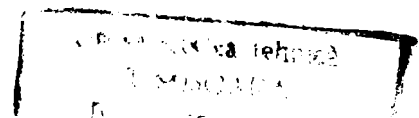
d). Protecția tiristoarelor la du/dt

Se va verifica totdeauna ca du/dt aplicat tiristorului să fie de 2÷3 ori mai mic decât du/dt admis în catalog pentru tipul de tiristor dat.

5.4. Evacuarea căldurii, răcirea tiristoarelor și consumul energetic

În timpul funcționării schemelor cu tiristoare, o parte din puterea electrică ce străbate elementele componente este disipată în timp sub formă de căldură în tiristoare, în dispozitivele de protecție ale tiristoarelor și în circuitele de aprindere și stingere [75]. Aceasta are drept urmare creșterea temperaturii la care lucrează tiristoarele și celelalte elemente din circuit. Este necesar stabilirea puterii maxime pe care o poate disipa fiecare tiristor, fără a depăși temperaturile maxime admise de către joncțiunile tiristoarelor și diodelor.

Căldura produsă într-un echipament cu tiristoare se datorează pierderilor produse în funcționarea acestora și se împart în mai multe categorii: pierderi în regim cvasi-staționar; pierderi date de comutație;



pierderi în circuitele de poartă; alte pierderi în elementele anexă ale tiristoarelor (siguranțe, inductanțe, condensatoare, etc.).

Tiristoarele pot fi distruse din cauza temperaturii excesive a joncțiunii, sau prin combinarea efectelor încălzirii excesive și a tensiunii ridicate, directe sau inverse. O încălzire excesivă poate fi produsă printr-o creștere a solicitărilor dinamice, în regim de lucru la frecvențe ridicate, care s-ar putea datora unui scurtcircuit în inductanța serie cu tiristorul care limitează di/dt . Încălzirea excesivă poate să apară și datorită și curentului de funcționare în cazul unei suprasarcini de durată, dacă dispozitivele de protecție la suprasarcină nu lucrează corect.

Energia disipată a tiristoarelor apare sub formă de căldură, care trebuie evacuată spre mediul exterior. Evacuarea principală a căldurii se face prin baza metalică a capsulei tiristorului spre radiator sau prin conexiunile electrice de forță, trese sau conductoare.

Pentru puteri mari și mijlocii, răcirea radiatoarelor se face forțat, cu aer. Firmele constructoare recomandă pentru fiecare tip de tiristor radiatoarele optime. Pentru viteze ale aerului de 5 m/s, se poate obține un factor de transfer de cca. 50 – 70 W/m². Pentru viteze ale aerului de 12 m/s, factorul de transfer poate ajunge la 150 W/m².

Pentru răcirea tiristoarelor de putere foarte mare, acestea se montează pe bare de aluminiu extrudat, cu profil special, prevăzute cu canale, prin care circulă lichidul de răcire. Ca agenți de răcire se pot utiliza apa (dezionizată), etilen, glicol sau ulei de transformator.

Aprecierea energetică a sistemului de acționare cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei cu VTC, trebuie să se facă pe un ciclu de funcționare care cuprinde pornirea, funcționarea cu viteză constantă și frânarea.

La pornire s-au eliminat pierderile pe reostat, ele limitându-se doar la pierderile pe componentele din circuitul de alimentare al MT și anume, inductivității, tiristoare și conductoare de legătură. Aceste pierderi sunt însă relativ mici deoarece prin folosirea tiristorului GTO, schema electrică de acționare s-a simplificat foarte mult, tiristoarele reducându-se la unul pe tracțiune și unul pe frânare, iar lungimea conductoarelor este minimă.

La frânare energia cinetică înmagazinată în masa trenului este transformată în energie electrică livrată la rețea. Puterea recuperată în acest caz rezultă din diferența dintre puterea electromagnetică produsă și pierderile în rezistența echivalentă a circuitului.

Determinarea detaliată a consumului energetic efectuat de autor pe baza calculelor din capitolul 2 și a măsurărilor experimentale prezentate în capitolul 6, este redat desfășurat în anexa V. Pe ansamblu comparativ cu reglarea rezistivă a vitezei unde consumul specific de energie este de 132 W·h/t·km, la reglarea vitezei cu VTC consumul este de 91 W·h/t·km.

5.5. Prezentarea schemei electrice de acționare pentru o ramă de metrou

5.5.1 Schema electrică desfășurată a circuitului de forță

Această schemă concepută de autor este prezentată în figurile 5.7 și 5.8, iar legenda cu denumirea tuturor aparatelor și agregatelor în tabelul 5.18. Schema conține toate elementele necesare funcționării în condiții specifice metroului, și în condițiile deplinei siguranțe în exploatare.

Tabelul 5.18

1U1 – 1U8	Captatoarele energiei electrice
1U9	Șina a treia
2U1 – 2U8	Contactele de osie pentru curentul de întoarcere
Sc	Scurtcircuitor
3U1, 3U2	Înterupătoarele automate ultrarapide
LC	Linia de contact
4U1	Pantograf
4U2	Contactoarea pentru circuitul de alimentare din pantograf
4U3	Relevu maximal de curent
4D1	Diodă de sens pentru tracțiunea pe pantograf la vagonul A
4D2	Diodă de sens pentru tracțiunea pe pantograf la vagonul B
5U1, 5U2	Protecția diferențială pentru curentul de scurgere la masă
LR1, LR2	Inductivitățile de intrare
LM1 – LM4	Inductivitățile din circuitul serie al motoarelor de tracțiune
m1 – m4	Motoarele de tracțiune
KM1 – KM8	Contactoarele pentru funcționarea în regimul de tracțiune înainte
KM9 – KM16	Contactoarele pentru funcționarea în regimul de tracțiune înapoi
KF1 – KF8	Contactoarele pentru funcționarea în regimul de frânare
KF9 – KF12	Contactoarele pentru reostatele adiționale de frânare
TGTO1 – TGTO4	Tiristoarele principale
TF1 – TF4	Tiristoarele pentru frânarea reostatică
RF1 – RF4	Reostatele de frânare
Ra1 – Ra8	Reostatele adiționale de frânare
DR1 – DR4	Diodele de recuperare și fugă
DF1 – DF4	Diodele pentru funcționarea în regimul frânare
TI1 – TI4	Tructoarele de curent
TTF1 – TTF4	Tructoarele de tensiune
CF1 – CF4	Condensatoarele filtrului de intrare
R _{p1} – R _{p4}	Reostatele de protecție la di/dt
R _{e1} – R _{e8}	Reostatele pentru slăbirea câmpului
KE1 – KE8	Contactoarele pentru slăbirea câmpului

KP1 – KP4	Contactoarele pentru conectarea surselor de preexcitare
KL1; KL2	Contactoarele de linie pe minus
KR1; KR2	Contactoarele pentru încărcarea inițială a condensatoarelor filtru
RP1; RP2	Rezistențe de limitare pentru încărcarea inițială a condensatoarelor
F1 – F4	Siguranțe ultrarapide din circuitul de forță
F5 – F6	Siguranțele ultrarapide pentru încărcarea condensatoarelor
SP1 – SP4	Sursele de preexcitare

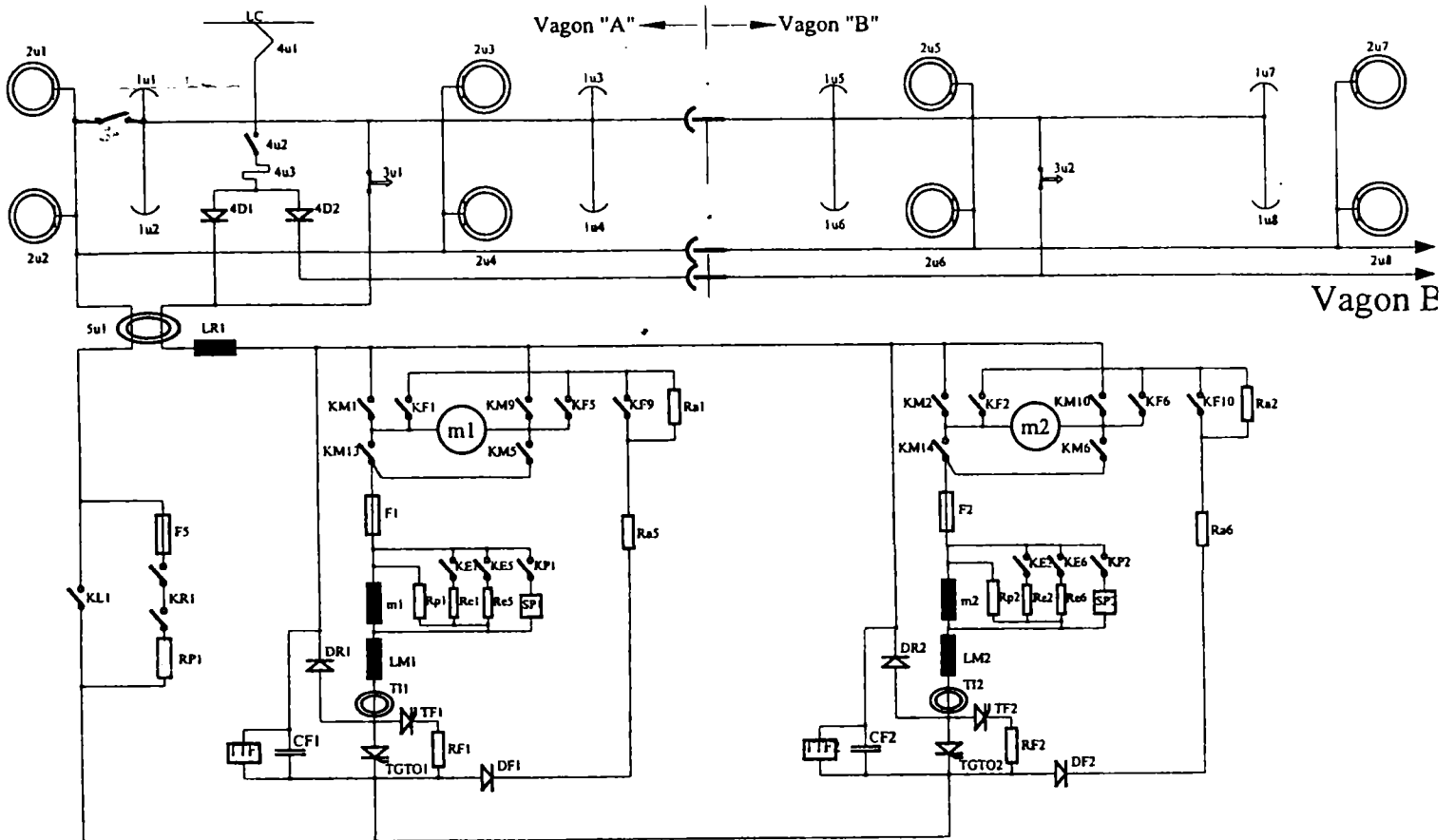


Figura 5.7. Schema electrică a circuitului de forță vagon A

Energia electrică este captată de la rețea în mod normal prin cele 8 captatoare 1U1–1U8, plasate câte 4 pe o parte și 4 pe cealaltă parte a ramei de metrou. La funcționarea în depou și din depou până în tunel, energia electrică este captată prin pantograful 4U1, asigurată prin contactorul 4U2, iar circuitul este protejat prin releul maximal de curent 4U3.

Curentul de întoarcere se închide prin cele 8 contacte de pământare din capul osiilor motoare. Protecția circuitului (la funcționarea pe captatoare) la scurtcircuit este asigurată de către întrerupătorul automat ultrarapid 3U1, 3U2.

Împotriva atingerilor accidentale la masă a circuitului de forță, se folosesc protecțiile diferențiale 5U1 și 5U2, care la sesizarea unei diferențe de curent între intrare și ieșire mai mare de 25 A, vor comanda deconectarea întrerupătoarelor automate ultrarapide 3U1 și 3U2.

Închiderea curentului prin circuitul de minus este asigurată de către contactoarele de linie KL1 și KL2, iar încărcarea inițială a condensatoarelor filtru CF1 respectiv CF2 se face prin contactoarele

KR1 și KR2 prin siguranțele fuzibile F5, F6 și rezistențele de limitare RP1 și RP2.

Diodele DR1 și DR2 au rolul de a evita alimentarea pantografului atunci când tracțiunea este realizată prin captatoare.

Schimbarea sensului de mers se face prin inversarea sensului curentului electric prin rotorul mașinii electrice, adică prin KM1 și KM5 la mersul înainte, și prin KM9 și KM13 la mersul înapoi.

Inductivitatea de intrare în grupul de motoare m1 și m2 este LR1 respectiv LR2 (pentru m3 și m4), iar inductivitățile serie individuale ale motoarelor sunt LM1 și LM2, respectiv LM3 și LM4.

Protecția individuală la supracurent a fiecărui motor de tracțiune este asigurată de câte o siguranță fuzibilă ultrarapidă (F1, F2, F3, F4).

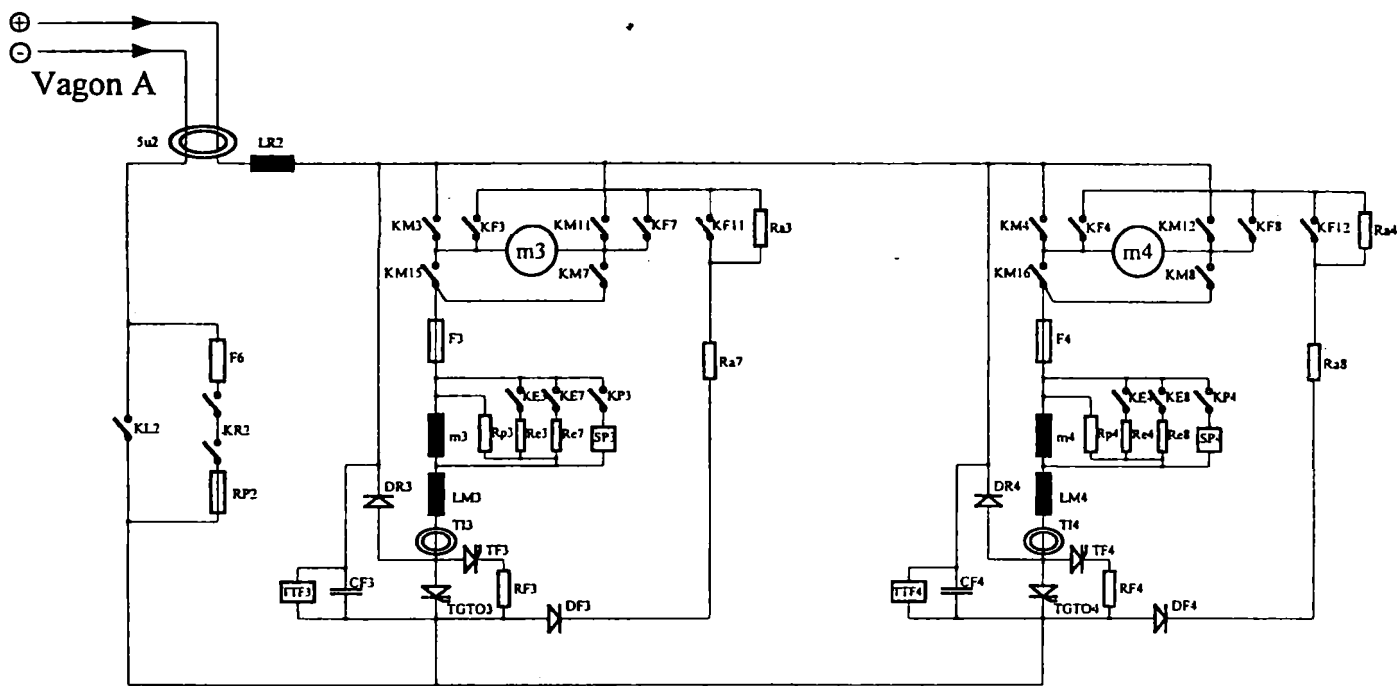


Figura 5.8. Schema electrică a circuitului de forță vagon B

Protecția înfășurării de excitație este realizată de reostatele Rp1–Rp4, iar slăbirea de câmp este asigurată de două reostate și două contactoare pentru fiecare motor de tracțiune în parte (Re1–Re8, respectiv KE1–KE8).

Pentru amorsarea procesului de frânare, fiecare înfășurare de excitație este alimentată de la o sursă de preexcitare SP1 – SP4, conectată prin câte un contactor electromagnetic KP1 – KP4. Cu ajutorul acestei surse, se poate alimenta înfășurarea de excitație serie a motorului de tracțiune la un curent de 50 – 100 A timp de 3s, după care aceasta este deconectată în mod automat.

La trecerea mașinii electrice din regim de motor (tracțiune) în regim de generator (frânare), sensul curentului prin înfășurarea polilor de excitație rămâne același pentru a păstra pe cât posibil magnetismul

remanent al acestora, motiv pentru care inversarea sensului de rotație a mașinii electrice se face prin inversarea sensului curentului electric în rotor. Totuși pentru siguranța amorsării procesului de frânare, se folosesc suplimentar și sursele de preexcitare prezentate anterior.

Măsurarea continuă a curentului prin fiecare motor de tracțiune este făcută de către traductoarele de curent TI1–TI4, a cărui informație analogică intră în automatul programabil cu microprocesor, pentru asigurarea valorii lui constante sau pentru deconectarea circuitului la depășirea valorii de prag stabilite.

Tensiunea de încărcare a condensatoarelor filtrelor CF1 – CF4 este măsurată continuu de către traductoarele TTF1 –TTF4, atât în regim de tracțiune cât și în regim de frânare. Aceste condensatoare se încarcă în perioada de blocare a tiristorului GTO și se descarcă parțial atunci când tiristoarele sunt deschise, adică în perioada lor de conducție. Pentru a asigura în instalație o variație cât mai mică a curentului $\Delta i = I_{max} - I_{min}$, comanda de deschidere a tiristoarelor TGTO se realizează decalat pentru cele 3 unități de metrou, adică pentru cele 12 motoare de tracțiune.

Perioada T este împărțită în 4, astfel încât să primească comanda de deschidere 3 tiristoare în același timp, iar decalajul dintre ele să fie de T/4.

În acest fel, doar două motoare absorb energia electrică de la rețea în același timp, iar condensatoarele CF1, CF2, CF3 și CF4 completează din energia înmagazinată necesarul motoarelor de tracțiune.

În timpul frânării recuperative, curentul electric recuperat este condus către rețea prin diodele DR1 –DR4 și prin diodele DF1 – DF4.

Frânarea reostatică este realizată prin tiristoarele TF1 – TF4 și reostatele RF1- RF4, tiristoarele având doar rolul de contactoare. Curentul continuă apoi prin aceleași diode DF1 – DF4, reostatele adiționale Ra1 – Ra8 și contactoarele de funcționare în regimul frânare KF9 –KF12. Contactoarele KF1 – KF4 respectiv KF5 – KF8 închid schema de funcționare în regimul frânare la mersul înapoi și respectiv la mersul înainte.

Este de subînțeles faptul, că de la aceeași sursă de energie electrică din rețea, va fi alimentat și convertorul static pentru serviciile auxiliare printr-o siguranță fuzibilă de protecție ultrarapidă (situație care nu a fost reprezentată în figura 5.7 și 5.8).

După coborârea pantografului sau a captatoarelor, se conectează scurtcircuitul Sc, care protejează instalația împotriva alimentării accidentale cu energie electrică (dacă sistemul de coborâre al captatoarelor s-a defectat). De asemenea, dacă apare un defect major pe vehicul, iar întrerupătoarele automate nu au putut fi deconectate (din cauza sudării contactelor principale), atunci prin comanda

scurtcircuitului, se realizează un scurtcircuit imediat după intrarea energiei electrice pe vehicul, ducând astfel la declanșarea protecției din substația de tracțiune și întreruperea alimentării cu energie electrică.

Circuitul de alimentare al vehiculului este legat în paralel pentru cele două vagoane ale unei rame electrice. Aceste circuite vor fi pozate pe vehicul separat de restul cablajului de forță, iar pe fiecare captator se va monta câte o siguranță fuzibilă ultrarapidă pentru protecția circuitului până la întrerupătoarele automate ultrarapide.

5.5.2. Funcționarea schemei în regim de tracțiune

5.5.2.1. Tracțiunea pentru mersul înainte

Schema desfășurată pentru mersul înainte este prezentată în figura 5.9, unde s-au desenat numai contactoarele închise necesare funcționării în acest regim, și doar pentru motorul de tracțiune m1. Pentru celelalte trei motoare, situația este similară.

Reglarea vitezei vehiculului (deci a turației motorului de tracțiune) se realizează cu impulsuri de tensiune. În această situație, tiristorul principal TGTO1 are două stări: deschis și blocat. Pentru evitarea șocurilor de curent (care duc la apariția șocurilor electrice și mecanice), nu este permis unei scheme să-și întrerupă curentul prin motor sau să-și schimbe sensul.

În figura 5.9.a, este prezentată schema de tracțiune la mersul înainte cu TGTO1 deschis. În această situație, energia electrică este absorbită din rețea prin captatoarele de curent 1U1 – 1U8, prin întrerupătorul automat ultrarapid 3U1, inductivitatea de intrare LR1, contactoarele pentru mersul înainte KM1 și KM5, prin rotorul motorului electric de tracțiune m1, siguranța fuzibilă F1, excitația serie a polilor principali ai motorului electric m1, inductivitatea LM1, traductorul de curent TI1, prin tiristorul TGTO1, circuitul închizându-se apoi prin contactorul de linie KL1 și contactele de osie 2U1 – 2U8 la calea de rulare și la minusul substației de tracțiune.

În perioada blocării lui TGTO1 (schemă reprezentată în figura 5.9.b), curentul prin înfășurarea de excitație a polilor principali este același, ca urmare nu au loc întreruperi de curent într-o perioadă și implicit, nici întreruperi ale forței de tracțiune. În această perioadă de timp, dioda DR1 este cu rol de diodă de fugă, asigurând astfel același sens de curgere al curentului prin motorul de tracțiune. Contactoarele conectate rămân aceleași KM1 și KM5.

Tensiunea medie pe motor este dată de relația (5.37) și a fost analizată la subcapitolul 5.3.2:

$$U_{med} = \frac{1}{T} \int_0^{T_c} u dt = \frac{T_c}{T} \cdot U_1 \quad (5.37)$$

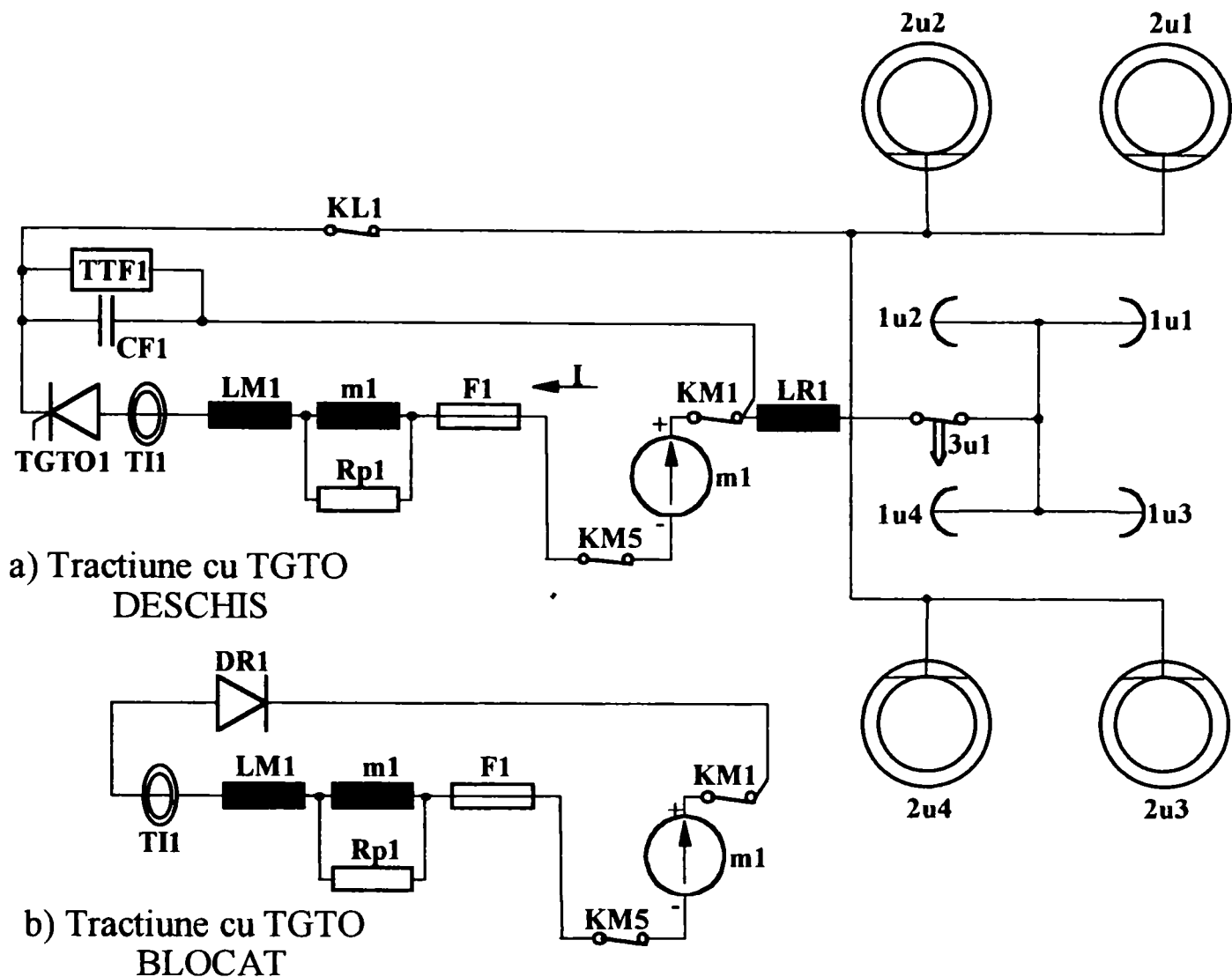


Figura 5.9. Schema electrică de tracțiune la mersul înainte

5.5.2.2. Tracțiunea pentru mersul înapoi

Schema desfășurată pentru mersul înapoi al unui motor de tracțiune este prezentată în figura 5.10. Și aici s-au desenat numai contactoarele închise în perioada de tracțiune pentru mersului înapoi.

Pentru starea deschisă a tiristorului principal TGTO1, schema este redată în figura 5.10.a. Energia electrică este preluată de la rețea prin captatoarele 1U1 – 1U8, prin întrerupătorul automat ultrarapid 3U1, inductivitatea de intrare LR1, prin contactoarele pentru mersul înapoi K9 și K13, rotorul motorului electric de tracțiune m1, prin siguranța fuzibilă ultrarapidă F1, înfășurarea plilor principali de excitație ai motorului m1, inductivitatea LM1, prin traductorul de curent TI1, tiristorul principal TGTO1, prin contactorul KL1, circuitul închizându-se apoi prin contactele de osie 2U1 – 2U8 la calea de rulare și la minusul substației de tracțiune.

În starea blocată a tiristorului TGTO1, același sens al curentului prin motor este asigurat prin dioda de fugă DR1, iar schema este reprezentată în figura 5.10.b. În această situație, contactoarele închise sunt aceleași, adică KM9 și KM13.

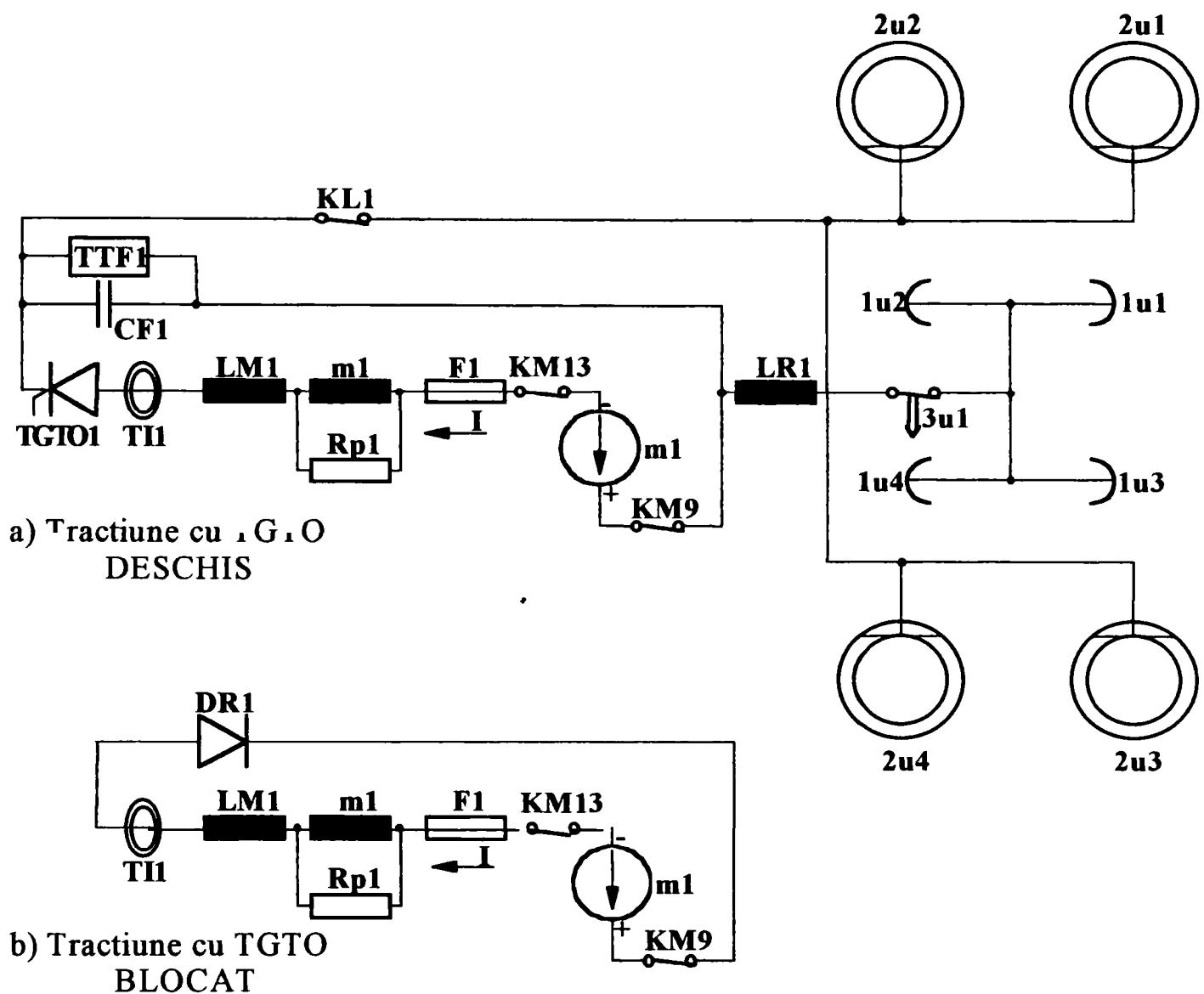


Figura 5.10. Schema electrică de tracțiune la mersul înapoi

Și în acest caz, ca și la mersul înainte, valoarea tensiunii U_{med} este dată de expresia (5.37).

Se poate astfel constata că atât la mersul înainte, cât și la mersul înapoi, sensul curentului prin înfășurarea de excitație este același, iar acesta nu se întrerupe în tot timpul procesului de tracțiune. În acest mod, și forța de tracțiune dezvoltată de motorul de tracțiune este neîntreruptă, evitându-se astfel funcționarea în regimul întrerupt.

5.5.3. Funcționarea schemei în regim de frânare

5.5.3.1. Frânarea la mersul înainte

Schema este prezentată în figura 5.11, numai pentru mersul înainte, situație în care contactoarele închise sunt KM13 și KF5, iar KF9 după necesități în timpul reglării vitezei la frânare.

Făcând reglarea vitezei în regim de tracțiune cu VTC, instalația se pretează foarte bine (și este de dorit să fie așa) la frânarea electrică recuperativă. Aceasta constă în trecerea mașinii electrice din regim de motor în regim de generator, situație în care energia electrică debitată

de generator ajunge la rețea. Cum însă linia de contact se află alimentată în curent continuu, este obligatoriu în permanent prezența altor consumatori alimentați din aceeași stație de tracțiune. Din acest motiv pe liniile respective, stațiile trebuie legate în paralel.

Pentru sensul de mers înainte, schema funcționării în regim de frânare recuperativă este prezentată în figura 5.11.a, pentru tiristorul TGTO1 blocat, și în figura 5.11.c pentru TGTO1 deschis. Pentru cazul prezentat în schema din figura 5.11.a, circulația curentului este următoarea:

- de la plusul mașinii electrice m1;
- contactorul KM13;
- siguranța fuzibilă ultrarapidă F1;
- înfășurarea polilor principali de excitație m1;
- inductivitatea de netezire serie cu motorul, LM1;
- traductorul de curent TI1;
- dioda de recuperare DR1;
- inductivitatea de rețea LR1;
- întrerupătorul automat 3U1;
- captatoarele 1U1 – 1U8;
- alte vehicule în regim de tracțiune;
- minusul căii de rulare;
- contactele de osie 2U1 – 2U8;
- contactorul de linie KL1;
- dioda DF1;
- reostatele adiționale de frânare Ra1 și Ra5;
- contactorul de frânare KF5;
- în final la minusul mașinii electrice m1.

Cu tiristorul TGTO1 deschis, circulația curentului prin mașina electrică este prezentată în figura 5.11.c, unde sensul curentului este același cu cel prezentat anterior. Așa cum se vede în figură, contactoarele închise sunt aceleași KM13 și KF5, iar tensiunea produsă aici $e=L \times di/dt$ se va suprapune în perioada blocării lui TGTO1 tensiunii electromotoare $E = K\Phi\Omega$ produsă de mașina electrică.

Tensiunea debitată de mașina electrică ajunge și pe condensatorul filtru CF1, fiind măsurată de traductorul de tensiune TTF1. Dacă pe stația de tracțiune respectivă nu există consumatori suficienți, tensiunea pe traductor începe să crească, iar la depășirea valorii limită admisă, se va comanda trecerea automată pe frânarea reostatică prin aprinderea tiristorului de frânare TF1.

Circuitul frânării reostatice cu TGTO1 blocat și cu TF1 aprins este reprezentat în figura 5.11.b.

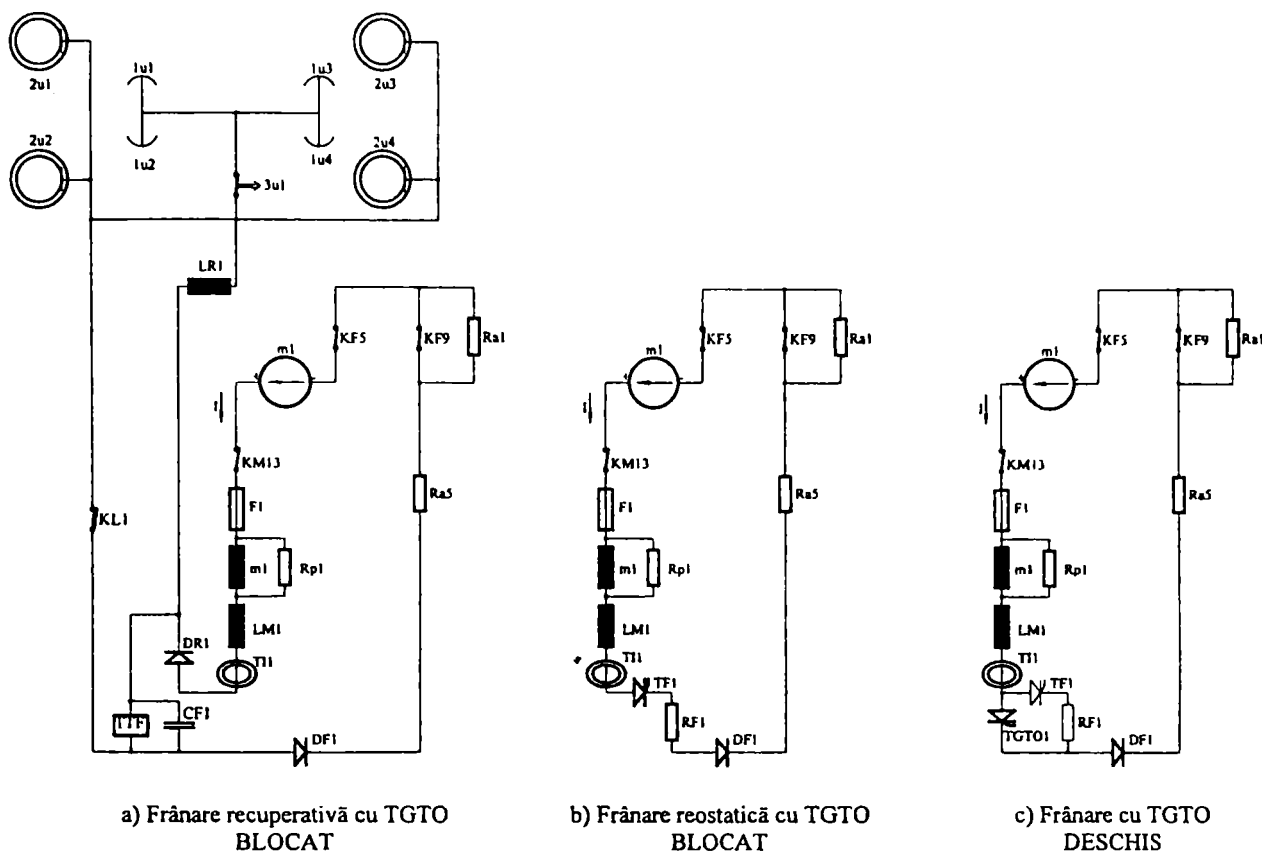


Figura 5.11. Schema electrică de frânare la mersul înainte

În această situație, tensiunea electromotoare debitată de mașina electrică este consumată în exclusivitate de către reostatele RF_1 , R_{a1} și R_{a5} potrivit relației:

$$E = K\Phi\Omega = (R_d + RF_1 + R_{a_{1,5}}) I \quad (5.38)$$

Unde: R_d – rezistența totală a inductivităților și a circuitului rotorului;

RF_1 – rezistența de frânare introdusă în circuit de tiristorul TF_1 ;

$R_{a_{1,5}}$ – rezistența adițională de frânare introdusă în circuit;

Contactoarele închise în schemă sunt aceleași, adică KM_{13} și KF_5 .

În perioada de aprindere a tiristorului $TGTO_1$, schema este aceeași ca și în cazul frânării recuperative fig. 5.11.c, numai că mai apare în plus circuitul reprezentat punctat a lui TF_1 și RF_1 . Circulația curentului are loc în același sens, de la plusul mașinii electrice m_1 , prin excitație, prin tiristorul $TGTO_1$ și prin reostatele adiționale de frânare la minusul mașinii electrice m_1 .

Din analiza schemelor precedente ale figurii 5.11, se constată că trecerea de la frână recuperativă la frână reostatică se face fără intervenția vreunui contactor electromagnetic (cu timp mare de răspuns), ea realizându-se doar prin comanda tiristorului de frânare TF_1 . Sensul curentului fiind același în toate situațiile, nu apar șocuri electrice și mecanice la motorul de tracțiune. Datorită prezenței convertorului static pentru serviciile auxiliare, pe vehicul există

întotdeauna un consumator al energiei debitate în procesul de frânare, consumul reostatic realizându-se doar pentru diferența de putere a celor două agregate și doar în cazul inexistenței unui alt vehicul pe aceeași stație în regim de tracțiune.

5.5.3.2. Frânarea la mersul înapoi

Această schemă este reprezentată în figura 5.12. Contactoarele închise de această dată sunt KM5 și KF1, situație care este identică cu frânarea mersului înainte, diferența constând doar în inversarea curentului prin circuitul electric al mașinii electrice devenită generator.

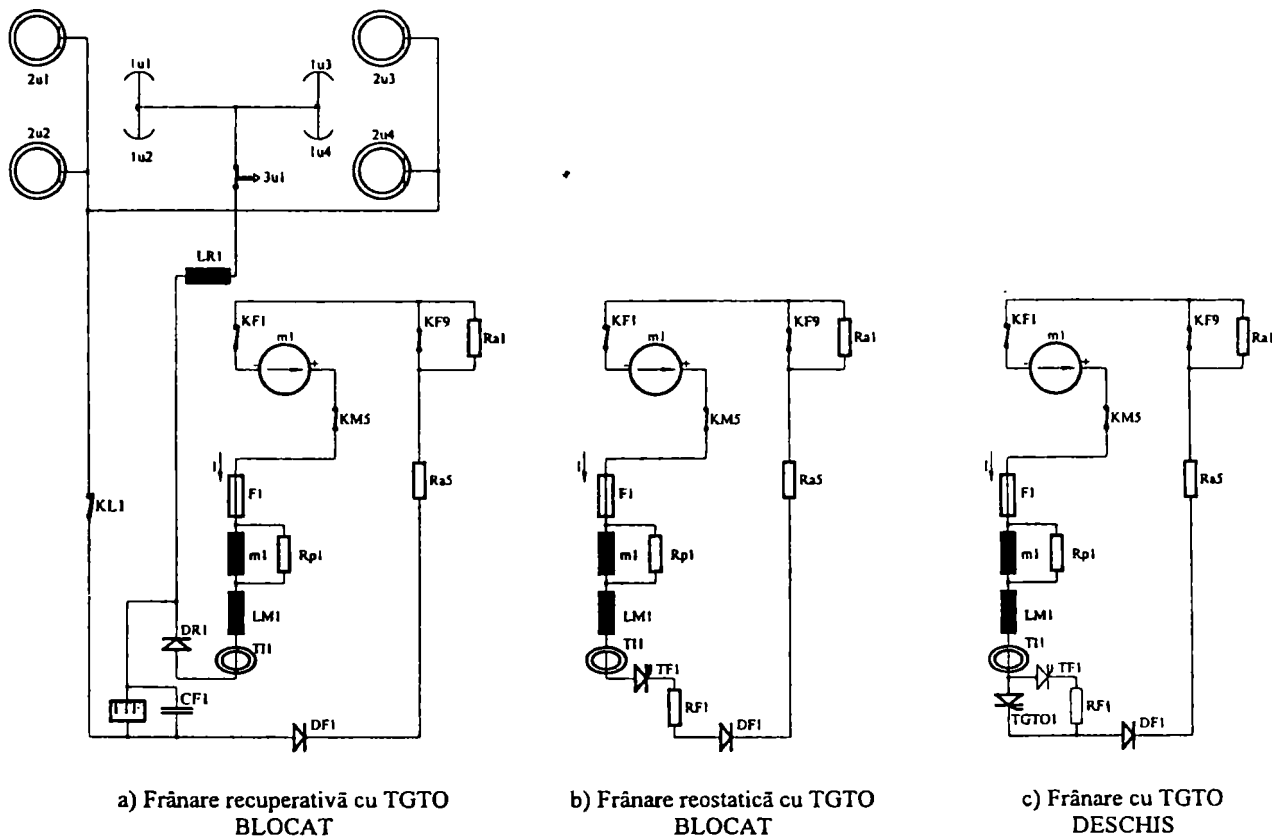


Figura 5.12. Schema electrică de frânare la mersul înapoi

Frânarea recuperativă cu tiristorul TGTO1 blocat este prezentată în figura 5.12.a, iar cu TGTO1 aprins în figura 5.12.c.

Frânarea reostatică cu TGTO1 blocat este prezentată în figura 5.12.b, iar la aprinderea lui TGTO1 în figura 5.12.c (dar cu partea punctată TF2 și RF1).

În mod similar funcționării în regimul de tracțiune, are loc și în regimul de frânare, conectarea contactoarelor de slăbire a câmpului, comandă realizată în mod automat de automatul programabil cu microprocesor pe baza curentului măsurat permanent de traductorul de curent TI1 și a tensiunii măsurată de traductorul de tensiune TTF1.

Se elimină de la început necesitatea funcționării VTC-ului în cele 4 cadrane, fiind de fapt necesar numai un cadran, pentru că vehiculul oricum se oprește și după aceea își schimbă sensul de mers.

Funcționarea pe rând în cele patru cadrane este de fapt realizată de către contactoarele de linie cu care este dotată schema electrică.

În acest fel, VTC-ul cu motorul de tracțiune funcționează astfel:

–**cadranul I** – pentru tracțiunea la mersul înainte, având atât tensiunea, cât și curentul de același semn, adică pozitiv;

–**cadranul III** – pentru tracțiunea la mersul înapoi, când polaritatea tensiunii și curentului se schimbă și devine de semn contrar cazului anterior, adică negativ;

–**cadranul II** – pentru frânarea la mersul înainte, când polaritatea tensiunii este pozitivă, iar a curentului este negativă;

–**cadranul IV** – pentru frânarea la mersul înapoi, când polaritatea tensiunii este negativă, iar a curentului este pozitivă;

Pentru funcționarea în 2 cadrane se comandă corespunzător contactoarele de schemă, dând astfel posibilitatea funcționării MT atât la tracțiune, cât și la frânare. Trecerea de la regimul de motor la regimul de generator, are loc doar la intervale de timp relativ mari.

5.6. Schema electrică de comandă

5.6.1. Prezentarea instalației electrice de comandă

Schema electrică de comandă conține totalitatea echipamentelor și circuitelor electrice care deservește elementele de comandă atât a tracțiunii și frânării, cât și a celorlalte circuite.

Procesul de comandă al vehiculului și de reglare a vitezei îl face automatul programabil cu microprocesor. Acesta realizează întreaga interconexiune dintre toate elementele componente ale metroului, comandă deschiderea și închiderea contactoarelor de schemă, dar și aprinderea sau stingerea tiristoarelor din VTC.

Organizarea generală a comenzilor electrice pe metrou este prezentată în fig. 5.13.

Din această figură, se poate constata legătura de interdependență care există între automatul programabil cu microprocesor și toate celelalte instalații din dotarea vehiculului. Ele primesc comenzi de la automatul programabil, iar printr-o buclă inversă, îl informează pe acesta în legătură cu starea tuturor elementelor componente.

Variatorul de tensiune continuă și automatul programabil cu microprocesor formează un ansamblu interconectat care asigură în principal următoarele funcțiuni:

- logica generală;
- comutarea schemei de forță cu deschiderea și închiderea contactoarelor atunci când acestea nu sunt în sarcină;
- prioritatea funcționării în regim de frânare față de tracțiune;

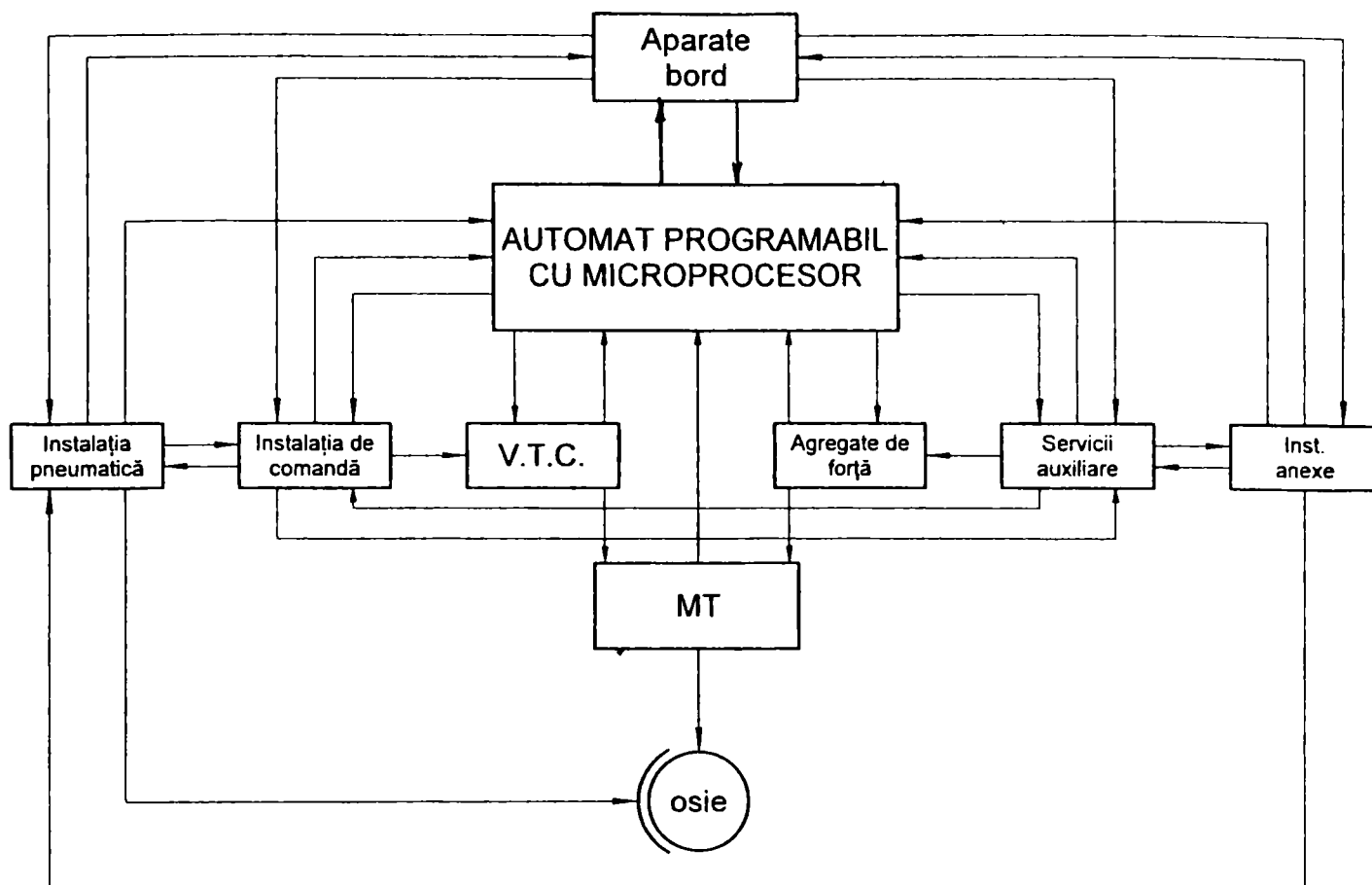


Figura 5.13. Organizarea generală a comenzilor electrice

- comanda și reglarea efortului de tracțiune cu limitarea curentului, adică asigurarea unui curent constant și implicit a unui cuplu constant;
- controlul și reglarea efortului de frânare electrică recuperativă și comutarea automată la frânarea reostatică;
- controlul antipatinării;
- diagnosticarea sistemului de tracțiune.

5.6.2. Comanda și supravegherea instalațiilor de pe metrou cu automat programabil

5.6.2.1. Rolul automatului programabil

Prezența automatului programabil cu microprocesor în cadrul acționărilor electrice atrage după sine o serie de performanțe remarcabile cum ar fi:

- îmbunătățirea funcționării instalației de comandă prin luarea în considerare a anumitor neliniarități funcționale și prin introducerea anumitor reglaje, cum ar fi regimul de curent neîntrerupt;
- îmbunătățirea preciziei comenzii reglării vitezei prin renunțarea la dispozitivele analogice care se pot dereglă în timp și necesită corecții;

- asigurarea operațiilor de diagnosticare a funcționării echipamentelor prin controlul prefuncțional în cazul unor mărimi importante (supracurenți, tensiuni minime, arderea unor siguranțe), prin indicarea avariei și înregistrarea continuă a mărimilor de bază și prin supravegherea unor anumite componente;

- înregistrarea datelor de funcționare (viteză, ore, curenți etc.).

În logica programată, funcționarea sistemului are la bază un program înscris în memorie. Sistemele care lucrează pe bază de program sunt universale și deci flexibile.

Automatul programabil preia sarcinile de comandă pentru porniri, opriri, frânări, inter-blocări, semnalizări de avarie (optice și acustice), pe baza achiziției de informații de la transductoare, prelucrează datele și transmite comenzi către elementele de execuție.

Semnalele prelucrate de către automatul programabil sunt în sistemul Master-Slave (blocând instalația în cazul apariției unei defecțiuni interne).

Automatul programabil cu microprocesor permite comanda de aprindere și stingere a tiristorului, prin fibră optică.

Toate informațiile de ieșire din automatul programabil sunt trecute prin contacte de relee pentru protejarea acestuia. Înaintea unei comenzi, automatul programabil cu microprocesor printr-un tren de impulsuri, verifică starea circuitului pe care urmează să-l alimenteze, putând deosebi 3 cazuri specifice:

- circuit normal;
- circuit întrerupt;
- circuit în scurtcircuit.

În funcție de una dintre aceste stări, are posibilitatea să ia decizii în consecință.

5.6.2.2. Cutia neagră a automatului programabil

Funcția cutiei negre este de a asigura un ajutor eficient în erorile sofisticate de analiză. Înregistrările cutiei negre selectează variabilele unității de control în domeniu timp.

În vederea comparării diferitelor evenimente pe lângă anul, luna și ziua înregistrării evenimentului, se mai dă și ora, minutul, secunda și zecimile de secunde.

Programul unui calculator înregistrat în memoria automatului programabil oferă asistență directă de mari proporții, informând despre comenzile și variabilele disponibile.

Variabilele memorate pot fi:

- starea întrerupătorului automat principal;
- starea protecției hardware;

- starea semnalizării siguranțelor și a altor protecții;
- starea semnalizării defectelor diverse;
- starea VTC - ului;
- starea izolației;
- starea comenzii de deconectare de urgență a întrerupătorului automat principal;
- starea contactului de viteză zero;
- starea încărcării bateriilor de acumuloare;
- starea cutiei negre;
- starea frânei de mână și a funcției "STOP";
- starea pierderii tensiunii de alimentare la automatul programabil.

Aceste variabile rămân în memorie și dacă dispăre sursa de alimentare sau dacă are loc un accident.

Alte câteva mii de semnale pot fi înregistrate în memoria volatilă, la care se poate apela prin intermediul unui laptop. Acesta la rândul lui constituie instrumentul de bază pentru diagnosticare și stabilirea unui defect în timpul funcționării.

5.6.2.3. Funcțiile logice de comandă

Acestea se pot clasifica după modul urmărit în continuare.

a). Intrări analogice referitoare la:

- curentul la motoarele de tracțiune;
- tensiunea pe condensatorul de filtru;
- viteza măsurată la osia motoare;
- referința cuplului de tracțiune (traductor manetă mers);
- referința cuplului de frânare (traductor manetă frână).

b). Intrări digitale prezente prin semnalele "1" și "0" referitoare la:

- tensiunea de la rețea și tensiunea bateriilor de acumuloare;
- contactele auxiliare ale: întrerupătorului automat, contactoarele de linie, contactorului pentru încărcarea condensatorului filtru, contactoarele pentru frânarea înainte și înapoi, contactoarele pentru rezistența adițională de frânare, contactoarele pentru încălzire, contactoarele pentru slăbirea de câmp, contactorul pentru alimentarea sursei de preexcitare, contactorul pentru conectarea sursei statice de tensiune;

- contactele auxiliare ale siguranțelor fuzibile;
- contactele auxiliare ale siguranțelor automate monopolare din circuitele de comandă;
- contactele auxiliare ale siguranțelor automate tripolare din circuitele serviciilor auxiliare;
- contactele manetelor de: mers, frână, manevră înainte și înapoi;

- butoanele de anclanșare și declanșare întrerupător automat principal;
- buna funcționare a VTC - ului;
- buna funcționare a sursei statice de tensiune;
- limitatoarele de cursă ale ușilor pentru accesul pasagerilor;
- presiunea de aer din instalația pneumatică;
- prezența presiunii aerului în cilindrii de frână;
- frână de ținut eliberată;
- izolația corespunzătoare a componentelor din instalația de înaltă tensiune.

c). Ieșiri digitale comandate cu contacte de rele pentru:

- comanda funcționării în regim de tracțiune înainte și înapoi;
- comanda contactorului de linie și preexcitare;
- comanda funcționării în regim de frânare înainte și înapoi;
- comanda contactoarelor adiționale de frânare;
- comanda contactoarelor pentru slăbirea câmpului;
- comanda contactoarelor pentru încălzirea cabinelor de conducere și a salonului de pasageri;
- comanda suprapunerii frânelor de la $V < 5$ km/h;
- comanda semnalizărilor acustice și luminoase a funcției “mers OK”, “frână OK”, “siguranțe și protecții OK”, lipsă tensiune rețea, întrerupător automat principal deconectat.

d). Ieșiri analogice pentru:

- vitezometru;
- contor kilometrii parcurși;

e). Controlul tiristoarelor:

- controlul tiristorului GTO prin fibră optică;
- controlul tiristorului de frânare TF prin impulsuri.

5.6.2.4. Codul erorilor

Automatul programabil este un echipament electronic foarte complex care supraveghează întreaga instalație de comandă și reglare a vehiculului. Din acest motiv, apariția unui defect sau a unei funcționări anormale duce implicit la deconectarea schemei de tracțiune sau frânare. Această deconectare se poate face atât prin întreruperea circuitului electric al motorului de tracțiune prin intermediul VTC – ului, cât și prin intermediul întrerupătorului automat principal.

Stabilirea în parcurs sau în stații a cauzei care a dus la deconectarea de la rețea a instalației electrice, este foarte anevoios de depistat, motiv pentru care automatul programabil este dotat cu o

instalație de stabilire a eventualelor defecte sau erori, conectată la un sistem de afișare pe display cu digiți permițând astfel afișarea lor.

Aceste codificări afișate pot reprezenta o serie de defecte constatate de către automatul programabil și depistate de către acesta înaintea comenzii deconectării instalației electrice de forță de la rețea și sunt redată în continuare:

- deconectarea de urgență a întrerupătorului automat principal datorită unui scurtcircuit;
- eroarea de referință la funcționarea în regim de tracțiune sau frână;
- eroare de software (semnalul de referință pentru curent este în afara domeniului normal);
- protecția hardware intrată în acțiune (protecția simte suprasarcina sau supratensiunea);
- eroare de comandă pentru funcționarea în regim de tracțiune mers sau frână;
- tensiunea de comandă la bateriile de acumulare a scăzut sub o anumită limită sau a crescut peste valoarea maximă admisă;
- defect la VTC sau sursa statică de tensiune;
- defect la contactorul de linie sau contactorul pentru încărcarea condensatorului filtru;
- defect la contactoarele pentru funcționarea în regimul de tracțiune la mersul înainte sau înapoi;
- defect la contactoarele pentru funcționarea în regimul de frânare înainte sau înapoi;
- defect la contactoarele pentru slăbirea câmpului, preexcitare sau contactorul pentru reostatul adițional de frânare;
- defect de gradul 1 pentru starea izolației echipamentelor de înaltă tensiune;
- defect de gradul 2 pentru starea izolației echipamentelor de înaltă tensiune;
- defect la instalația de încălzire, sau supraîncălzirea acesteia;
- defect la acționarea serviciilor auxiliare 3x380 Vca;
- defect la siguranțele fuzibile de joasă tensiune sau înaltă tensiune;
- defect în circuitele de comandă;
- suprasarcină, supratensiune sau viteza maximă depășită.

Dacă în baza codului de erori, nu se poate constata cauza defectului, se intervine cu un laptop pentru depistarea succesiunii operațiilor care au dus la apariția defectului.

5.7. Concluzii

Acest capitol este util pentru că aici se face descrierea schemei principale de acționare, alese din multitudinea schemelor principale existente în literatura de specialitate, și prezentarea schemei electrice de acționare realizată de către autor.

Autorul propune pentru acest sistem de acționare cu VTC, același motor de tracțiune de curent continuu, dar în varianta modernizată (vezi subcapitolul 2.2). Această variantă, pe lângă creșterea fiabilității în exploatare, mai are avantajul deplasării în sus a caracteristicii naturale de turația $n(I)$, care permite creșterea timpului de funcționare cu accelerație constantă. În acest fel, are loc o reducere a șocurilor, dar și o îmbunătățire a confortului pentru pasageri.

Construcția VTC-ului este propus de către autor să se realizeze în țară, cu tiristoare GTO fabricate de către firme specializate din străinătate, iar conductoarele și contactoarele de schemă vor fi și ele importate. Alte componente ca: inductivitatea de intrare, inductivitatea din circuitul serie al MT, asamblarea condensatorului filtru rețea, sursa statică de preexcitare, întrerupătorul automat ultrarapid, siguranțele fuzibile ultrarapide și convertorul static al serviciilor auxiliare pot fi construite în țară.

Alimentare motorului de tracțiune se face la un curent pulsatoriu, motiv pentru care în motor au loc solicitări suplimentare de natură mecanică, termică și electrică.

Puterea de durată a motorului electric de tracțiune s-a determinat prin egalarea energiei pierdute în timpul demarajului și frânării, cu energia pierdută, dacă motorul de tracțiune ar fi solicitat continuu la curentul de durată.

A rezultat în acest fel dependența puterii de: viteza de demaraj, accelerația de demaraj, distanța dintre stații, timpul de staționare și masa vehiculului. Această dependență a fost calculată de către autor și reprezentată grafic. Aceeași dependență a rezultat și pentru viteza comercială (vezi subcapitolul 5.3.1).

Folosind pentru dimensionarea filtrului rețea (inductivitate și condensator) relații de calcul date în literatura de specialitate, autorul a calculat aceste valori pentru mai multe variabile prezentând astfel diagramele obținute (vezi subcapitolul 5.3.2).

Din studiul pe care autorul l-a făcut, referitor la aceleași componente fabricate deja pentru un motor de tracțiune de 150 kW, a rezultat valori foarte apropiate față de cele calculate.

Odată cu trecerea timpului, s-au constatat o serie de probleme apărute în exploatare la tiristoarelor din VTC (constatări făcute de către specialiștii în domeniu). O problemă foarte importantă este evacuarea căldurii și răcirea tiristoarelor, de care trebuie să se țină

seama la proiectarea unui VTC, motiv pentru care este necesar răcirea forțată a acestora.

Nu în ultimul rând, trebuie avut în vedere și protecția tiristoarelor la suprasarcini și supratensiuni.

Schema electrică a circuitului de forță prezentată este concepută de autor în așa fel, încât să țină seama de toate condițiile de mers referitoare la funcționare în regimul de tracțiune în ambele sensuri (ambele sensuri de rotație ale motorului de tracțiune), funcționare în regimul de frânare în ambele sensuri (atât recuperativă, cât și reostatică) și evitarea întreruperii curentului prin motor.

Având în vedere existența substațiilor de tracțiune actuale, care nu permit trecerea energiei electrice în sistemul energetic național, vehiculul trebuie să fie dotat și cu un sistem de frânare reostatică.

Schema electrică propusă de autor folosind tiristoare GTO este foarte simplă, conținând astfel numai un tiristor. Al doilea tiristor folosit în circuitul de frânare este doar cu rol de contactor.

Comanda reglării vitezei se poate face cu automat programabil cu microprocesor, iar aprinderea tiristorului principal se realizează cu fibră optică. Rolul și scopul automatului programabil este și de a simplifica foarte mult alte instalații electrice din circuitul de comandă, de a permite afișarea unor erori și de a ușura diagnosticarea defectelor, în baza informațiilor acumulate în memorie, accesându-le la un terminal ușor de manevrat cum este laptopul.

Capitolul 6

Încercările experimentale

6.1. Prezentarea instalației

Încercările experimentale efectuate au avut drept scop verificarea rezultatelor teoretice privind modul de reglare al vitezei vehiculului, în conformitate cu toți parametrii impuși sistemului. Ele au fost realizate cu ajutorul unui stand de încercări pe un model experimental, în laboratorul de încercări al firmei GANZ ANSALDO din Budapesta, din care a făcut parte: motorul de tracțiune de 150 kW (apropiat de cel al unei rame de metrou care este de 185 kW), inductivitatea din circuitul serie al motorului LM, inductivitatea filtrului de intrare LR, condensatorul filtru CF și VTC-ul, alese în concordanță cu modul de funcționare și puterea cerută de vehiculul motor. Schema principială a instalației pentru încercările modelului experimental este prezentată în figura 6.1.

Elementele principale ale acestei instalații sunt echipamentele de tracțiune și de comandă, necesare unui sistem de acționare cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei cu variator de tensiune continuă.

Potrivit figurii 6.1, ele se împart în două categorii:

a). **ENM – Echipamente necesare metroului:**

MT – motorul de tracțiune de curent continuu cu excitație serie;

VTC – variatorul de tensiune continuă;

LM – inductivitatea din circuitul serie a motorului de tracțiune (inductivitatea de netezire);

LR – inductivitatea filtrului de intrare în instalația electrică de forță;

CF – condensatorul filtrului de rețea;

IAR – întrerupătorul automat rapid;

RF – reostatul de frânare;

AR – alimentarea cu energie electrică de la rețea;

AP – automatul programabil cu microprocesor;

AC – aparate de comandă;

C – calculator.

b). **ESpSI – Echipamente specifice unui stand de încercări**

Ele sunt necesare încărcării cu sarcină a motorului de tracțiune, precum și alte echipamente care permit funcționarea mașinii electrice, și în regim de generator.

Acestea sunt:

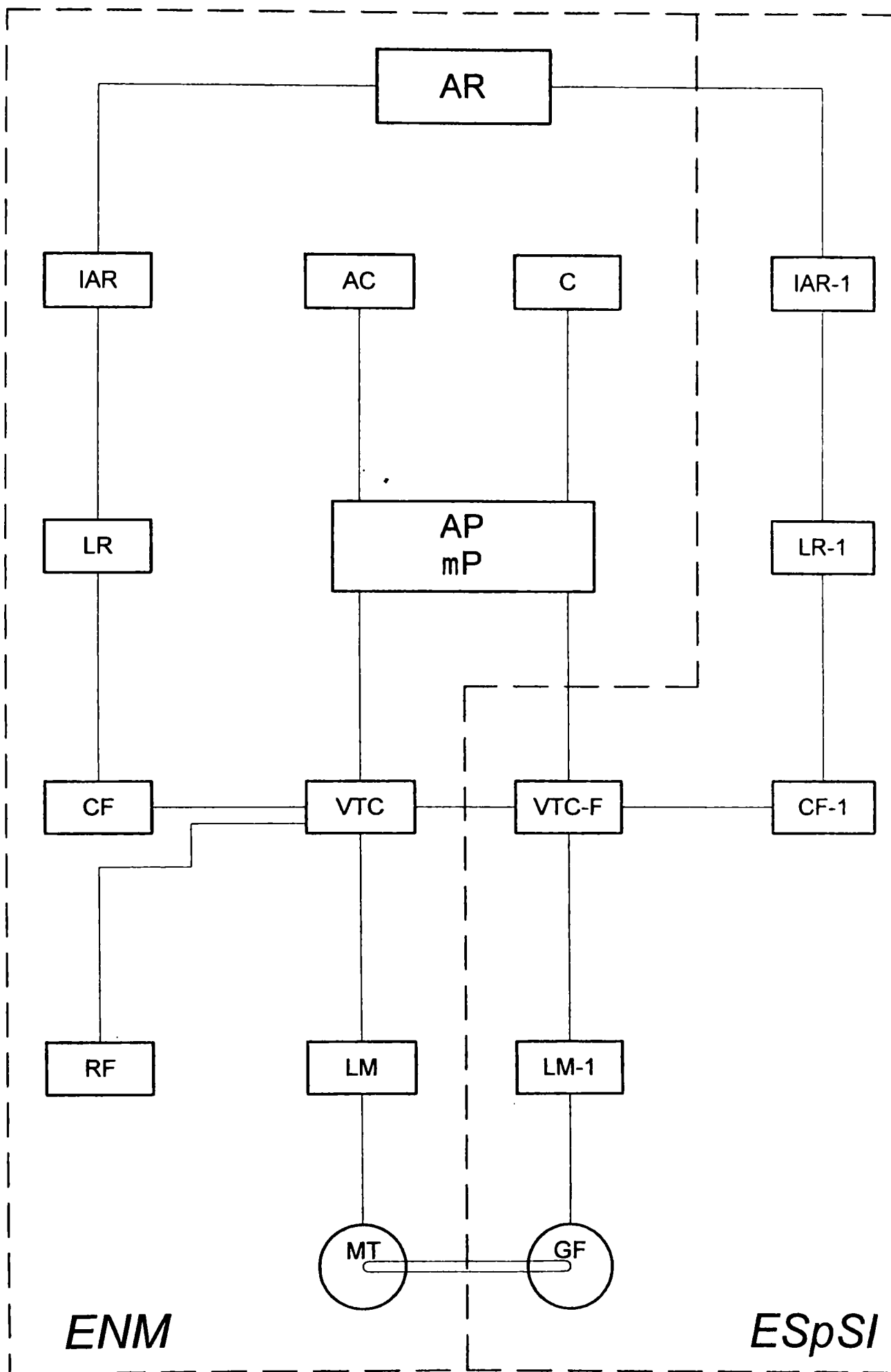


Figura 6.1. Componenta standului pentru modelul experimental

GF – generatorul de frânare de curent continuu cu excitație serie (creează cuplul de frânare);

VTC-F – variatorul de tensiune continuă pentru frânare;

LM-1 – inductivitatea din circuitul serie al generatorului de frânare;

LR-1 – inductivitatea filtrului de intrare în instalația electrică de forță a generatorului de frânare;

CF-1 – condensatorul filtrului din circuitul generatorului de frânare;

IAR-1 – întrerupătorul automat rapid al generatorului de frânare.

Legătura dintre motorul de tracțiune și generatorul de frânare s-a realizat printr-un cuplaj elastic.

Funcționarea mașinii electrice în regim de motor are loc alimentând instalația de la rețea prin întrerupătorul automat rapid IAR, prin inductivitatea LR, prin condensatorul filtru CF, prin VTC și prin inductivitatea LM.

Energia electrică debitată de generatorul de frânare GF cuplat direct cu motorul de tracțiune MT este recuperată și trimisă la rețea prin inductivitatea LM-1, prin VTC-F, prin condensatorul filtru CF-1, prin inductivitatea LR-1 și prin întrerupătorul automat rapid IAR-1.

Cu ajutorul calculatorului C, al automatului programabil AP și a aparaturii de comandă AC, se poate comanda modificarea turației motorului de tracțiune de la zero până la valoarea maximă. De asemenea, poate fi menținută constantă orice turație din această gamă.

Funcționarea aceleiași mașini electrice MT în regim de generator este realizată prin alimentarea generatorului GF de la rețea și funcționarea lui în regim de motor. În acest fel, energia electrică de la rețea ajunge la mașina electrică GF prin întrerupătorul automat IA-1 prin inductivitatea LR-1, prin condensatorul filtru CF-1, prin VTC-F și prin inductivitatea LM-1 (conform figurii 6.1).

Energia electrică debitată de mașina MT este recuperată și trimisă la rețea prin LM, VTC, CF, LR, IAR și AR. Pentru realizarea frânării reostatice, variatorul de tensiune continuă VTC are posibilitatea disipării energiei electrice pe reostatul de frânare RF.

Cu ajutorul generatorului de frânare GF și a variatorului de tensiune continuă pentru frânare VTC-F, se poate realiza toată gama forțelor de frânare $F_0(v)$ întâlnite în funcționarea normală, deci se poate încărca motorul de tracțiune la orice curent stabilit anterior.

6.2. Funcționarea instalației de forță

Schema principială a instalației electrice de forță este prezentată în figura 6.2.

Față de componentele prezentate în figura 6.1, în această figură s-au mai făcut următoarele notații:

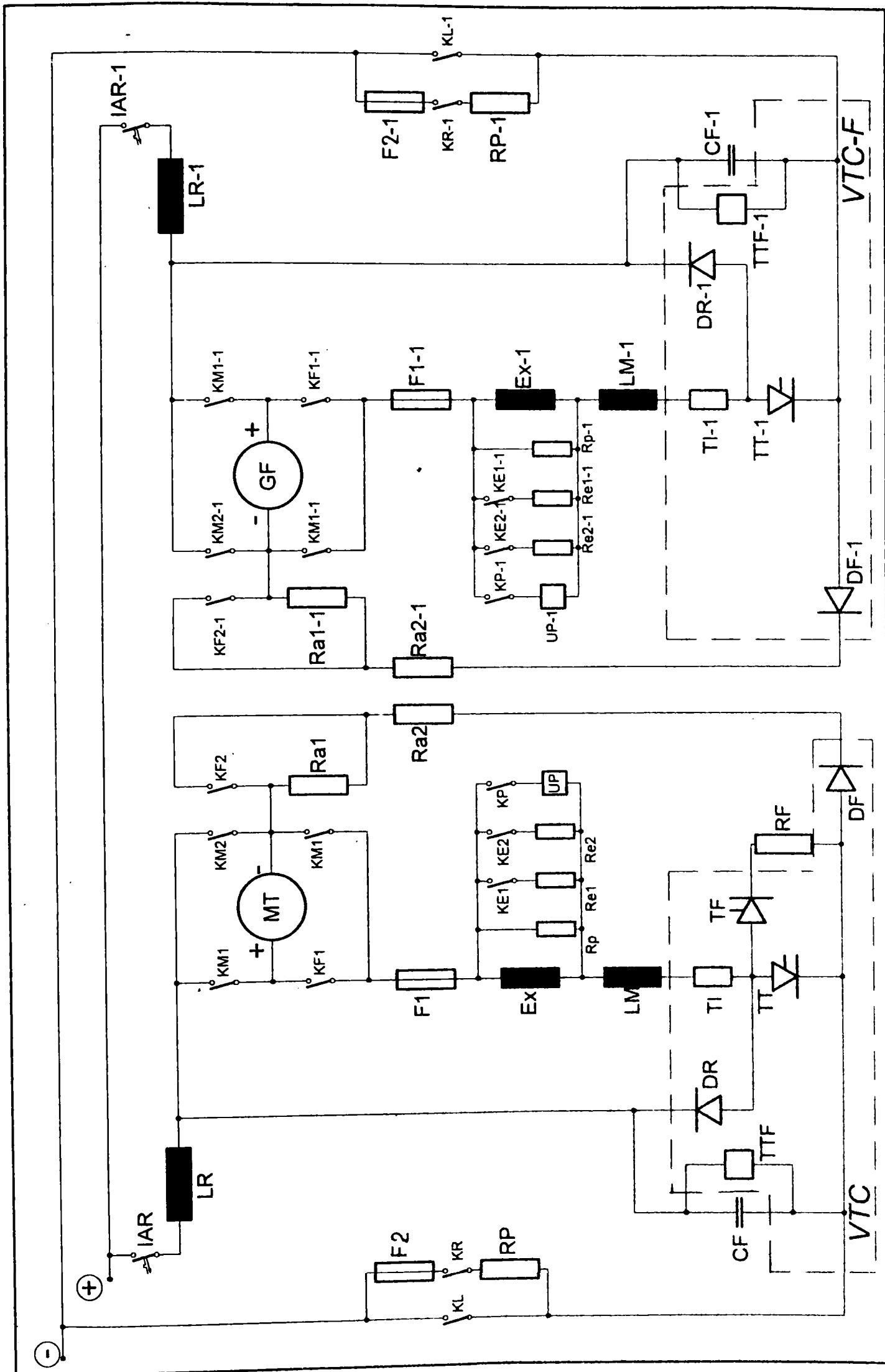


Figura 6.2. Schema electrică de forță a standului

DR --dioda de fugă și recuperare;

DF – dioda din circuitul de frânare;

F1 – siguranță fuzibilă rapidă pentru circuitul de forță (în serie cu MT);

F2 – siguranță fuzibilă rapidă pentru încărcarea inițială a condensatorului;

KM1 – contactor pentru funcționarea motorului în regim de tracțiune într-un sens;

KM2 – contactor pentru funcționarea motorului în regim de tracțiune în sens invers;

KF1 – contactor pentru funcționarea motorului în regim de frânare, și tracțiune în sens invers;

KE1 – contactor pentru slăbirea de câmp treapta 1;

KE2 – contactor pentru slăbirea de câmp treapta 2;

KP – contactor pentru conectarea sursei de preexcitare la amorsarea procesului de frânare electrică;

KL – contactor de linie;

KR – contactor pentru încărcarea inițială a condensatorului filtru CF;

RP – rezistența de protecție la încărcarea inițială a condensatorului filtru;

Re1 – reostat pentru slăbirea câmpului treapta 1;

Re2 – reostat pentru slăbirea câmpului treapta 2;

Rp – rezistența de protecție la tensiunea di/dt , produsă de înfășurarea excitației;

Ra1 – reostat adițional pentru frânarea reostatică;

Ra2 –reostat adițional conectat în circuitul electric de frânare pentru reducerea curentului;

TI – traductorul de curent;

TTF – traductorul de tensiune pentru filtru CF (conectat la bornele acestuia);

TT – tiristorul pentru tracțiune GTO;

TF – tiristorul pentru frânare, serie uzuală;

UP – sursa statică de preexcitare pentru amorsarea procesului de frânare electrică;

VTC – variator de tensiune continuă;

Componentele instalației de forță pentru generatorul de frânare sunt identice, dar mai primesc alăturat în notație cifra 1.

Singura diferență este faptul că aici lipsește tiristorul de frânare reostatică și reostatul de frânare (ele nefiind necesare).

6.2.1. Funcționare standului cu MT în regim de tracțiune

Această funcționare se referă la partea componentă a standului, unde sunt încercate agregatele ce urmează să echipeze vehiculul electric, ele funcționând pentru regimul de tracțiune al mașinii electrice.

Alimentarea mașinii electrice se face de la rețea prin întrerupătorul automat IAR și inductivitatea LR. Pentru rotirea motorului într-un sens, se închide contactorul KM1, iar pentru sensul opus KM2 și KF1 (KF1 conectează atât la funcționarea MT în regim de frânare, cât și în regim de tracțiune, având rolul de a menține sensul dorit de circulație a curentului prin rotorul mașinii electrice, în concordanță cu sensul tensiunii electromotoare E). Curentul trece apoi prin siguranța F1, excitația motorului Ex, inductivitatea LM, traductorul de curent TI. După ce parcurge tiristorul de tracțiune TT, curentul se închide prin contactorul de linie KL la minusul sursei de alimentare.

Atunci când tiristorul de tracțiune este blocat, curentul motorului se închide prin dioda DR, cu rol în acest caz de diodă de fugă.

La punerea motorului electric MT sub tensiune, acesta va antrena generatorul de frânare GF.

Energia electrică debitată de generator ajunge la rețea și în acest fel se creează un cuplu de frânare pentru motorul de tracțiune.

Circuitul electric al curentului debitat la rețea este următorul: de la plusul mașinii GF, prin contactorul KF1-1, prin siguranța F1-1, prin excitația Ex-1, prin traductorul de curent TI-1, prin dioda de recuperare DR-1, prin inductivitatea LR-1, iar prin întrerupătorul automat IAR-1 ajunge la plusul rețelei de alimentare. De aici prin posibilul consumator (care este chiar motorul de tracțiune), curentul se închide prin circuitul de minus, prin contactorul de linie KL-1, prin dioda de frânare DF-1, reostatul adițional Ra2-1, contactorul KF-2 și apoi la minusul generatorului GF.

Când tiristorul TT-1 este deschis, circuitul se închide prin acesta și apoi prin dioda DF-1, reostatul Ra2-1 și contactorul KF-2.

6.2.2. Funcționarea standului cu MT în regim de frânare

În această situație, rolul celor două mașini electrice se inversează, adică MT devine generator, iar GF devine motor.

Pentru frânarea electrică recuperativă, circuitul curentului este același ca și în cazul descris anterior, dar de la motorul de tracțiune MT borna plus, circuitul se închide prin consumatorul existent și apoi se întoarce la borna minus a MT.

Pentru testarea frânării electrice reostatice, se comandă tiristorul de frânare TF, care introduce în circuit reostatul RF, iar curentul se întoarce la minusul mașinii electrice prin Ra2 respectiv Ra1.

Comanda treptelor pentru slăbirea câmpului se face atât în regim de generator, cât și în regim de motor, prin intermediul contactoarelor KE1, KE2 și a reostatelor Re1 și Re2.

Schimbarea sensului de rotație al mașinii electrice GF se face prin conectarea contactorului KM1-1 pentru un sens, respectiv a contactoarelor KM2-1 și KF1-1, pentru celălalt sens.

Având în vedere faptul că și în regim de frânare excitația generatorului este serie, în paralel cu aceasta s-a montat o sursă statică de preexcitare UP, capabilă să mențină un curent de 100A timp de 5 secunde la începutul frânării electrice pentru amorsarea procesului.

Sursa de preexcitare UP este o sursă statică, alimentată în curent continuu de la bateria de acumuloare de 24 Vcc. Conectarea și deconectarea ei se face în mod automat de către automatul programabil.

Trecerea de la un regim de funcționare la altul se face prin intermediul manetelor din aparatura de comandă, fără să fie necesară oprirea mașinilor electrice.

6.3. Amplasarea aparaturii de măsură

Schema electrică a aparaturii de măsură este prezentată în figura 6.3, unde s-au făcut (suplimentar față de figurile prezentate anterior), următoarele notații:

TTR – traductor de măsură pentru tensiunea de la rețea;

TTF – traductor de măsură pentru tensiunea la condensatorul filtrului din circuitul MT;

TI – traductor de curent din circuitul MT;

TG – tahogenerator (traductor de viteză inductiv);

TTR-1 – traductor tensiune rețea pentru GF;

TTF-1 – traductor de măsură pentru tensiunea la condensatorul filtrului din circuitul GF;

TI-1 – traductorul de curent al GF;

AP- μ P – automat programabil cu microprocesor;

V – vitezometru;

A – ampermetru pentru MT;

A-1 – ampermetru pentru GF;

C – calculator;

M – monitor.

Toate informațiile referitoare la parametrii mășurați sunt transmise către automatul programabil AP, iar unele dintre ele sunt și afișate direct după cum urmează: curentul parcurs prin mașina MT, atât în regim de tracțiune, cât și frânare, curentul parcurs prin mașina GF în regim de tracțiune și frânare, precum și viteza vehiculului.

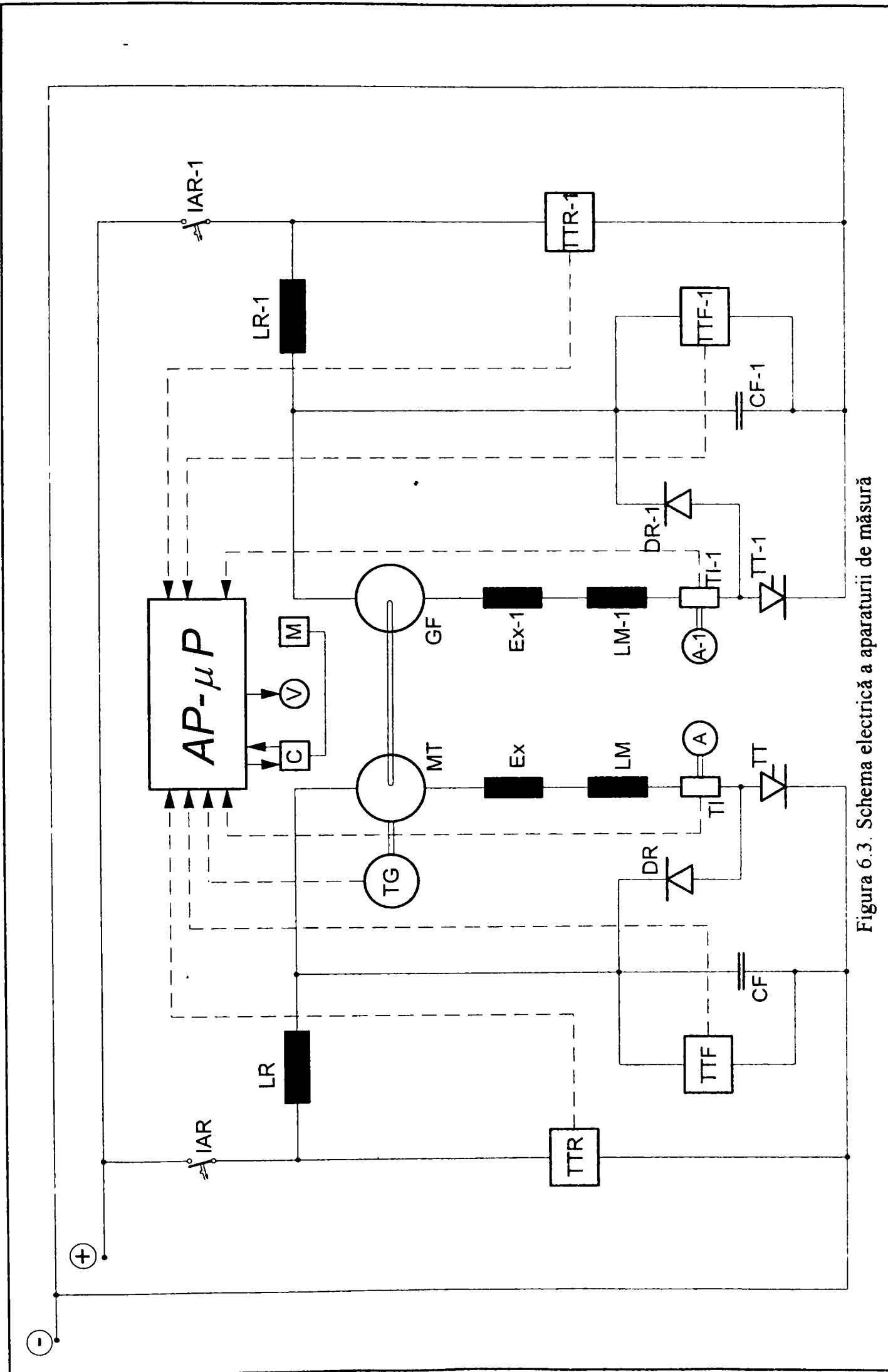


Figura 6.3. Schema electrică a aparatului de măsură

Prin intermediul calculatorului și a monitorului pot fi afișate pe ecran toate mărimile măsurate sau impuse prin schemă.

În același timp în memoria automatului programabil AP și a calculatorului C, pot fi stocate foarte multe informații apărute în desfășurarea procesului, dar mai ales cele ale fenomenelor tranzitorii.

Acestea vor sta la baza analizărilor și deciziilor referitoare la eventualele modificări precum și la proiectarea instalațiilor de forță și de comandă pentru prototip.

6.4. Schema electrică de comandă a standului

Schema electrică de comandă a fost realizată de către autor și se compune din totalitatea circuitelor pentru alimentarea contactoarelor din schema electrică de forță, totalitatea informațiilor care intră în automatul programabil AP, precum și totalitatea ieșirilor din automatul programabil care duc spre VTC și spre aparatura de supraveghere și de forță, în concluzie interfața sistemului de comandă pentru automatul programabil.

Componentele aparaturii de comandă și supraveghere sunt:

- butoane și întrerupătoare cu contacte normal închise NI și normal deschise ND, pentru diferitele comenzi;

- maneta cu traductorul inductiv pentru accelerare, respectiv pentru frânare;

- comutator pentru preselecția vitezei de circulație și a sensului de mers (viteză normală înainte sau înapoi și diferite trepte de viteză pentru realizarea manevrelor);

- limitatoare de cursă de simulare a ușilor pentru accesul călătorilor, în pozițiile închise sau deschise;

- lămpi pentru avertizarea avariilor atenționare sau buna funcționare (cu dispersoare colorate în verde, roșu și galben);

- pedala pentru dispozitivul de siguranță și vigilență "om mort";

- vitezometrul cu indicatorul vitezei de circulație și a spațiului parcurs în Km;

- indicatorul orelor de funcționare al VTC-ului;

- avertizoare sonore în caz de avarii;

- relee intermediare pentru realizarea circuitelor de comandă a contactoarelor;

- relee intermediare de timp pentru realizarea diferitelor temporizări ale circuitelor electrice exterioare automatului programabil;

- sursa de tensiune pentru circuitul de comandă compusă din bateriile de acumulare la tensiunea de 24 Vcc, precum și sursa statică pentru realizarea altor tensiunii;

- dispozitive pentru supravegherea izolației circuitelor de forță;

- siguranțe monopolare automate pentru protecția tuturor circuitelor de comandă;

- siguranțe fuzibile pentru protecția circuitelor de încărcare a bateriilor de acumulare;

- contactoare pentru conectarea consumatorilor auxiliari;

- diode de sens pentru circuitele auxiliare și de comandă;

- șir de cleme și conductoare de legătură.

Schema electrică de comandă a standului este reprezentată în figura 6.4, cu notațiile prezentate în continuare:

a1 – bateriile de acumulare;

AP – automatul programabil cu microprocesor;

Aki – contactele de relee din AP pentru comanda diferitelor contactoare;

Bki – contactele de relee din automatul programabil pentru comanda semnalizărilor;

Cki – contactele de relee din automatul programabil pentru comanda altor instalații;

Fc – siguranță fuzibilă pentru consumatorii din bateriile de acumulare;

Fî – siguranță fuzibilă pentru încărcarea bateriilor de acumulare;

fo – fibră optică;

H1 – lampă de semnalizare pentru IAR conectat;

H2 – buzer de semnalizare pentru lipsă tensiune de 750 Vcc;

H3 – lampă de semnalizare pentru bateriile de acumulare descărcate;

H4 – lampă de semnalizare pentru defect instalație VTC;

H5 – lampă de semnalizare pentru lipsă tensiune 750V;

H6 – lampă de semnalizare pentru siguranțe fuzibile arse;

H7 – lampă de semnalizare pentru siguranțe automate deconectate;

H8 – lampă de semnalizare pentru izolație străpunsă;

KA1, KA2 – relee de comandă pentru conectarea întrerupătorului automat rapid;

KAt1 – releu de timp pentru comanda conectării IAR;

Kb – contactor pentru conectarea bateriilor de acumulare;

KL – contactor de linie;

KR – contactor pentru încărcare inițială a condensatorului filtru;

KM1 – contactor pentru funcționarea MT în regim de tracțiunea înainte;

KM2 – contactor pentru funcționarea MT în regim tracțiunea înapoi;

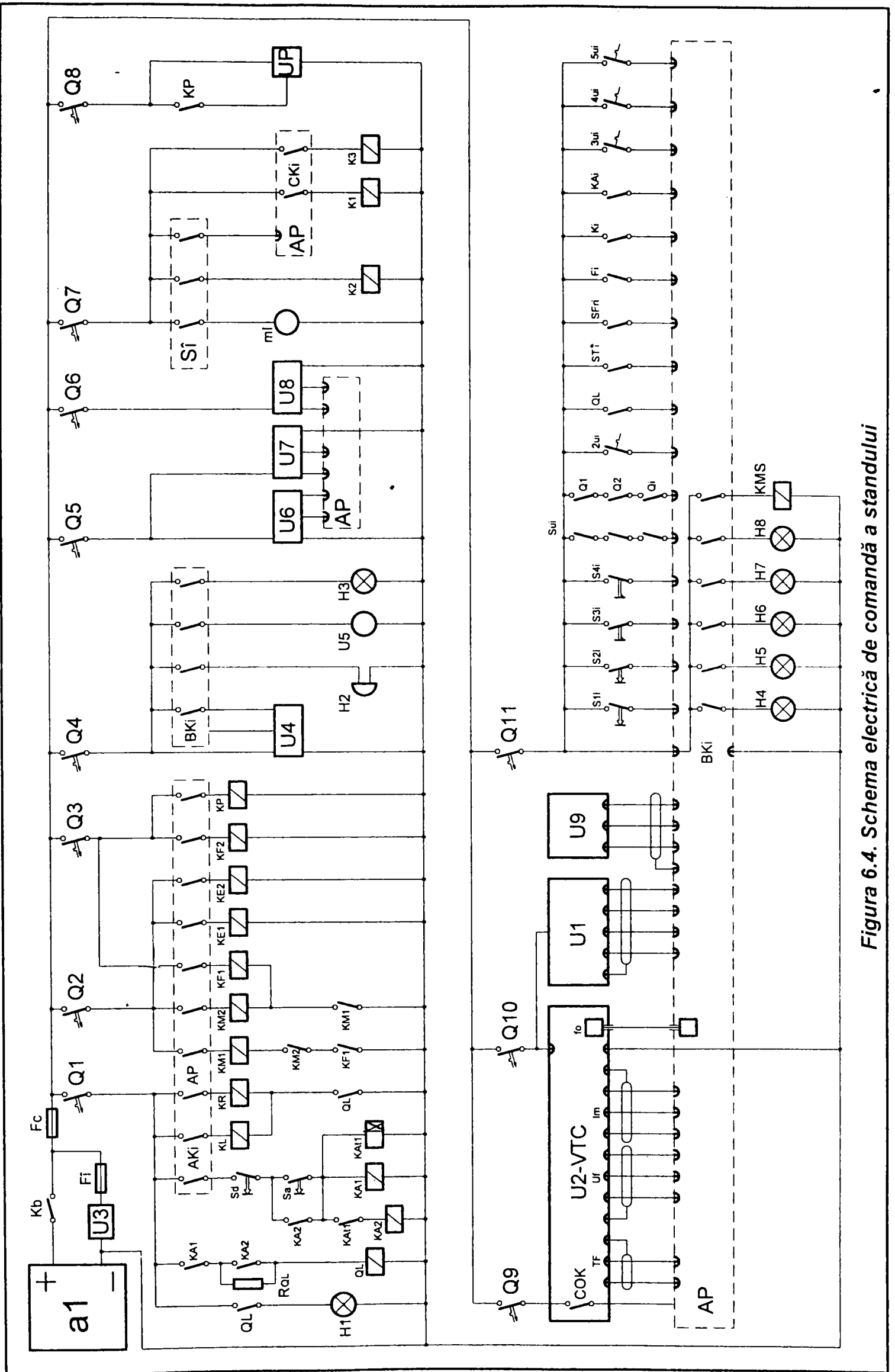


Figura 6.4. Schema electrică de comandă a standului

KF1 – contactor pentru funcționarea MT în regim frânare;
 KF2 – contactor pentru conectarea reostatului adițional de frânare;
 KE1 – contactor pentru slăbirea câmpului treapta 1;
 KE2 – contactor pentru slăbirea câmpului treapta 2;
 KP – contactor pentru conectarea sursei de preexcitare;
 KMS – releu pentru stop (menține MT frânat electropneumatic până la depășirea curentului de 100 A, la punerea în mișcare a vehiculului);
 K1, K2, K3 – contactoare pentru conectarea reostatelor de încălzire, din cabinele de conducere și din salonul de pasageri;
 mI – motor pentru ventilatorul de încălzire;
 RQL – rezistența de protecție;
 Sd – buton pentru deconectarea întrerupătorului automat rapid QL;
 Sa – buton pentru anclanșarea întrerupătorului automat rapid QL;
 Sî – comutator pentru comanda încălzirii vehiculului;
 S1i – butoane de comandă cu contacte NI cu revenire;
 S2i – butoane de comandă cu contacte ND cu revenire;
 S3i – butoane de comandă cu contacte ND cu reținere;
 S4i – butoane de comandă cu contacte NI cu reținere;
 Sui – limitatoare de cursă pentru uși;
 STi – contacte auxiliare ale contactoarelor pentru funcționarea MT în regim de tracțiune;
 SFri – contacte auxiliare ale contactoarelor pentru funcționarea MT în regim de frânare;
 SFi – contacte auxiliare ale siguranțelor fuzibile;
 SKi – contacte auxiliare ale contactoarelor pentru “alte servicii”
 SKAi – contacte auxiliare ale releelor de comandă;
 U1 – traductor tensiune rețea;
 U2 – variator de tensiune continuă (partea de comandă);
 U3 – sursă statică de tensiune;
 U4 – indicatorul de viteză;
 U5 – indicatorul orelor de funcționare a VTC-ului;
 U6 – traductor inductiv pentru comanda funcționării MT în regim tracțiune;
 U7 – traductor inductiv pentru comanda funcționării MT în regim frânare;
 U8 – traductor inductiv pentru protecția împotriva străpungerilor a agregatelor și conductoarelor din circuitul de înaltă tensiune;
 U9 – traductor de turație;
 UP – sursă de preexcitare pentru amorsarea procesului de frânare;

- 2ui – protecția termică a siguranțelor automate trifazate ;
- 3ui – protecția termică a încălzitoarelor din vehicul;
- 4ui – protecția termică motoarelor de tracțiune;
- 5ui – protecția termică a motoarelor serviciilor auxiliare;
- QL – întrerupătorul automat rapid;
- Q1-Q11 – siguranțele automate monopolare.

Din analiza schemei, rezultă și modul de funcționare. Se poate astfel constata că toate circuitele sunt protejate de siguranțe automate monopolare respectiv fuzibile (pentru curenți mari).

Comanda contactoarelor pentru funcționarea MT în regim tracțiune, frânare sau pentru alte servicii auxiliare, împreună cu comanda semnalizărilor se realizează de către automatul programabil AP prin contacte de rele interne.

Informațiile între automatul programabil AP și VTC se transmit prin conductoare ecranate. Acestea sunt în principiu informații referitoare la tensiunea pe condensatorul filtrului CF, curentul prin motorul de tracțiune, comanda tiristorului de frânare și altele.

Comanda tiristorului de tracțiune se face prin fibră optică *fo*.

Informațiile referitoare la tensiunea rețelei U1 și turația motorului de tracțiune U8 (adică viteza vehiculului) sunt transmise prin semnale analogice către automatul programabil AP.

De la siguranța automată Q5 respectiv Q6, se transmit la AP (prin traductoarele inductive U6, U7 și U8), semnale analogice referitoare la comanda accelerației (tracțiune), decelerației (frânare) respectiv protecția izolației componentelor de forță.

Toate butoanele aparaturii de comandă transmit informații către AP, atât prin contacte NI, cât și prin ND, după caz.

Limitatoarele de cursă ale ușilor închise sau deschise (simulatoarele acestora pe stand) transmit de asemenea informații la AP. Informații mai sunt transmise și de către:

- siguranțele monopolare de protecție Qi și tripolare 2ui;
- întrerupătorul automat QL;
- contactele auxiliare ale siguranțelor fuzibile rapide din circuitul de forță.

În categoria “alte servicii” enunțată anterior intră și motoarele ventilatoarelor pentru răcirea reostatului de frânare, răcirea VTC-ului respectiv a sursei statice de tensiune.

Toate informațiile de intrare și ieșire din automatul programabil sunt înregistrate în memoria acestuia, dând astfel posibilitatea accesării lor prin calculatorul și monitorul atașat. În acest fel, pot fi stabilite succesiunea în timp a unor semnale și în cazul fenomenelor tranzitorii, putându-se interveni în modificarea instalației electrice de comandă și tracțiune a standului, dar și a prototipului.

În cadrul aparaturii de comandă, mai există și o serie de aparate indicatoare a temperaturii diferitelor componente din instalația de forță cum sunt: motorul de tracțiune, VTC-urile, inductivitățile și reostatele de frânare. Acestea sunt aparate distincte care măsoară și afișează temperatura componentelor respective, altele decât cele care transmit aceste informații automatului programabil AP.

Specificația de echipament folosită la realizarea standului (simbolul, denumirea, caracteristicile tehnice, tipul, codul, furnizorul și numărul de bucăți), sunt prezentate în ANEXA III.

6.5. Prezentarea componentelor standului

Hala în care s-au făcut încercările modelului experimental, a fost destinată și altor probe, motiv pentru care componentele standului nu au fost plasate într-un grup compact, ci dispersate după cum se va vedea în continuare.

În figura 6.5. este prezentat variatorul de tensiune continuă și amplasarea lui.



Figura 6.5. Variatorul de tensiune continuă VTC

VTC-ul este o construcție compactă cu posibilitatea de ventilare forțată în vederea răcirii componentelor electronice de putere.

Așa cum se constată din figură, la un capăt sunt realizate toate conexiunile pentru înaltă tensiune, iar la capătul opus cele pentru joasa tensiune împreună cu conectorul circular pentru realizarea legăturilor. Tot prin partea opusă intră în VTC și fibra optică pentru comanda tiristorului GTO. Conexiunile pentru circuitul de forță între VTC și conductoare, este realizată cu papuci din cupru sertizați și șuruburi M10.

În figura 6.6 este prezentat VTC-F și deasupra lui VTC dar văzut din partea opusă.



Figura 6.6. Variatorul de tensiune continuă pentru frânare VTC-F

Dimensiunea VTC-F este mult mai mare decât a VTC-ului, cu el având posibilitatea să se facă încercări și pentru alte tipuri de motoare de tracțiune. Tot în această figură se mai poate vedea și capătul opus al VTC-ului cu legăturile circuitului de comandă și fibra optică.

Ansamblul contactoarelor prezentate în figura 6.7 și 6.8 conține totalitatea aparatelor de comutație electromecanică, a întrerupătoarelor automate rapide de protecție și structurilor metalice pentru susținerea acestora.



Figura 6.7. Ansamblul contactoarelor

Datorită impedențelor diferite ale contactoarelor și a influențelor acestora asupra componentelor din automatul programabil, este de preferat ca aparatele de comutație (comandate de AP) folosite pe standul de încercări să fie aceleași cu cele care urmează să fie montate pe vehiculul prototip și pe vehiculele din producția de serie.

Contactoarele din aceste figuri sunt cele care au fost prezentate în schema electrică de forță din figura 6.2. În figura 6.8, alături de contactoare, se mai văd și reostatele de frânare RF.

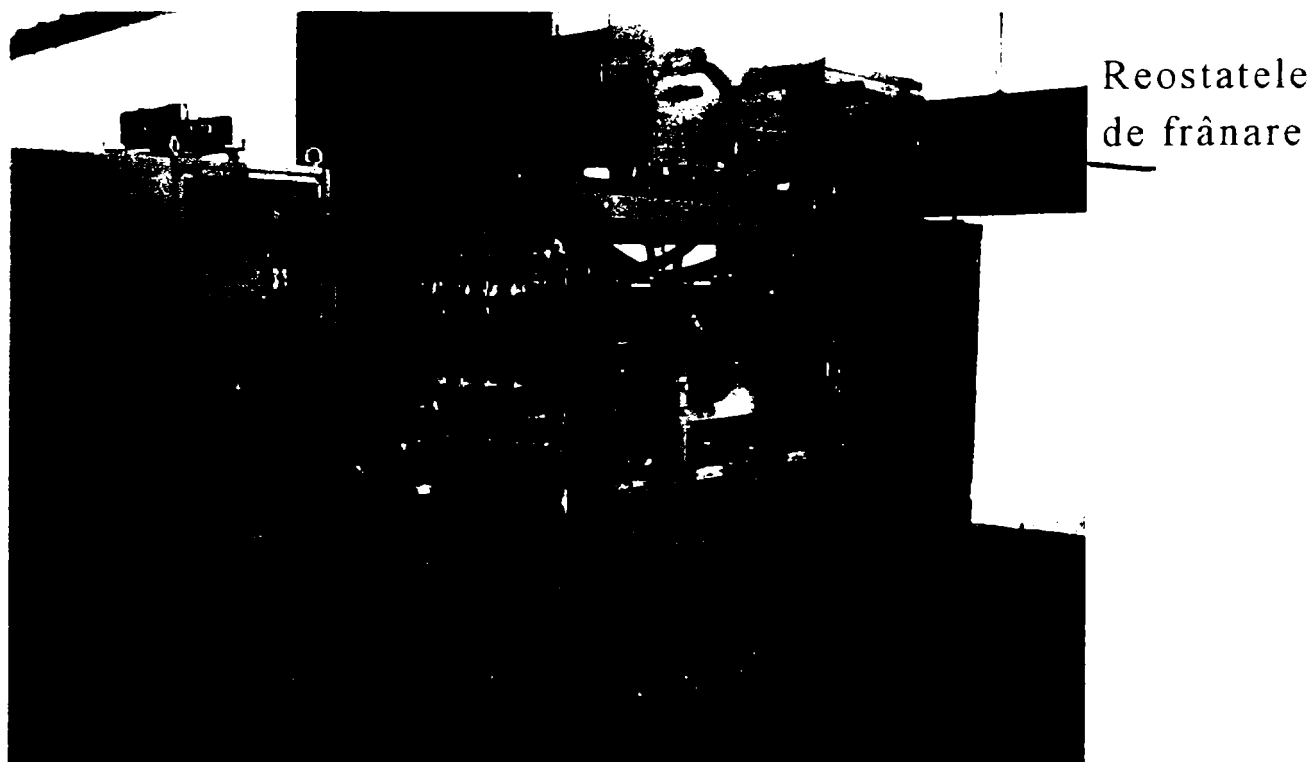


Figura 6.8. Ansamblul contactoarelor și reostatelor

Inductivitățile LR, LM, și condensatorul filtru CF sunt prezentate în figura 6.9.

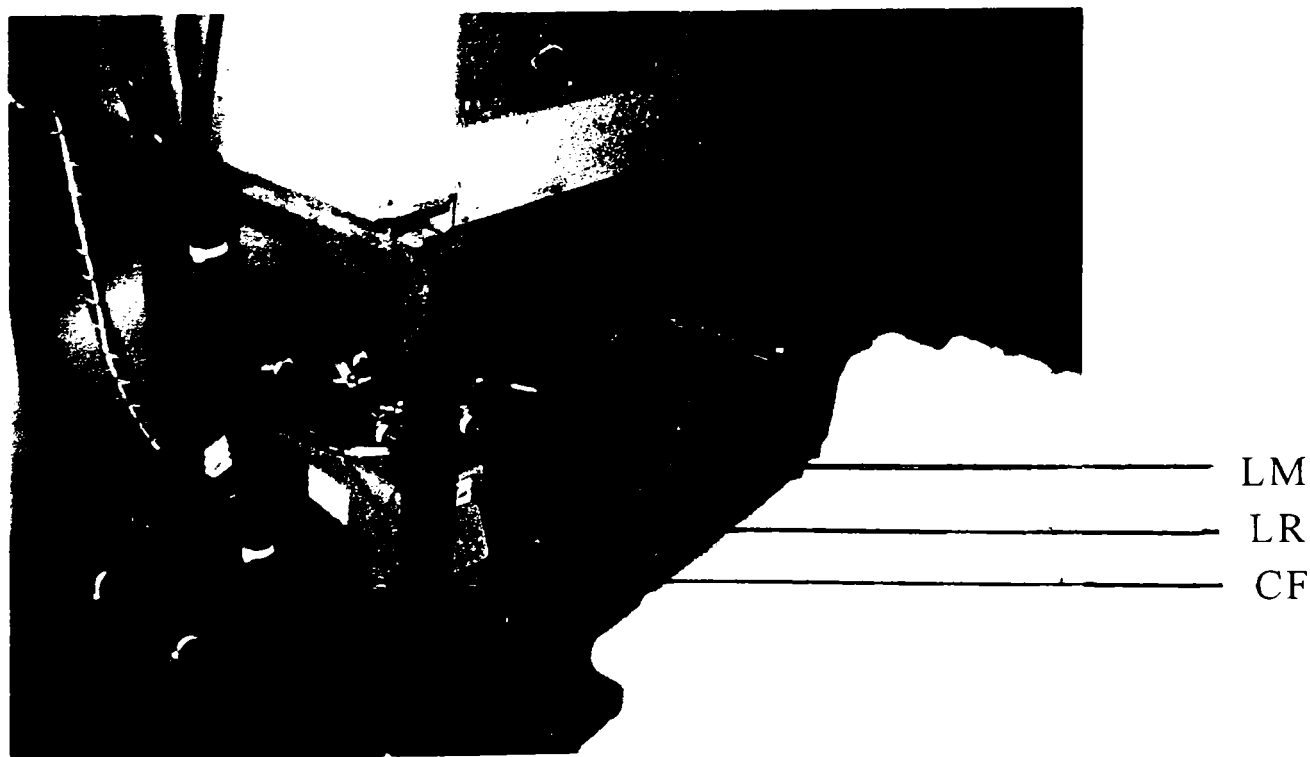
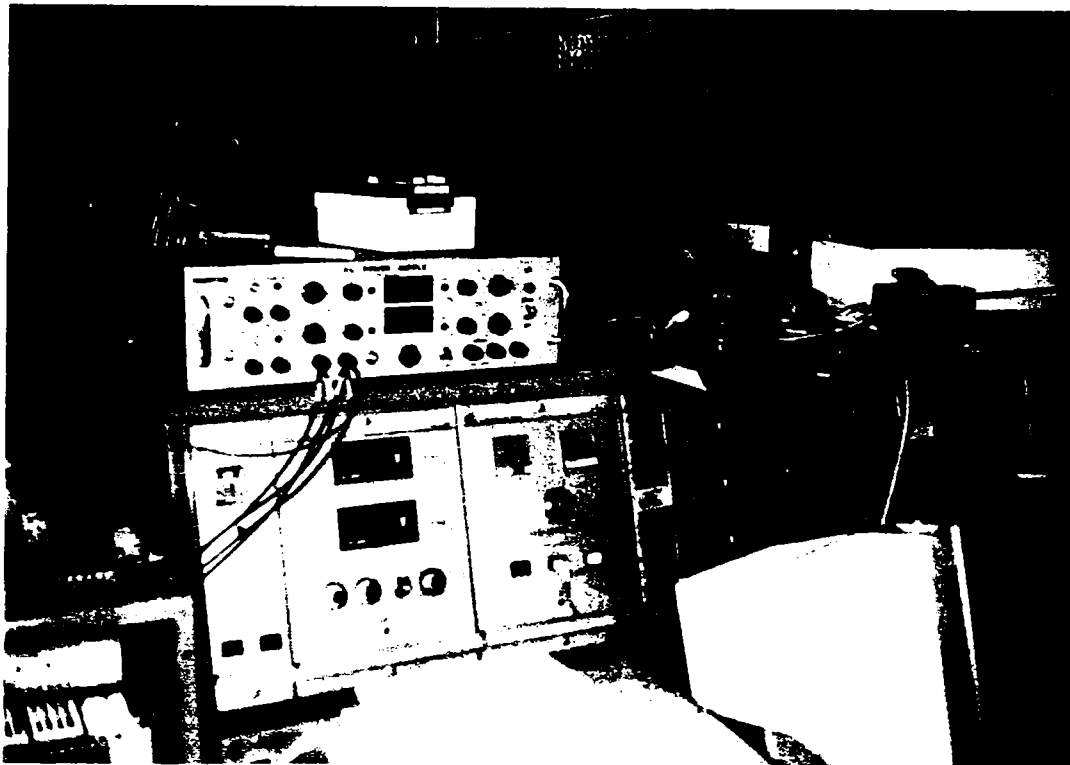


Figura 6.9. Inductivitățile LR, LM și condensatorul filtru CF

Ansamblul aparaturii de comandă prezentat în figura 6.10, conține: surse de tensiuni, butoane, comutatoare, indicatoare de temperatură, indicatoare de curent, indicatoare de tensiune, indicatoare de turație și viteză precum și traductoarele inductive pentru comanda funcționării în regim de tracțiune respectiv frânare.

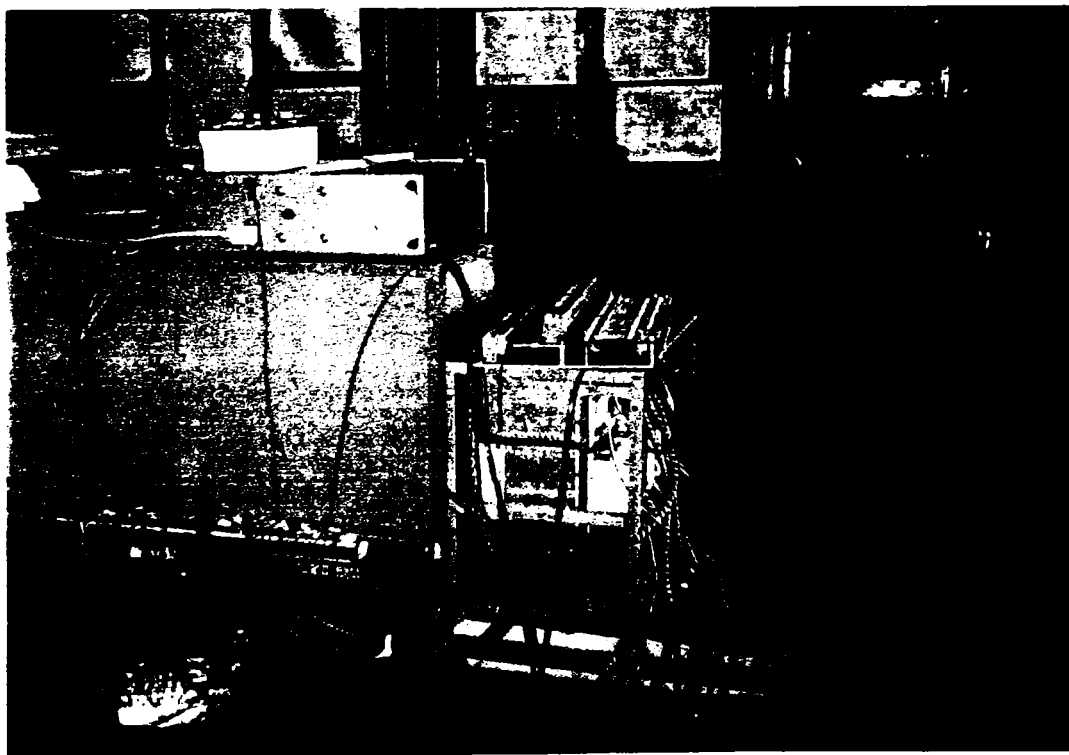


Maneta
traductorului
de tracțiune

Maneta
traductorului
de frânare

Figura 6.10. Aparatura de comandă

Partea din spate a tabloului de comandă și automatul programabil văzut din partea stângă a lui sunt prezentate în figura 6.11.



AP

Figura 6.11. Partea din spate a tabloului de comandă

Sistemul central de comandă și coordonare a întregii instalații pentru încercările experimentale determinate cu acest stand este automatul programabil cu microprocesor redat în figura 6.12.

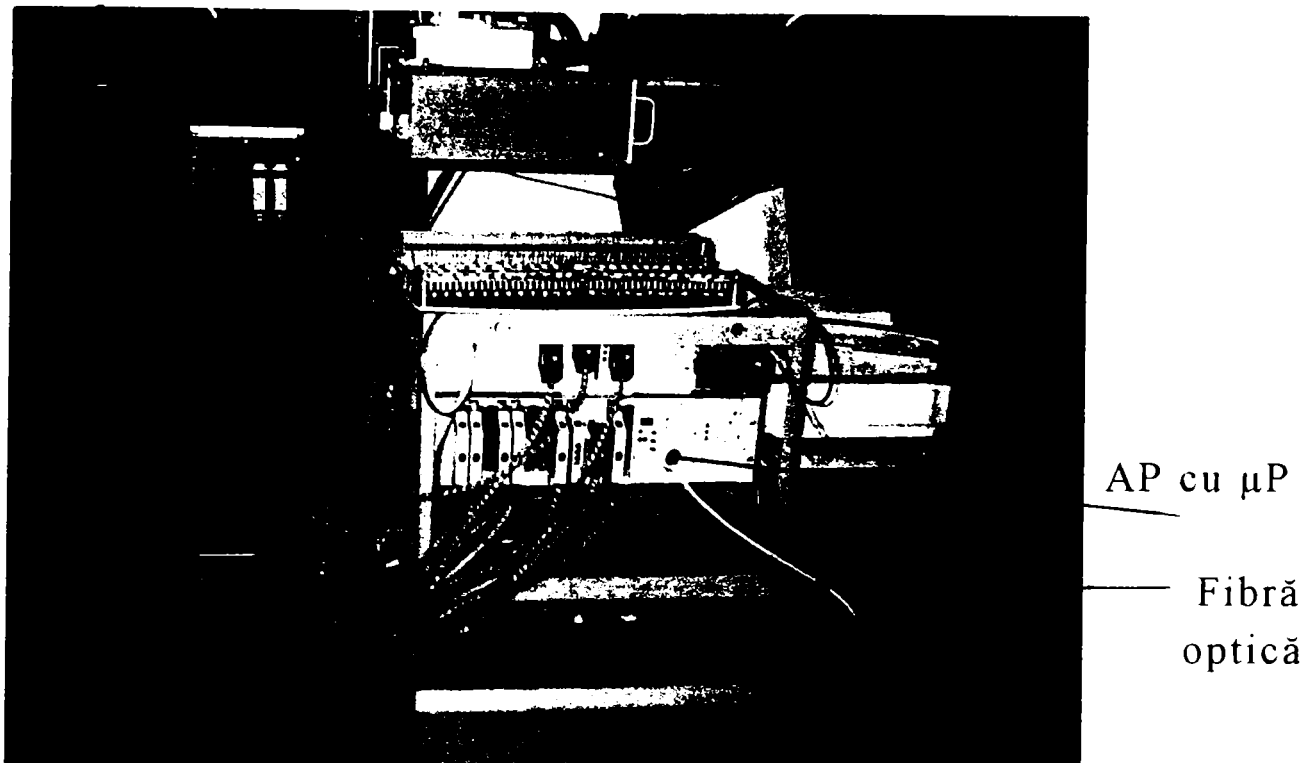


Figura 6.12. Automat programabil cu microprocesor

Legăturile electrice dintre aparatele de comandă se văd în figura 6.13.



Figura 6.13. Legăturile dintre aparatele de comandă

Ele sunt realizate atât prin intermediul șirurilor de cleme și a papucilor de legătură sertizați la extremitatea conductoarelor, cât și prin intermediul conectorilor.

Legătura dintre automatul programabil și celelalte aparate de comandă prezentate în figura 6.4 este realizată prin conectori tip "fișă-priză" și conductoare de legătură flexibile. După conectare, fișele sunt asigurate prin fixare cu șuruburi.

Aceste legături arată ca în figura 6.14.

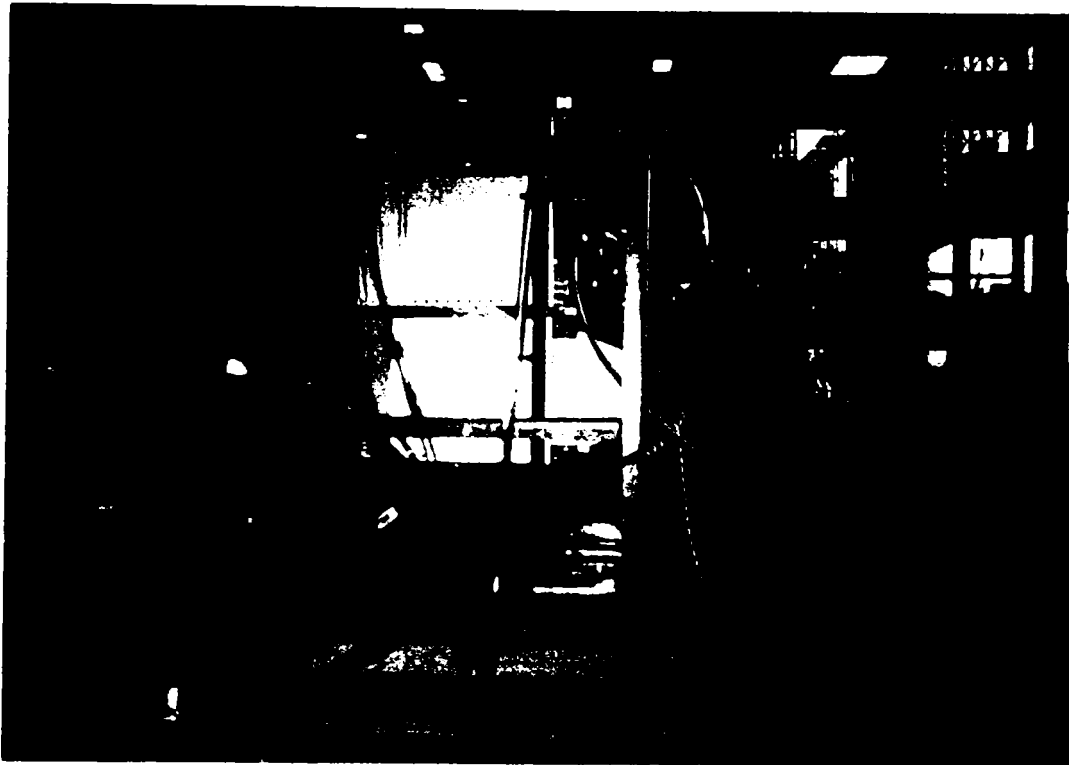


Figura 6.14. Legătura dintre automatul programabil și aparatele de comandă

Calculatorul conectat la automatul programabil este prezentat în figura 6.15. El are rolul de înregistrare a unor parametri stabiliți anterior, astfel încât să poată fi urmărite foarte multe procese, inclusiv cele tranzitorii. Pe monitor, pot fi vizualizate diferite caracteristici și diagrame



Figura 6.15. Calculatorul

6.6. Prelucrarea și interpretarea rezultatelor

În cadrul programului de încercări experimentale realizat pe standul de încercări s-au executat un număr foarte mare de demaraje și frânări, care au dus în final la un număr de aproximativ 180 ore pe o durată de 90 zile.

Încercările s-au realizat în baza unui program impus și înregistrat în memoria automatului programabil, astfel încât să se respecte funcționarea generală a standului pentru o distanță de 1000 m între două stații consecutive, cu două regimuri de tracțiune și de frânare pentru fiecare interval, la o încărcare maximă corespunzătoare vehiculului și cu o declivitate de 5 ‰. Condițiile de lucru date au fost corelate cu un anumit traseu.

Față de programul impus prezentat anterior, s-a mai putut interveni și din exterior atât la funcționarea în regim de frânare, cât și de tracțiune, simulând astfel intervențiile neprevăzute ale conducătorului vehiculului sau a pasagerilor (prin semnalul de alarmă). De fiecare dată, modificarea vitezei s-a făcut de la zero la maxim, dar și de alte valori intermediare după caz.

Datorită prezenței automatului programabil (cu toate automatizările aferente) și a celorlalte instalații automatizate prezente pe vehicul (cum sunt: induși, CAB SIGNAL, oprire la punct fix), instalația de comandă și reglare a vitezei poate fi ușor adaptată la funcționarea în regim de pilot automat.

Cu acest prilej, s-au putut urmări funcționarea ansamblului schemei în regimurile cerute de vehicul, comportarea motorului de tracțiune la un regim variabil de încărcări, posibilitatea menținerii constante a unui curent impus la motorul de tracțiune, precum și alte fenomene considerate până atunci doar teoretice.

Prezența contactoarelor din circuitul de forță (a căror comandă de conectare este dată de automatul programabil), cu parametrii identici cu cei ai contactoarelor care urmează să echipeze vehiculul prototip (aceleași impedanțe totale), a ușurat mult munca celor care s-au ocupat de proiectarea și realizarea automatului programabil, pentru care nu au mai fost necesare modificări și reglaje ulterioare.

Prin programul de funcționare impus de automatul programabil, atât deschiderea, cât și închiderea circuitelor de forță, s-a realizat de către tiristorul principal TT, evitându-se astfel schimbarea stării contactoarelor de forță când prin acestea circulă curent electric. Vizual s-a putut astfel constata lipsa arcului electric la închiderea și deschiderea contactoarelor, situație care va duce la creșterea fiabilității acestora. Prezența contactoarelor în circuit este necesară pentru a permite funcționarea VTC-ului (de un cadran) în cele 4 cadrane.

Pentru condițiile date ale MT și ale celorlalte componente ale schemei de forță, tensiunea electromotoare a fost cu mult mai mare decât valoarea presupusă (adică valoarea tensiunii la linia de contact), motiv pentru care curentul prin circuitul electric la funcționarea în regim de frânare (recuperativă și reostatică) a fost mai mare. Reducerea tensiunii electromotoare s-a realizat prin introducerea treptei a II-a de slăbire a câmpului, care a permis reducerea fluxului mașinii electrice în cazul frânării de la viteza maximă.

Tot cu acest prilej s-a impus necesitatea introducerii și pentru tiristorul de frânare TF a unui circuit de stingere (având în vedere că acesta nu era GTO).

Au rezultat de asemenea ca necesare și alte semnale de intrare și ieșire din automatul programabil, pe care autorul le-a stabilit împreună cu proiectantul automatului programabil.

Încercările fiind făcute pe un stand dotat cu automat programabil, cu acest prilej, s-au putut determina și semnalele care urmau să fie înregistrate în memoria nevolatilă a acestuia.

Reglarea vitezei unghiulare (afișată sub formă de viteză a vehiculului) s-a făcut folosind atât bucla de viteză cât și de curent, astfel că:

- viteza impusă a fost dată de traductorul inductiv al manetei de accelerație (sau decelerație);

- viteza măsurată s-a obținut de la traductorul de turație cu optocuplor montat pe axul motorului de tracțiune;

- curentul prin motorul de tracțiune a fost măsurat de traductorul de curent din VTC.

Datorită sondelor de temperatură montate în: VTC, inductivitatea LM, inductivitatea LR și motorul de tracțiune, s-a putut urmări care sunt temperaturile maxime la care au ajuns aceste componente, precum și faptul că nu au fost depășite valorile lor maxime admise.

S-a putut constata pe tot parcursul probelor prin urmărirea atentă în timp, funcționarea fără arc electric la periile colectoare a motorului de tracțiune, starea bună a colectorului și periilor, constatare care ne permite să afirmăm că în condițiile reglării vitezei cu VTC, fiabilitatea MT va crește. Această afirmație a fost confirmată și cu prilejul probelor de încercare și de recepție la SC ASTRA Vagoane SA, pentru încă 100 MT de același tip alimentate prin VTC montate pe troleibuzul 415T, și cu prilejul exploatării timp de 2 ani a acestui vehicul motor, pe liniile din București.

În timpul realizării încercărilor, s-a putut urmări foarte ușor succesiunea conectării și deconectării aparatelor de comutație și a temporizărilor prescrise.

Prezența automatului programabil pentru reglarea vitezei și supravegherea întregii instalații electrice de comandă și forță a dus la

simplificarea instalației de comandă și la reducerea componentelor electrice necesare funcționării acesteia. În acest fel, fiabilitatea acționării în ansamblu a crescut prin lipsa unor aparate și agregate, și printr-o solicitare rațională a altora.

Prin programul de testare a circuitelor exterioare care urmează să fie comandate, se elimină o serie de defecte care pot să apară, automatul programabil având posibilitatea să recunoască 3 stări ale circuitelor: normale, întrerupte și în scurtcircuit.

Cu prilejul probelor și încercărilor experimentale, s-a putut trage concluzia că o serie de componente și agregate folosite în instalația de acționare trebuie importate de la furnizori specializați care garantează o fiabilitate ridicată a acestora (conductoare foarte flexibile, contactoarele de forță, contactoarele de comandă și siguranțele automate monopolare). Alte componente pot fi realizate în țară cu importuri de completare cum sunt: VTC-ul, inductivitățile și condensatorul filtru, întrerupătorul automat rapid, convertorul static de tensiune pentru serviciile auxiliare, sursa statică de preexcitare, siguranțele rapide, și chiar motorul de tracțiune îmbunătățit.

Înregistrările făcându-se cu un calculator pentru un pas al timpului foarte mic (milisecunde), s-au putut extrage din memoria automatului programabil valorile în timp ale: tensiunii filtrului, curentului de referință impus la motor, curentului prin motor precum și viteza. Aceste valori prezentate în *Anexa IV* pentru funcționarea în regim de tracțiune și de frânare recuperativă au stat la baza trasării diagramelor de variație în timp ale: tensiunii condensatorului filtru $U_f(t)$, curentului de referință $I_{refm}(t)$, curentului prin motor $I_m(t)$, vitezei vehiculului $v(t)$. prezentate în figurile 6.16, 6.17 și 6.18. Suprapunându-le a rezultat diagrama finală din figura 6.19. Acest tabel mai conține două coloane reprezentând variabile digitale care fac trimitere la starea: contactoarelor, comenzilor date regulatorului, protecțiilor acționate (supracurenți și supratensiuni), erorilor, intrărilor în conducție a tiristorului GTO. Ele servesc la diagnoza defectelor.

Începutul diagramei arată un sfârșit de demaraj și frânare pentru testarea instalației de înregistrare, iar după un scurt interval de timp, au loc înregistrările pentru un demaraj și o frânare recuperativă.

Tensiunea pe condensatorul filtru CF rămâne constantă atâta timp cât MT este deconectat de la rețea. La intrarea motorului în regim de tracțiune, tensiunea pe condensatorul CF scade, având oscilații în jurul unei valori medii, care sunt în concordanță cu oscilațiile curentului prin motor. La deconectarea motorului din regimul de tracțiune, tensiunea are un vârf de creștere. La frânarea recuperativă, tensiunea se menține la o valoare mai mare decât în regimul de tracțiune, cu aceleași oscilații în jurul unei valori medii.

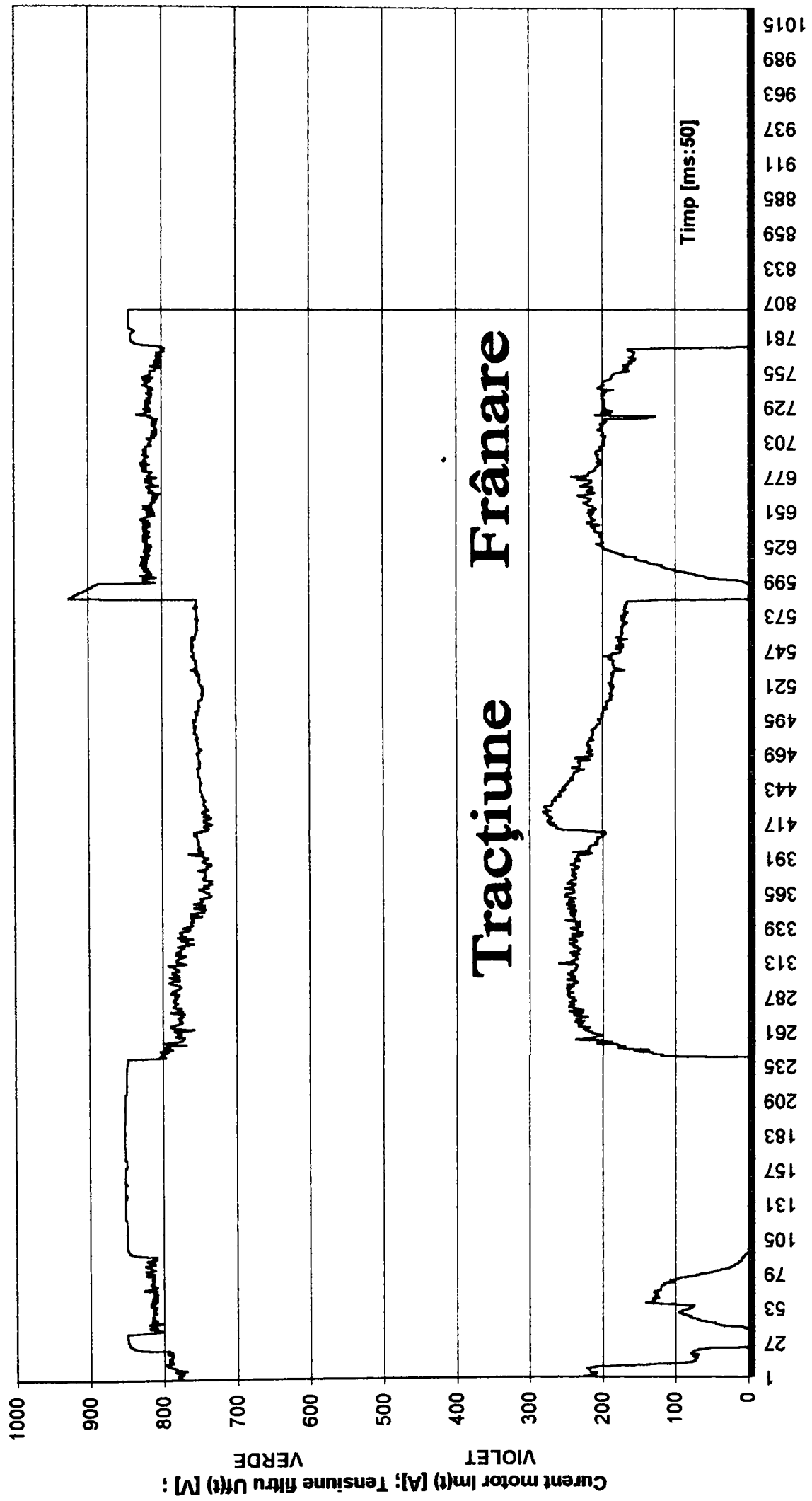


Figura 6.16. Diagramele de variație pentru tensiunea și curentul prin motor funcție de timp, $U_f(t)$, $I_m(t)$ la demaraj și frânare

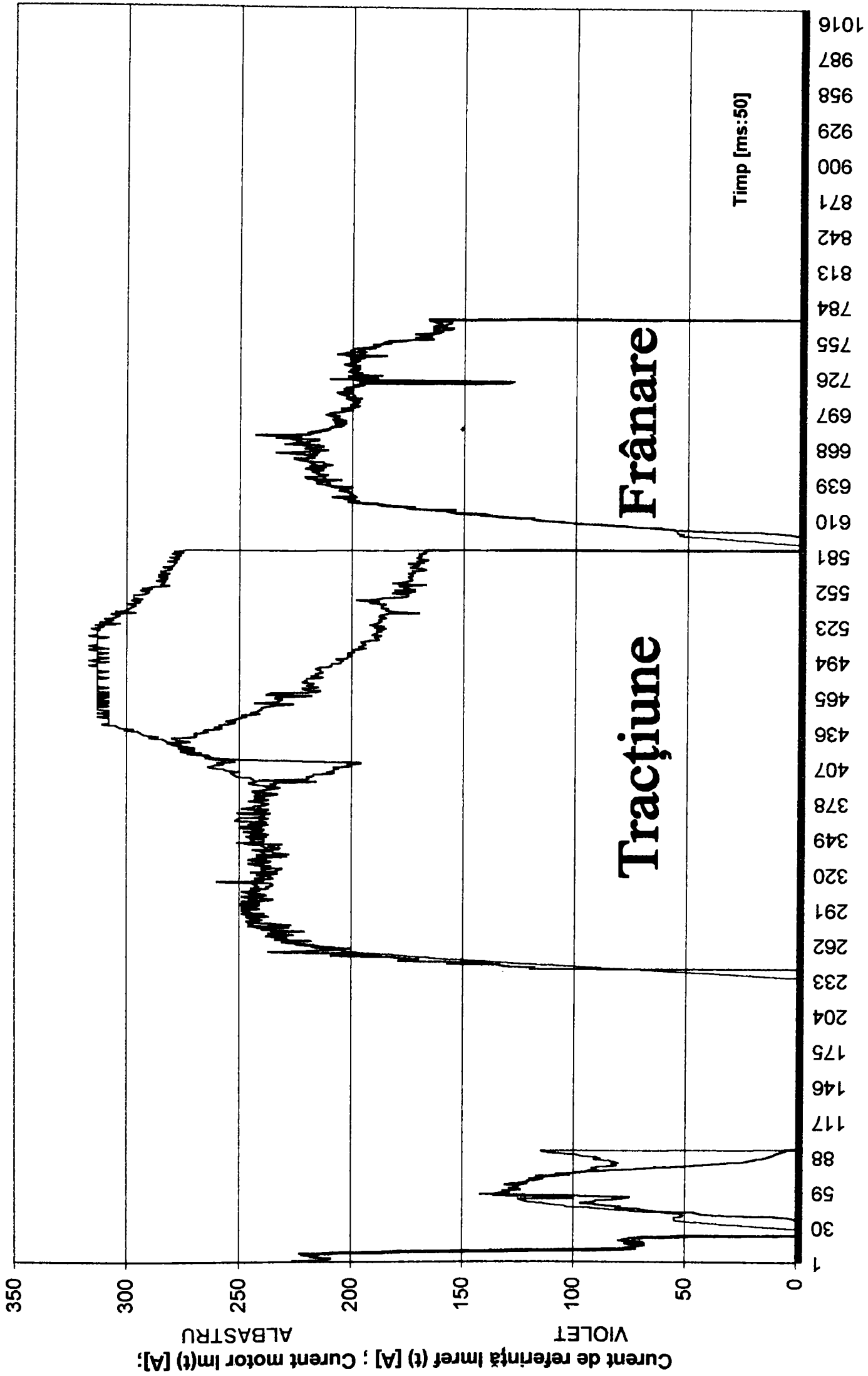


Figura 6.17. Diagramele de variație pentru curentul de referință și curentul prin motor funcție de timp, $I_{mref}(t)$, $I_m(t)$, la demeraj și frânare

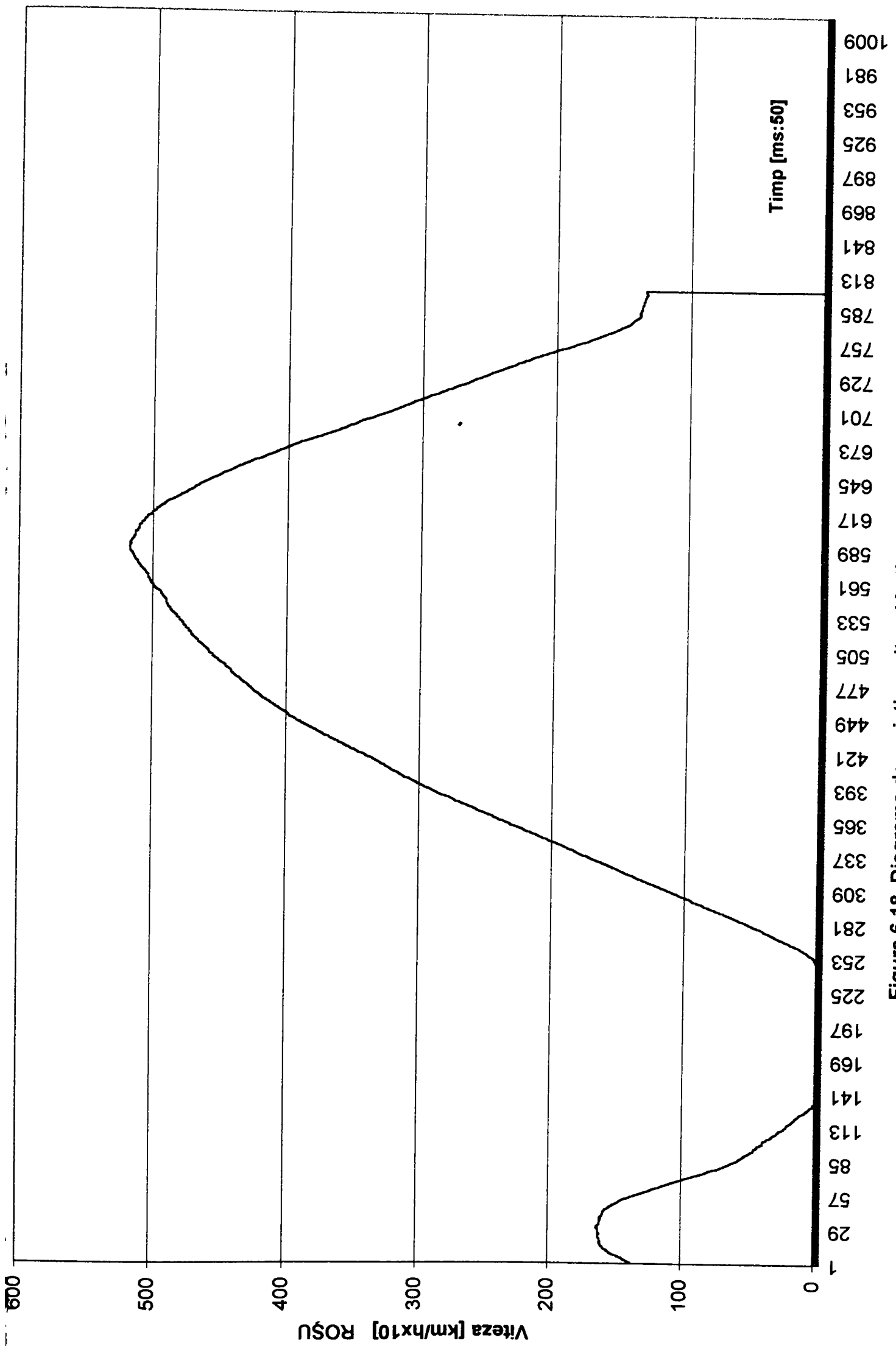


Figura 6.18. Diagrama de variație a vitezei în timp $v(t)$, la demaraj și frânare

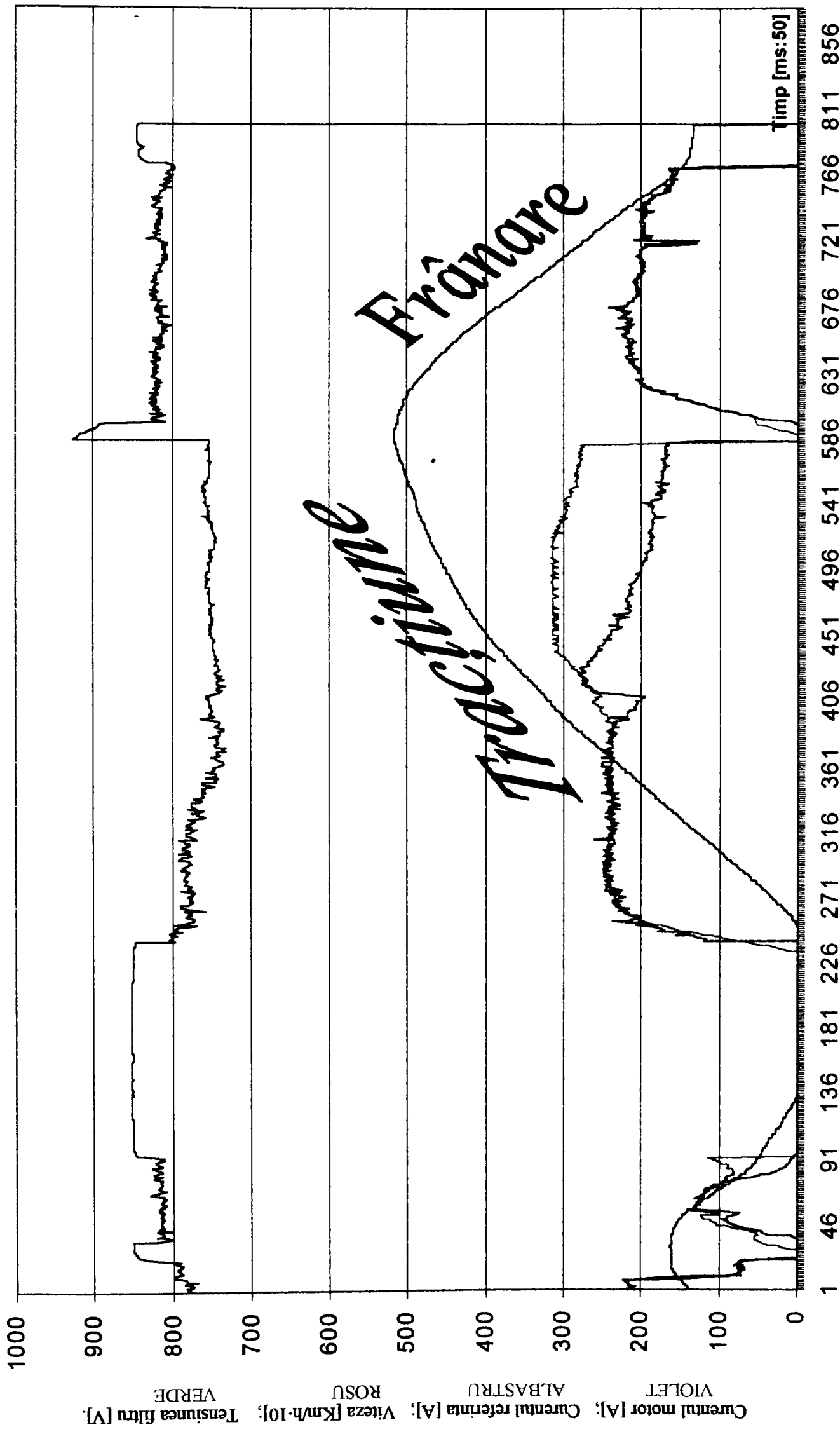


Figura 6.19. Diagramele de variație în timp ale: Curentului motor $I_m(t)$; Curentului de referință motor $I_{refm}(t)$; Viteza $v(t)$; Tensiunea filtru rețea $U_{ff}(t)$, la demaraj și frânare

Creșterea și reducerea vitezei are loc după o curbă, așa după cum se poate vedea în figura 6.18.

În ambele regimuri, atât de tracțiune, cât și de frânare, se poate constata forma de variație a curentului prin motor, care urmărește foarte aproape curentul de referință cerut de maneta de tracțiune sau de frânare, până în momentul intrării pe caracteristica naturală.

În diagramele suprapuse ala figurii 6.19, se poate vedea că apariția curbei de viteză este în urma curbei de curent, deoarece prin program s-a stabilit ca MT să nu se pună în mișcare decât la atingerea curentului de 100 A. Această condiționare s-a pus pentru a permite pornirea vehiculului atât în pantă, cât și în rampă.

Semnul curentului prin motor în regim de frânare este același cu cel al curentului în regimul de tracțiune, datorită așezării traductorului de curent imediat după excitația serie a MT. Pentru obținerea cuplului de frânare (de sens contrar celui de tracțiune), s-a realizat prin schemă (cu ajutorul contactoarelor), inversarea sensului de circulație al curentului prin motor. În acest fel s-a realizat problema menținerii aceluiași sens al curentului prin excitație, în vederea păstrării magnetismului remanent al MT, ușurând astfel procesul de amorsare al frânării electrice și reducerea timpului de intrare a ei în acțiune.

În baza încercărilor pe modelul experimental, în timpul elaborării studiilor și a documentării pentru actuala teză de doctorat, autorul a participat alături de alți specialiști de la SAERP București la difinitivarea schemei de forță pentru acționarea troleibuzului 545T, a proiectat schemele electrice de comandă și serviciilor auxiliare și a realizat proiectul de execuție pentru întreaga instalație de tracțiune și comandă.

A continuat apoi cu coordonarea activității de fabricare a prototipului, a condus și participat în același timp la realizarea programului de probe desfășurat pe liniile de exploatare din București (încercări și probe necesare omologării vehiculului), a coordonat activitatea de fabricare pentru seria zero de 10 bucăți și a realizat toate probele de punere în funcțiune și de recepție pentru 100 vehicule. În timpul încercărilor, a conceput și realizat un simulator pentru instalația electrică care să înlocuiască automatul programabil cu microprocesor înaintea conectării acestuia la instalația vehiculului.

6.7. Importanța realizărilor experimentale

Firmele constructoare de vehicule electrice de tracțiune cele mai renumite fac și simulări pe calculator, mai ales atunci când lansează în fabricație un produs nou, dar niciodată nu renunță la modelul experimental și la prototip. Renunțarea la construirea modelului experimental și la prototip ar fi o greșeală și un risc, deoarece la simulări nu se pot reproduce întocmai toate condițiile din exploatare, cum ar fi:

- protecții care în anumite cazuri de defect nu se pot lua în considerare;

- programul de diagnoză nu se poate face numai după ce vehiculul a funcționat în exploatare și s-au acumulat date despre cât mai multe defecte;

- apariția unor fenomene necunoscute.

Prin realizarea modelului experimental și a încercărilor pe acesta, se scurtează foarte mult durata de proiectare a standului, de realizare a acestuia și durata probelor (comparativ cu realizarea unui prototip, acest timp se reduce de la 3 ani la un an).

Simulările însă sunt foarte utile și interesante, dacă acestea sunt făcute pe modelul experimental, prin construirea unui stand de încercări, într-o realizare unitară, care să poată fi solicitat la oscilații înregistrate pe bandă pe un traseu bine cunoscut și pe care urmează să circule vehiculul.

Se fac cercetări și cu ajutorul tehnicii de calcul în măsura în care o parte din mărimile care concură la funcționarea produsului se cunosc. Acțiunea roată-șină este de exemplu un fenomen foarte complex, astfel că variațiile coeficientului de aderență poate fi prins pe simulator. Se pot face simulări pentru a putea determina rezistența la oboseală a unor componente din acționare, ținându-se seama de fenomenele tranzitorii.

Din nefericire la construcțiile actuale ale căii de rulare, energia degajată datorită contactului roată șină nu este absorbită de tunel decât într-o proporție de până la 15%. Restul se transformă în vibrații și zgomote care solicită anumite agregate la oboseală și totodată scade confortul călătorilor.

Înainte fabricației de serie, este necesară realizarea unor măsurători în tunel pe prototip, pentru determinarea mărimilor care caracterizează energia degajată din interacțiunea roată-șină. Aceste măsurători trebuie să determine accelerațiile, amplitudinile de oscilații și frecvențele din cutiile rulmenților de osie.

Electro-tensometria dinamică se poate realiza numai la un prototip în circulație, deoarece solicitările dinamice sunt într-un sistem static nedeterminat, care nu se pot simula pe calculator.

Pentru sistemul de acționare în curent continuu și reglarea vitezei cu VTC la soluția propusă de autor pentru metroul din România, nu au fost necesare simulări, dar s-a considerat absolut obligatoriu realizarea încercărilor experimentale.

6.8. Concluzii

Utilitatea acestui capitol rezultă din rezultatele încercărilor experimentale realizate pe un motor de tracțiune la o putere de 150 kW, care este foarte apropiată de a celui de la metrou. Aceste

încercări-s-au făcut cu un VTC ales în concordanță cu modul de funcționare și cu puterea cerută de vehiculul motor, fabricat într-o construcție compactă, dar și cu alte agregate din componența schemei de acționare, complet executate. Acestea au făcut parte dintr-o schemă de acționare pentru troleibuzul 415T din București.

Deoarece încercările au avut loc pe o perioadă de timp care a depășit cca. 90 ore, s-au putut verifica o serie de fenomene, putându-se trage concluzii chiar și referitoare la duranța unor componente.

S-a putut studia comportarea motorului de tracțiune la alimentarea cu impulsuri de tensiune (adică la alimentarea prin VTC), funcționarea lui fără arc electric între periile colectoare și colector, și implicit se poate afirma că fiabilitatea motorului de tracțiune este mai bună (vezi subcapitolul 6.6).

Funcționarea la cuplu constant, adică la curent constant, cu o reglare continuă a tensiunii (și nu în trepte), precum și modificările aduse la motorul de tracțiune, ne îndreptățește să credem și să afirmăm că în această variantă constructivă, inclusiv comanda reglării cu automat programabil, majoritatea din neajunsurile și defectele mașinii electrice de curent continuu semnalate la reglarea rezistivă sunt eliminate.

În măsura în care există un consumator pe aceeași stație de tracțiune, există în permanență și o frânare electrică recuperativă. Curentul de frânare a putut fi menținut în permanență și el constant.

Cu prilejul încercărilor, s-a putut urmări temperatura unor componente cum sunt: motorul de tracțiune, inductivitatea rețelei inductivitatea motor și VTC-ul, temperatură care nu a depășit valoarea maximă admisă.

Încercările au dat prilejul realizării tuturor reglajelor și temporizărilor atât în VTC cât și în automatul programabil.

Prezența contactoarelor din circuitul de forță la parametri identici cu cei ai contactoarelor care urmează să echipeze vehiculul prototip (aceleași impedanțe ale circuitelor electrice care urmează să fie comandate de automatul programabil), a ușurat foarte mult munca de proiectare, cercetare și fabricare, pentru cei care au realizat automatul programabil.

A rezultat necesitatea unei serii de modificări sau completări cum ar fi:

- introducerea treptei a II-a de slăbire a câmpului suplimentară, pentru regimul de frânare;
- introducerea unui circuit de stingere pentru tiristorul de frânare TF;
- introducerea unor semnale suplimentare, atât de ieșire, cât și de intrare în automatul programabil;

- înlocuirea unor componente din circuitul de forță (contactorul KP, KR)

- refacerea reostatului RF, Re1, Re2 și Rp în sensul modificării valorii rezistențelor;

- modificarea semnalului de ieșire din traductorul de tensiune rețea TTR.

Avându-se în vedere că menținerea în stare de repaus a vehiculului este realizată de către frâna cu resort, s-a prevăzut prin program ca aceasta să nu fie eliberată decât după depășirea unui curent de 100 A prin MT. Modificarea va permite pornirea vehiculului de pe loc și acolo unde calea de rulare este în pantă sau rampă.

Reglarea vitezei cu VTC și folosirea automatului programabil pentru coordonarea tuturor comenzilor pe un vehicul (inclusiv a VTC-ului), precum și realizarea comenzii de aprindere și stingere a tiristorului principal (GTO) cu fibră optică a permis creșterea fiabilității și altor componente din schema electrică de tracțiune și din schema electrică de comandă. Beneficiind de aceste facilități, conducerea unui vehicul de acest fel este foarte ușoară.

Prin prezența memoriei din automatul programabil și a calculatorului atașat, s-au putut înregistra și vizualiza valorile unor mărimi în timp, chiar și pentru procesele tranzitorii.

În procesul de elaborare a studiilor și după realizarea încercărilor pe modelul experimental, în colaborare cu alți specialiști, autorul a participat la elaborarea schemei de forță pentru acționarea troleibuzului 415T, prilej cu care a proiectat schema electrică de comandă și a instalațiilor auxiliare și a realizat proiectul de execuție a întregii instalații de tracțiune și comandă.

După coordonarea activității de realizare a prototipului, a condus și participat la realizarea programului de probe din exploatare pe liniile din București în vederea omologării. A continuat apoi cu coordonarea activității de realizare a seriei zero de 10 vehicule și a probelor de punere în funcțiune pentru cele 100 vehicule, prilej cu care a conceput și realizat un simulator al automatului programabil cu microprocesor.

Un simulator adecvat va putea fi realizat și pentru metrou.

Pe baza soluției alese pentru acest model experimental, autorul a conceput și realizat o schemă de funcționare pentru o unitate de metrou cu 4 motoare de tracțiune (prezentată în capitolul 5), putându-se astfel determina toate componentele instalației.

Capitolul 7

Sistemul de acționare cu mașina asincronă alimentată prin invertor

7.1. Introducere

În tracțiunea electrică, progresele realizate în domeniul electronicii de putere au permis studiul și trecerea în măsură crescândă la utilizarea pentru acționări a motoarelor asincrone, eliminându-se astfel dezavantajele utilizării motoarelor de curent continuu.

Firme de prestigiu din străinătate și chiar din România lucrează la îmbunătățirea performanțelor convertoarelor de tensiune, invertoarelor trifazate, motoarelor de tracțiune asincrone și schemelor de comandă a vehiculului în regim de tracțiune și în regim de frână electrică recuperativă.

Construcția pe bază de semiconductoare comandate, a agregatelor componente ale transmisiilor electrice din tracțiunea electrică, a permis să se obțină performanțe demne de luat în considerare, cum sunt:

- conducerea automată a vehiculului după viteza impusă;
- conducerea automată a vehiculului după curentul impus;
- conducerea automată a vehiculului după accelerația și decelerația prestabilită, în scopul obținerii timpilor minimi de demarare și de frânare;
- conducerea automată a vehiculului după consumuri energetice minime;
- conducerea automată a vehiculului în regim de telecomandă.

Sistemele de acționare electrică de curent alternativ s-au dezvoltat atât din punct de vedere tehnic cât și economic. Nu se poate practic trasa o linie de demarcație clară între utilizarea sistemelor de acționare de curent continuu și cele de curent alternativ.

La noi în țară s-a încercat introducerea acestui sistem de acționare la metrou în anul 1986, când la Întreprinderea Electroputere Craiova s-a realizat un model experimental. Această activitate de studiu și cercetare a continuat până în anul 1993, când s-a concretizat în realizarea unui prototip. Construit pe actualul schelet al ramei clasice de metrou, cu același boghiu, dar cu două rotoare la fiecare mașină electrică (adică cu acționare individuală), implementarea acționării s-a dovedit a fi relativ rapidă, iar echipamentele specifice au fost realizate integral în țară (invertor, motor de tracțiune asincron, electronica de comandă și alte agregate de forță). Prototipul acestei rame de metrou a

fost dus în București, s-au făcut câteva probe funcționale, după care s-a încetat activitatea de continuare a probelor și omologării lui.

În capitolul 7, se face un studiu asupra acționării în curent alternativ trifazat cu mașina asincronă și reglarea vitezei cu invertor static de frecvență, precum și a posibilităților de aplicare a noii soluții și la metroul din România. În acest context, se face o prezentare a caracteristicilor electromecanice ale motorului asincron de tracțiune și metodologia de calcul pentru stabilirea caracteristicilor de tracțiune, dar axate pe un caz concret cu datele reale de la metrou. Sunt apoi precizate câteva cerințe specifice pentru caracteristicile energetice de tracțiune și de frânare, și câteva jaloane tehnice pentru vehicule cu motoare de tracțiune asincrone.

Având în vedere numeroasele avantaje obținute prin folosirea motorului de tracțiune asincron (cu rotorul în colivie), problema merită să fie luată în considerare prin studii, examinări și cercetări, astfel încât într-un viitor nu prea îndepărtat, această soluție să poată trece de stadiul de prototip.

Introducerea și la metrou a motorului asincron de tracțiune a fost și este realizată de numeroase firme producătoare din lume așa cum a fost prezentată în subcapitolul 3.3. Cu acest prilej, au fost examinate din punct de vedere funcțional câteva scheme electrice de forță mai reprezentative, utilizate de Holec din Olanda, Elin din Austria și Toshiba din Japonia (vezi figurile 3.4, 3.5 și 3.6). Printre firmele cu renume care realizează metrouri cu motoare de tracțiune asincrone și cu invertoare de frecvență se numără și ABB respectiv Gec-Alsthom. De remarcat că toate aceste companii au fabricat și încă mai fabrică, și sistemul de acționare cu mașina de curent continuu având reglarea vitezei cu VTC.

7.2. Posibilitățile de aplicare a noii soluții cu mașina de curent alternativ trifazat asincronă

Motorul de tracțiune asincron cu rotorul în scurtcircuit prezintă parametri tehnico-economici net superiori motorului de curent continuu (mai ales la motorul de curent continuu cu reglarea vitezei reostatic). Motorul asincron nu poate funcționa decât alimentat de la un invertor de frecvență.

Având în vedere gabaritul și dimensiunea mult redusă a motorului asincron, amplasarea acestuia pe boghiu se realizează mult mai ușor. Deși turația nominală a mașinii electrice este condiționată de numărul de perechi de poli, totuși reglarea vitezei se poate face continuu (prin prezența invertorului). În această situație, folosirea aceluiași reductor pentru obținerea raportului de demultiplicare ar fi posibilă. Pentru folosirea capacității de tracțiune până la limita de aderență, este

obligatoriu introducerea acționării individuale situație în care se impune folosirea altui reductor, pentru transmisie.

Deoarece tensiunea alternativă de alimentare a motorului este pregătită de invertor din tensiunea de alimentare de la rețea (750 Vcc), el trebuie construit într-o clasă de izolație superioară pentru a-i asigura rezistența de izolație necesară tensiunii la linia de contact de 750 Vcc, cu alte cuvinte clasa de izolație trebuie să fie aceeași cu a motorului de curent continuu.

Fiecare motor de tracțiune fiind alimentat de la un invertor de frecvență, numărul lor pentru o ramă de metrou este egal cu cel al motoarelor (adică 8). Din punct de vedere constructiv, invertorul este mai simplu decât agregatele acționării clasice, dar totuși mai complicat decât un VTC. Potrivit figurii 7.14, el conține 8 tiristoare și 9 diode de putere, făcându-l astfel cu un gabarit și greutate relativ mare (dimensiunea datorându-se radiatoarelor pentru răcire și distanțelor de conturare dintre numeroasele căi de curent).

Electronica de comandă a invertorului este foarte complicată, având o dimensiune relativ mare datorită comenzilor individuale pentru fiecare invertor în parte. Comanda reglării vitezei vehiculului și a celorlalte instalații din dotare se pretează la folosirea automatului programabil cu microprocesor. Dimensional și acesta este mai mare, dar se încadrează în limitele dimensiunilor existente pe rama de metrou.

Numărul contactoarelor din circuit se reduce (la unele scheme se elimină definitiv), conferindu-i astfel o simplitate considerabilă schemei și o reducere din greutate și volum.

La modul general în ansamblu, gabaritul și greutatea componentelor sunt mai mici decât la rama de metrou clasică, dar mai mari decât la rama cu motoare de curent continuu și reglarea vitezei cu VTC.

Din punct de vedere constructiv, modificările sunt destul de mari, dar ele pot fi realizate cu cheltuieli suplimentare atât la fabricație, cât și în exploatare.

Avantajele oferite de acest sistem (cu mașina de curent alternativ) față de cel clasic sunt cu performanțe asigurate mai bune, precum și o fiabilitate cu o siguranță în exploatare crescută. Avantajele se datorează în general performanțelor foarte scăzute ale componentelor acționării clasice în curent continuu, și în același timp a fiabilității și siguranței în exploatare a acestora scăzute.

Aplicarea acestui sistem de acționare la metrou ar trebui să se facă cu realizarea a două prototipuri, cu încercări în vederea omologării, cu probe pentru anduranță și în final cu realizarea proiectului de execuție a seriei zero.

7.3. Motorul de tracțiune asincron

Principiul de funcționare al motorului de tracțiune este același ca și la alte tipuri de acționări schimbându-se doar sistemul de reglare prin modificarea tensiunii și a frecvenței, iar relațiile de calcul sunt aceleași. Condițiile de lucru sunt însă altele, mai grele și specifice tracțiunii electrice, printre care se poate aminti: pornirea direct în sarcină, funcționarea cu sarcină variabilă și cu șocuri mecanice mari, timp de exploatare fără pauză, funcționarea în medii cu grad ridicat de praf și pulberi mecanice.

Turația de sincronism și alunecarea sunt date de relațiile:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \text{ [rot/min] ,} \quad (7.1)$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} , \quad (7.2)$$

unde: f – frecvența tensiunii statorului;
 p – numărul perechilor de poli;
 n_s – turația de sincronism;
 n – turația rotorului mașinii electrice.

Puterea pe cele trei faze statorice este:

$$P_e = 3 \cdot \frac{R'_r}{s} \cdot I_r^2 , \quad (7.3)$$

unde: I_r – este curentul din rotor;
 R'_r – este rezistența rotorului raportată la stator.

Curentul prin rotor este dat de relația [24],[72]:

$$I_r = \frac{U}{\sqrt{(R_s + C_1 \cdot \frac{R'_r}{s})^2 + (X_s + C_1 \cdot X'_r)^2}} , \quad (7.4)$$

unde: U – tensiunea de alimentare a statorului (a rețelei);
 R_s – rezistența statorului;
 R'_r – rezistența rotorului raportată la stator;
 X_s – reactanța de dispersie a statorului;
 X'_r – reactanța de dispersie a rotorului raportată la stator;
 C_1 – o constantă a mașinii (cu valori între 1,04 și 1,08, iar pentru puteri mari $C_1=1$) [20], [24], [72].

Reactanța totală de dispersie a mașinii electrice poate fi scrisă cu relația:

$$X = X_s + X'_r . \quad (7.5)$$

Funcționarea mașinii electrice în regim de motor (tracțiune) se stabilizează la o turație subsincronă, la care momentul electromagnetic devine egal cu cel rezistent.

Cuplul electromagnetic, cuplul maxim și alunecarea critică ținându-se seama și de faptul că frecvența este variabilă iar reactanțele se modifică cu aceasta, vor avea expresiile) [24], [38], [63], [72]:

$$M_e = \frac{P_e}{\Omega_s} = \frac{3 \cdot p \cdot R_r' \cdot U^2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot s \cdot \left[\left(R_s + \frac{R_r'}{s} \right)^2 + \left(\frac{f}{f_n} \right)^2 X^2 \right]}, \quad (7.6)$$

$$M_K = \frac{3 \cdot p \cdot U^2}{4 \cdot \pi \cdot f \cdot \left(R_s \pm \sqrt{R_s^2 + \left(\frac{f}{f_n} \right)^2 X^2} \right)}, \quad (7.7)$$

$$s_k = \pm \frac{R_r'}{\sqrt{R_s^2 + \left(\frac{f}{f_n} \right)^2 X^2}}, \quad (7.8)$$

$$\Omega_s = \frac{2\pi \cdot f}{p}, \quad (7.9)$$

unde: Ω_s – viteza unghiulară de sincronism;
 p – numărul de perechi de poli;
 f – frecvența tensiunii de alimentare;
 f_n – frecvența nominală.

Frânarea suprasincronă recuperativă se obține prin antrenarea mașinii asincrone de către osia motoare la o viteză unghiulară mai mare decât viteza sincronă, trecând astfel în regim de generator. În această situație, mașina electrică nu consumă energie electrică de la rețea, ci va debita energia produsă, viteza unghiulară de funcționare fiind $\Omega > \Omega_s$, iar alunecarea este negativă, $s < 0$.

7.3.1. Caracteristica electromecanică a motorului asincron de tracțiune

Expresia tensiunii electromotoare statorice totale funcție de frecvență este dată de relația [38], [72]:

$$E_s = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N_s \cdot \psi_{sm}, \quad (7.10)$$

unde: ψ_{sm} – amplitudinea fluxului statoric total;
 N_s – numărul de spire din stator.

Deoarece la puteri mari, rezistența statorului este foarte mică, aceasta se poate neglija, iar tensiunea electromotoare devine egală cu tensiunea pe fază:

$$U_s = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N_s \cdot \psi_{sm} \quad (7.11)$$

Pentru că ψ_{sm} se poate considera constant, atunci :

$$\frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}} \cdot N_s \cdot \psi_{sm} = K_u, \text{ iar,} \quad (7.12)$$

$$U = K_u \cdot f. \quad (7.13)$$

În acest caz prin înlocuirea relației (7.13) în (7.7) cuplul maxim are expresia:

$$M_{\max} = \frac{3 \cdot K_u^2 \cdot f^2}{4 \cdot \pi \cdot f \cdot (R_s \pm \sqrt{R_s^2 + \left(\frac{f}{f_n}\right)^2 X^2})}, \quad (7.14)$$

expresie care arată că și numitorul depinde de frecvență.

Condițiile $\frac{U}{f} = \text{const.}$ și $\psi_{sm} = \text{const.}$ se mențin numai în domeniul în care tensiunea crește până la valoarea nominală.

După atingerea tensiunii nominale, dacă frecvența continuă să crească, fluxul statoric se reduce, creând astfel regimuri favorabile pentru tracțiune.

Diagrama de reglaj și alimentare a motorului de tracțiune asincron arată ca în figura 7.1.

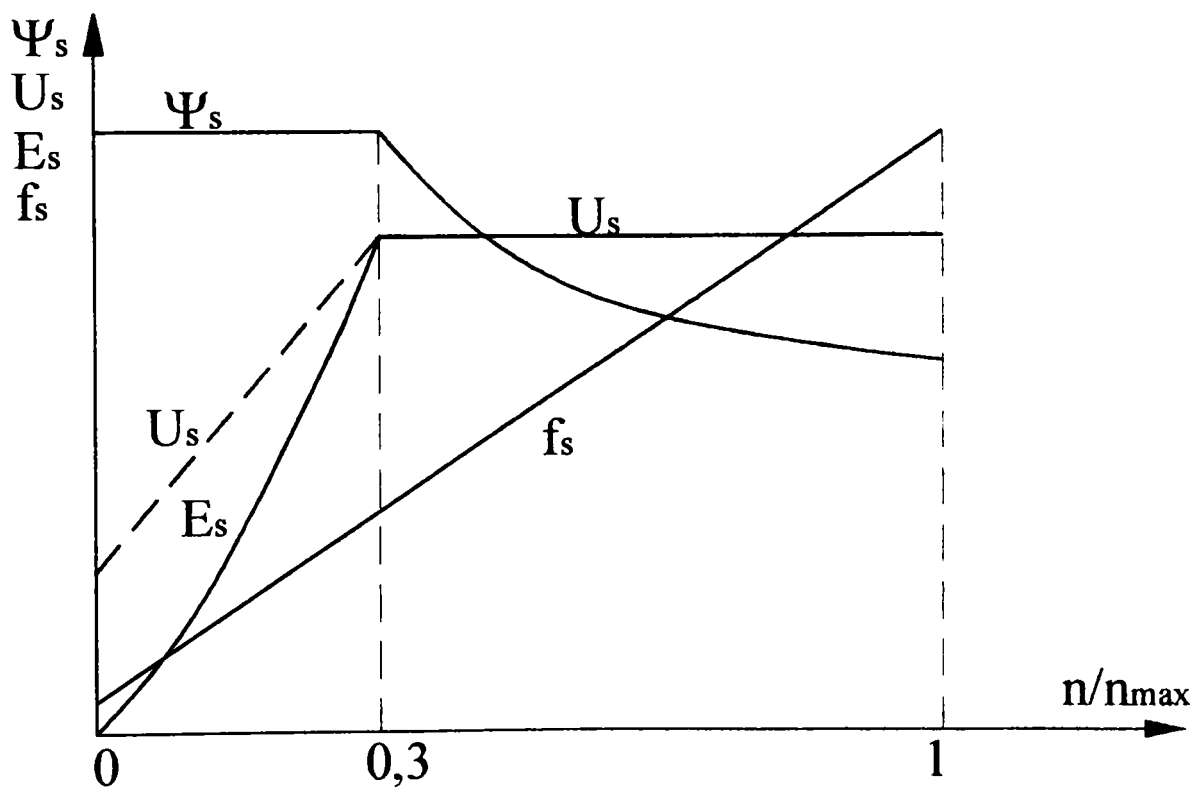


Figura 7.1. Diagrama de reglaj și alimentare a motorului de tracțiune asincron

Cuplul de pornire al motorului de tracțiune este cuplul la alunecarea $s=1$ și rezultă din relația (7.6).

Caracteristicile cuplului electromecanic funcție de variația frecvenței f a tensiunii din stator în domeniul $\frac{U}{f} = \text{constant}$ și în domeniul $U = \text{constant}$, arată ca în figura 7.2, unde: $f_1 < f_2 < \dots < f_k$.

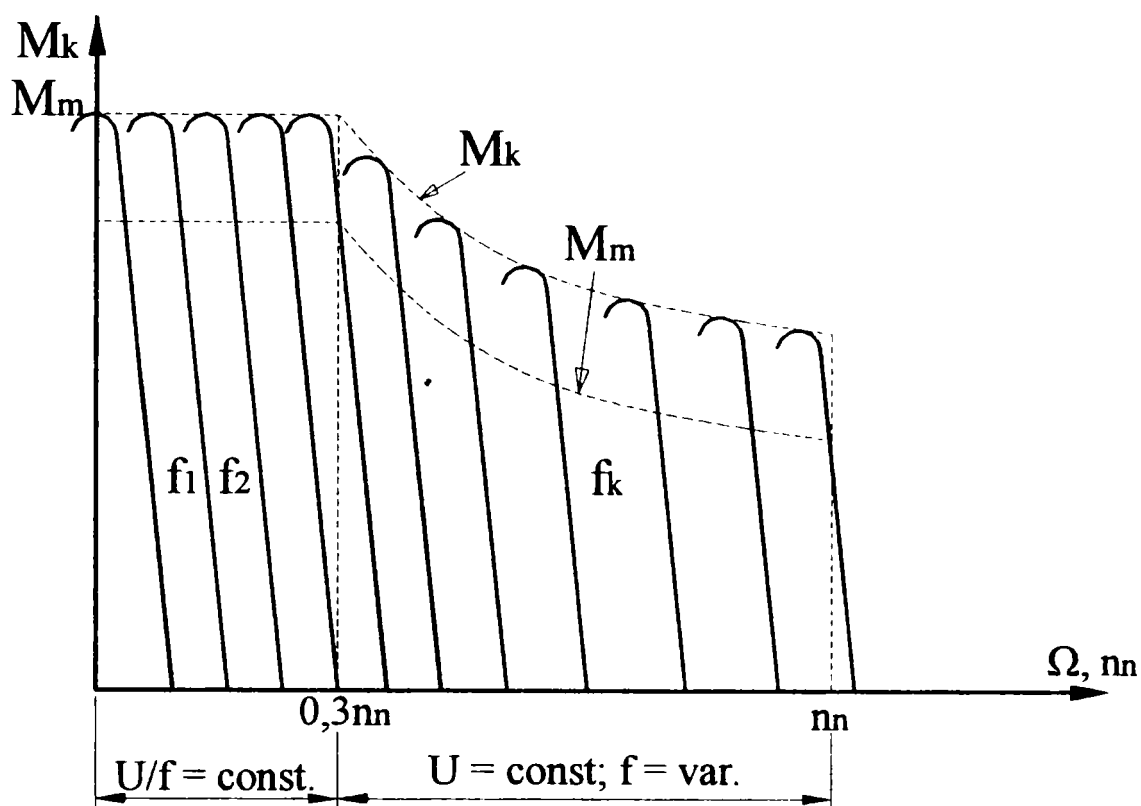


Figura 7.2. Caracteristica electromecanică a motorului de tracțiune asincron

7.3.2. Reglarea turației motoarelor asincrone de tracțiune

La pornirea vehiculului este necesară o forță de tracțiune cât mai mare, dar care să nu depășească forța limită de aderență.

Potrivit relației (7.6), rezultă că valoarea momentului (respectiv a forței de tracțiune), poate fi modificat prin variația tensiunii și a frecvenței.

La frecvență constantă, modificarea cuplului critic prin variația tensiunii se face potrivit relației:

$$M_{k2} = M_{k1} \cdot \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 \quad (7.15)$$

Pentru tensiunile $U_1 < U_2 < \dots < U_k$ se obțin o familie de caracteristici care arată ca în figura 7.3.

Prin variația tensiunii, se modifică numai valoarea maximă a cuplului, motiv pentru care această metodă nu se poate folosi pentru reglarea vitezei de circulație.

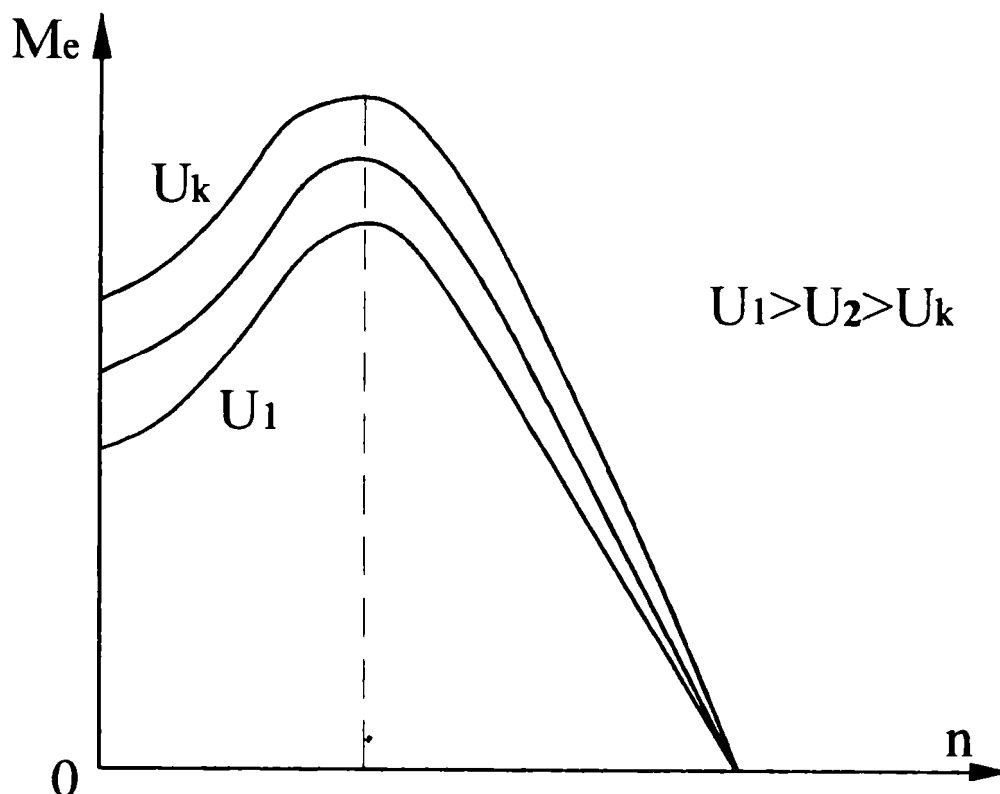


Figura 7.3. Caracteristicile cuplu maxim – turație la diferite valori ale tensiunii de alimentare

Turația motorului asincron este:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \cdot (1 - s). \quad (7.16)$$

Din această relație, rezultă că viteza de circulație a vehiculului se poate modifica prin variația frecvenței.

Pentru tensiunea constantă, cuplul maxim va fi definit conform relației:

$$M_k = \frac{K}{f^2}, \quad (7.17)$$

unde K este o constantă care include toate componentele constante ale ecuației 7.6.

Caracteristicile cuplului pentru mai multe frecvențe arată ca în figura 7.4, unde: $f_1 < f_2 < \dots < f_k$.

La tracțiunea electrică, frecvența se reglează într-un domeniu foarte larg și anume de la 0,1 până la 150 Hz.

Modificarea frecvenței din punct de vedere practic nu se face la tensiunea nominală deoarece se saturează miezul magnetic, deci crește inadmisibil curentul de magnetizare, ci se face la:

$$\frac{U}{f} = \text{constant}, \quad (7.18)$$

adică la: $M_k = \text{constant}$.

Astfel menținerea constantă a cuplului critic mai poate fi scris sub forma:

$$\frac{E}{f} = \text{constant.} \quad (7.19)$$

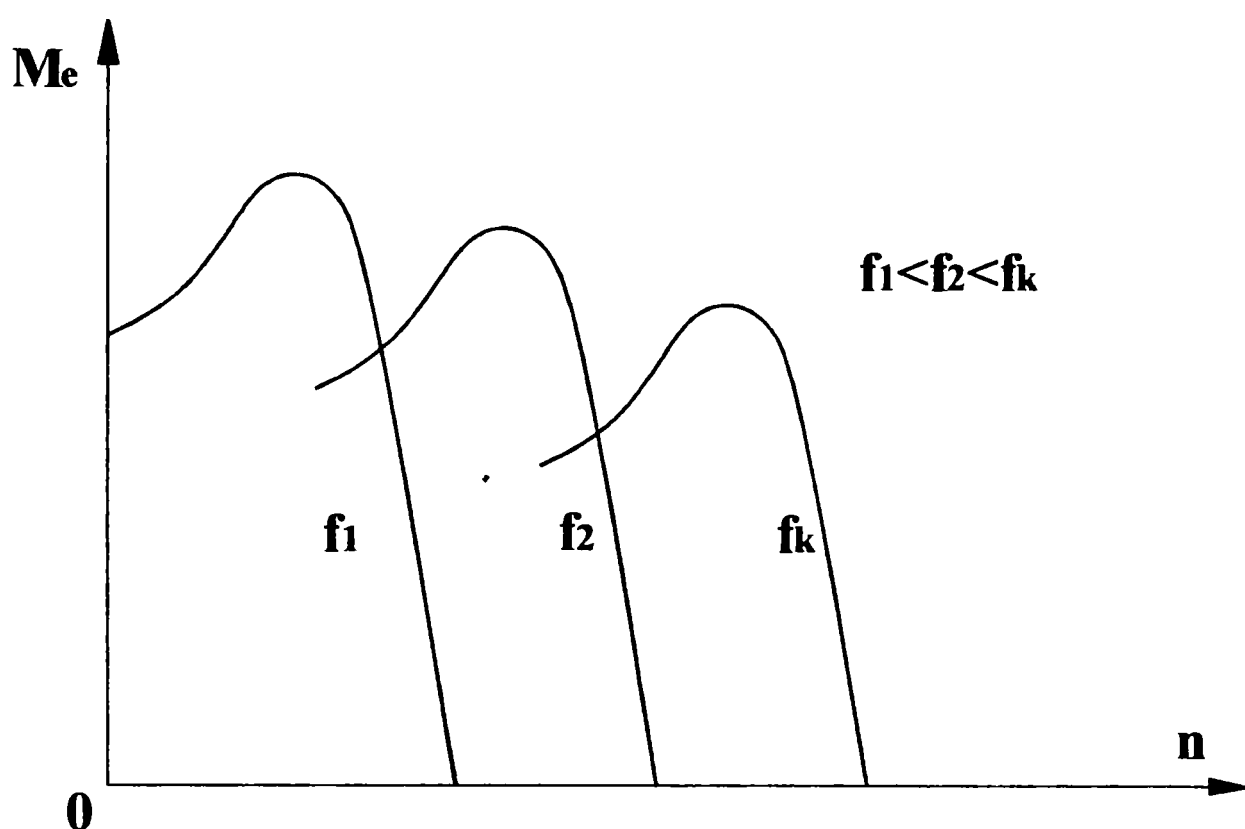


Figura 7.4. Caracteristicile cuplu – turație la diferite valori ale frecvenței de alimentare a motorului de tracțiune asincron

Cuplul real dezvoltat de motorul de tracțiune asincron trebuie să fie mai mic decât cuplul critic, astfel încât în toate condițiile de funcționare să se folosească numai regimurile stabilizate.

7.3.3. Caracteristica de tracțiune a vehiculului

Caracteristica de tracțiune este relația matematică între forța de tracțiune și viteză $F_0(v)$.

Cunoscând parametrii constructivi și funcționali ai motorului de tracțiune, precum și numărul motoarelor, forța de tracțiune la obada roților motoare se determină cu relația [50], [53], [87]:

$$F_0 = \frac{2}{D} \cdot m \cdot i_t \cdot \eta_t \cdot \eta_m \cdot M_e, \quad (7.20)$$

deoarece:

$$M_e = F_{0m} \cdot \frac{D}{2}. \quad (7.21)$$

În relațiile de mai sus, s-au făcut notațiile:

F_{0m} – forța de tracțiune a unui motor;

M_e – cuplul electromagnetic;

D – diametrul roților motoare;

i_t – raportul de transmitere al atacului de osie $i_t = n/n_0$;

η_t – randamentul atacului de osie;

η_m – randamentul motorului de tracțiune;

m – numărul motoarelor de tracțiune.

Viteza vehiculului se determină cu relația:

$$V = \Omega_o \cdot \frac{D}{2}, \quad (7.22)$$

$$V = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n_o}{60} \cdot \frac{D}{2} = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot i_t} \text{ [m/s]}, \quad (7.23)$$

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot i_t} \cdot 3,6 = 0,1884 \cdot \frac{D}{i_t} \cdot n \text{ [km/h]}, \quad (7.24)$$

unde: Ω_o – viteza unghiulară a osiei montate;

n_o – turația osiei montate;

n – turația motorului de tracțiune.

Dacă se înlocuiește relația (7.16) în relațiile de mai sus (7.23) și (7.24) rezultă pentru motorul asincron:

$$V = 0,1884 \cdot \frac{60}{p} \cdot \frac{D}{i_t} \cdot f \cdot (1-s) = 11,3 \cdot \frac{D \cdot f}{p \cdot i_t} \cdot (1-s). \quad (7.25)$$

Pentru demaraj, trebuie avut în vedere ca forța de tracțiune să fie întotdeauna mai mică decât forța de aderență.

Prin înlocuire în relația (7.20) a cuplului din ecuația (7.6), forța de tracțiune poate fi determinată cu următoarea relație:

$$F_0 = \frac{2 \cdot m \cdot i_t \cdot \eta_t \cdot \eta_m \cdot 3 \cdot p \cdot R_r' \cdot U^2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot s \cdot D \cdot \left[\left(R_s + \frac{R_r'}{s} \right)^2 + \left(\frac{f}{f_n} \right)^2 X^2 \right]}. \quad (7.26)$$

7.3.4. Metodologia de calcul pentru stabilirea caracteristicilor de tracțiune în cazul acționării cu mașina asincronă

Datele caracteristice ale unui metrou din București format din două vagoane sunt:

– Formula osiilor: $B_o - B_o$;

– Numărul osiilor motoare: 8;

– Sarcina pe osie: 14 tf;

- Diametrul roților motoare: 920 mm;
- Viteza maximă: 100 km/h;
- Puterea unui tren: 800 kW.

Datele caracteristice pentru motorul de tracțiune [24], [50], [63], [86]:

- Puterea nominală: 200 kW;
- Turația nominală: 1480 rot/min;
- Tensiunea nominală: 750 V;
- Curentul nominal la 50 Hz: 180 A;
- Turația maximă la 125 Hz: 3700 rot/min;
- Cuplul nominal la 50 Hz: 1357 N m;
- Gama de variație a frecvenței: 0,1 – 125 Hz;
- Reactanța rotorului raportată la stator: $X'_r = 0,401 \Omega$;
- Reactanța statorului: $X_s = 0,145 \Omega$;
- Reactanța totală $X = X_s + X'_r = 0,546 \Omega$;
- Rezistența rotorului raportată la stator: $R'_r = 0,104 \Omega$;
- Rezistența statorului: $R_s = 0,039 \Omega$;
- Randamentul nominal al motorului: $\eta_m = 0,925$;
- Randamentul transmisiei: $\eta_t = 0,99$.

a). Stabilirea raportului de transmitere

Având în vedere viteza impusă trenului și cunoscând turația maximă a motorului de tracțiune asincron, raportul de transmitere al angrenajului se va determina din relația:

$$i_t = \frac{n}{n_o}, \quad (7.27)$$

$$n_o = \frac{n}{i_t}, \quad (7.28)$$

unde: n_o – turația osiei la V_{\max} .

Înlocuind ecuația (7.28) în (7,24), rezultă viteza maximă:

$$V_{\max} = 0,1884 \cdot D \cdot n_o, \text{ s-au} \quad (7.29)$$

$$n_o = \frac{V_{\max}}{0,1884 \cdot D}. \quad (7.30)$$

Prin înlocuirea expresiei (7.30) în (7.28), rezultă raportul de transmitere al angrenajului mecanic montat între motorul de tracțiune asincron și osia motoare:

$$i_t = \frac{n_{\max}}{V_{\max}} \cdot 0,1884 \cdot D = \frac{3700}{100} \cdot 0,1884 \cdot 0,92 = 6,413136$$

$$i_t = 6,413136.$$

b). Stabilirea vitezei de circulație

Deoarece la frecvența de 50 Hz turația nominală este 1480 rot/min, rezultă că turația sincronă este 1500 rot/min, iar numărul perechilor de poli $p = 2$.

Turația motorului de tracțiune asincron definită de relația (7.16) conduce la determinarea alunecării nominale când frecvența este de 50 Hz și sarcina nominală:

$$s = 1 - \frac{n \cdot p}{60 \cdot f} = 1 - \frac{1480 \cdot 2}{60 \cdot 50} = 1 - 0,9866 = 0,0133334. \quad (7.31)$$

Viteza vehiculului când tensiunea de alimentare a atins valoarea nominală, iar frecvența a ajuns la de 50 Hz a va fi:

$$V = 0,1884 \cdot \frac{D}{i_t} \cdot n = 0,1884 \cdot \frac{0,92}{6,413} \cdot 1480 = 40 \text{ km/h}, \quad (7.32)$$

c). Stabilirea coeficienților K_1 și K_2 necesari calculelor

Relația de dependență dintre frecvența tensiunii de alimentare și turația câmpului magnetic învârtitor este dată de coeficientul K_1 .

$$K_1 = \frac{n_s}{f} = \frac{60}{p} \quad (7.33)$$

În cazul $p = 2$; $K_1 = 30$

Relația de dependență dintre turația motorului de tracțiune și viteza vehiculului este dată de coeficientul K_2 :

$$K_2 = \frac{n}{v} \quad (7.34)$$

$$K_2 = \frac{3700}{100} = 37$$

d). Determinarea coeficienților a_1 , b_1 , a_2 și b_2 necesari calculelor [50]

Determinarea acestor coeficienți se face din ecuațiile de variație a vitezei de circulație scrise pentru cele două regimuri de funcționare ale vehiculului în funcție de frecvență și tensiunea MT asincron.

La pornirea de pe loc $v = 0$ și $f = 0,1$ Hz.

Tensiunea se determină din condiția cuplului maxim cu relația (7.6) (avându-se în vedere că la pornire alunecarea $s=1$), care prin înlocuire devine:

$$M_e = \frac{3 \cdot 2 \cdot 0,104 \cdot U^2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot 0,0133334 \cdot \left[\left(\frac{0,104}{0,0133334} + 0,038 \right)^2 + 0,546^2 \right]},$$

$$M_e = 0,120658 \cdot \frac{U^2}{f}. \quad (7.35)$$

Înlocuind în această relație cuplul maxim rezultă:

$$U = \sqrt{\frac{M_{\max} \cdot f}{0,120658}}.$$

Pentru $M_{\max} = 1350 \text{ Nm}$, relația anterioară devine:

$$U = \sqrt{\frac{1357 \cdot f}{0,120658}} = 106,05028 \cdot \sqrt{f}. \quad (7.36)$$

Pentru $f = 0,1 \text{ Hz}$, rezultă valoarea minimă a tensiunii de la care începe reglarea mașinii asincrone:

$$U = \sqrt{\frac{1357 \cdot 0,1}{0,120658}} = \sqrt{1125} = 33,55 \text{ V}.$$

Relațiile de variație liniară a vitezei vor fi:

$$V = a_1 + b_1 \cdot f, \quad (7.37)$$

$$V = a_2 + b_2 \cdot U. \quad (7.38)$$

Cu frecvența de pornire $f = 0,1$ și cu tensiunea $U = 33,55 \text{ V}$ ecuațiile (7.37) și (7.38) la viteza $v = 0$ devin:

$$a_1 + b_1 \cdot 0,1 = 0$$

$$a_2 + b_2 \cdot 33,55 = 0$$

La sfârșitul demarajului, adică la tensiunea maximă $U = 750 \text{ V}$, frecvența este de 50 Hz , iar viteza vehiculului calculată anterior este $v = 40 \text{ km/h}$. Cu aceste valori, ecuațiile (7.37) și (7.38) devin:

$$a_1 + b_1 \cdot 50 = 40$$

$$a_2 + b_2 \cdot 750 = 40$$

Din reunirea celor patru ecuații rezultă:

$$a_1 + b_1 \cdot 0,1 = 0$$

$$a_1 + b_1 \cdot 50 = 40$$

$$a_1 = -0,1 \cdot b_1$$

$$-0,1 \cdot b_1 + b_1 \cdot 50 = 40 \Rightarrow 49,9 \cdot b_1 = 40$$

$$a_1 = -\frac{4}{49,9}$$

$$b_1 = \frac{40}{49,9}$$

$$a_2 + b_2 \cdot 33,55 = 0$$

$$a_2 + b_2 \cdot 750 = 40$$

$$a_2 = -33,55 \cdot b_2$$

$$-33,55 \cdot b_2 + 750 \cdot b_2 = 40 \Rightarrow 716,45 \cdot b_2 = 40$$

$$a_2 = -\frac{40 \cdot 33,55}{716,45}$$

$$b_2 = \frac{40}{716,45}$$

e). Calculul forței de tracțiune

Calculul forței de tracțiune la obada roților motoare ale vehiculului se face cu relațiile (7.20) și (7.6), [50]:

$$F_0 = \frac{2}{D} \cdot m \cdot i_t \cdot \eta_t \cdot \eta_m \cdot M_e \quad (7.39)$$

În timpul demarării de la $v = 0$ până la $v = 40$ km/h, tensiunea variază de la $U = 33,55$ V până la valoarea maximă $U = 750$ V când viteza este 40 km/h.

În această perioadă de timp, frecvența variază de la $f = 0,1$ Hz până la $f = 50$ Hz.

De la $v = 40$ km/h până la $v_{\max} = 100$ km/h, tensiunea rămâne constantă $U_{\max} = 750$ V, iar frecvența variază de la $f = 50$ Hz până la $f_{\max} = 125$ Hz.

De la $v = 0$ până la $v = 40$ km/h, forța de tracțiune rămâne constantă, iar între $v = 40$ km/h și $v_{\max} = 100$ km/h, forța de tracțiune se modifică pe baza modificării frecvenței respectiv a vitezei.

Din egalitatea relațiilor (7.37) și (7.38), rezultă modul de variație a tensiunii în funcție de frecvență $U(f)$, în domeniul $f=0,1$ Hz până la $f=50$ Hz, adică:

$$a_1 + b_1 \cdot f = a_2 + b_2 \cdot U,$$

$$U = \frac{a_1 - a_2}{b_2} + \frac{b_1}{b_2} \cdot f \quad (7.40)$$

Făcând înlocuirile rezultă:

$$U = 32,114 + 14,3577 \cdot f \quad (7.41)$$

Peste frecvența de 50 Hz și până la 125 Hz, tensiunea se va menține constantă și egală cu valoarea maximă.

Din ecuația (7.25), (7.28) și (7.30) rezultă:

$$v = \frac{30}{37} \cdot f \cdot (1 - s), \quad (7.42)$$

iar:

$$s = 1 - \frac{37}{30} \cdot \frac{v}{f} \quad (7.43)$$

Prin înlocuirea frecvenței din ecuația (7.37):

$$f = \frac{(v - a_1)}{b_1}, \quad (7.44)$$

în ecuația (7.43), rezultă variația alunecării în funcție de viteză $s(v)$:

$$s = 1 - \frac{37}{30} \cdot b_1 \cdot \frac{v}{v - a_1}. \quad (7.45)$$

Variația frecvenței cu viteza din ecuația (7.44) este valabilă pentru $v=0$ până la $v=40$ km/h.

Deoarece peste frecvența de 50 Hz, alunecarea rămâne practic aceeași (corespunzătoare încărcării nominale), variația frecvenței cu viteza este dată de relația (7.42), iar prin înlocuirea lui $s=s_n=0,0133334$ rezultă $f(v)$:

$$v = \frac{30}{37} \cdot f \cdot (1 - 0,0133334) = 0,8 \cdot f.$$

$$v = 0,8 \cdot f, \quad (7.46)$$

$$f = 1,25 \cdot v. \quad (7.47)$$

Din ecuația (7.34) și (7.37), rezultă variația frecvenței în funcție de turație $f = f(n)$, pentru turații cuprinse între $n=0$ și $n=1480$ rot/min, dată de relația:

$$f = \frac{n}{k_2 \cdot b_1} - \frac{a_1}{b_1}. \quad (7.48)$$

Din ecuația (7.16), rezultă variația frecvenței în funcție de turație $f = f(n)$, pentru turații cuprinse între $n=1480$ și $n=3700$ rot/min, dată de relația:

$$f = \frac{n}{30 \cdot (1 - s_n)}. \quad (7.49)$$

Din ecuația (7.34), rezultă variația turației în funcție de viteză $n = f(v)$, dată de relația:

$$n = k_2 \cdot v. \quad (7.50)$$

Din ecuația (7.38), rezultă variația $U(v)$ tensiunii funcție de viteză pentru viteze de la $v=0$ până la $v=40$ km/h, dată de relația:

$$U = \frac{v - a_2}{b_2}. \quad (7.51)$$

Înlocuind ecuația (7.34) în ecuația (7.51), rezultă variația tensiunii funcție de turație $U = f(n)$, pentru $n=0$ până la $n=1480$ rot/min:

$$U = \frac{n}{k_2 \cdot b_2} - \frac{a_2}{b_2} \quad (7.52)$$

De la $v=0$ până la $v=40$ km/h, cuplul rămâne constant și egal cu valoarea maximă. Peste $v=40$ km/h, cuplul se obține înlocuind pe (7.47) în (7.6) considerându-se alunecarea egală cu cea nominală. În această situație, se poate scrie relația $M_e(v)$,

$$M_e = \frac{3 \cdot p \cdot R_r' \cdot U^2}{2 \cdot \pi \cdot 1,25 \cdot v \cdot s_n \cdot \left[\left(R_s + \frac{R_r'}{s_n} \right)^2 + \left(\frac{1,25 \cdot v}{f_n} \right)^2 X^2 \right]}, \quad (7.53)$$

Forța de tracțiune se obține înlocuind relația (7.53) în (7.39). Până la viteza de 40 km/h, forța de tracțiune rămâne constantă și egală cu valoarea maximă.

Diagramele corespunzătoare ecuațiilor anterioare $U(f)$, $f(v)$, $s(v)$, $f(n)$, $n(v)$, $U(v)$, $U(n)$, $M_e(v)$, și $F_0(v)$ sunt reprezentate în figurile următoare.

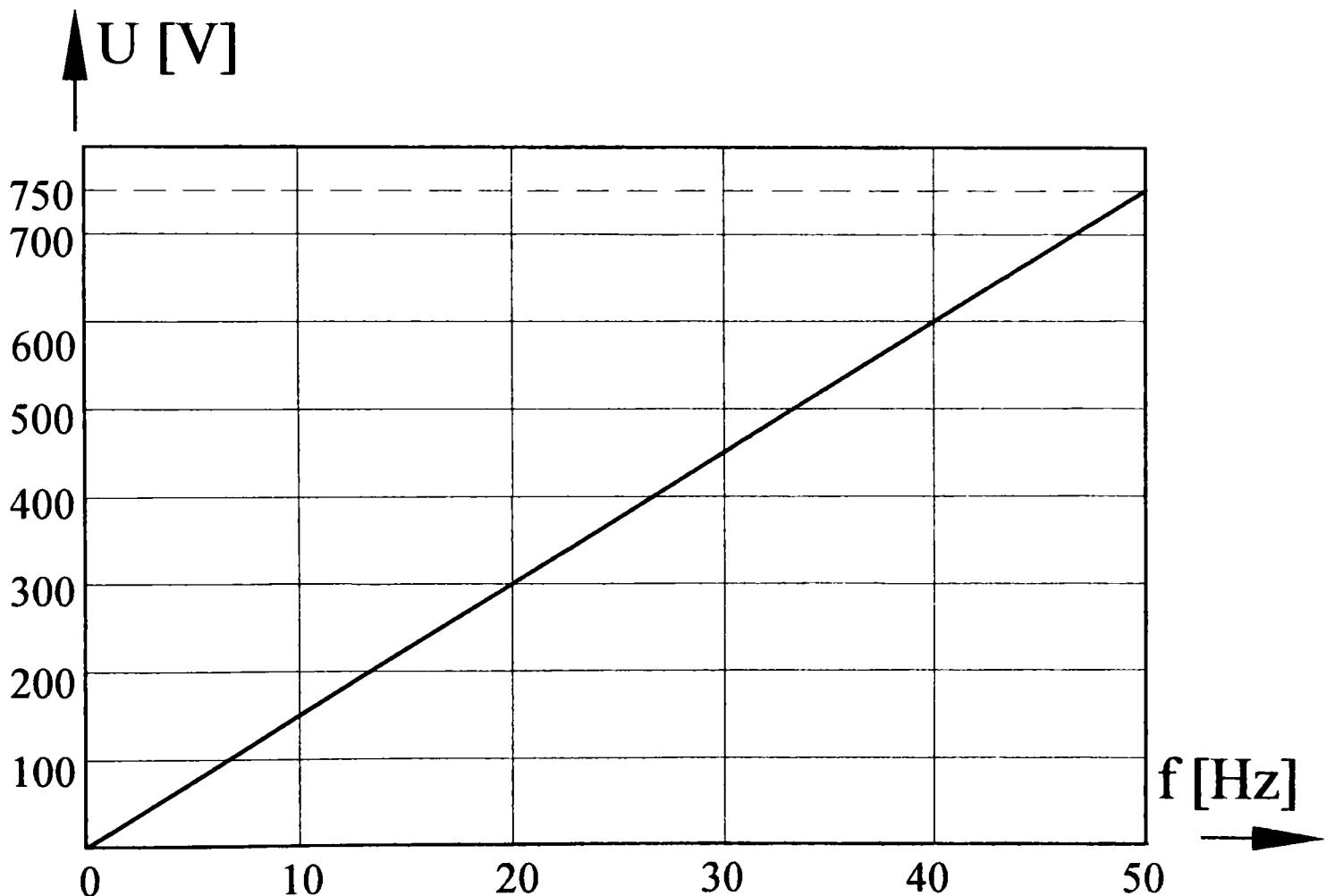


Fig.7.5. Caracteristica de comandă pentru metroul cu MT asincrone tensiune - frecvență $U(f)$

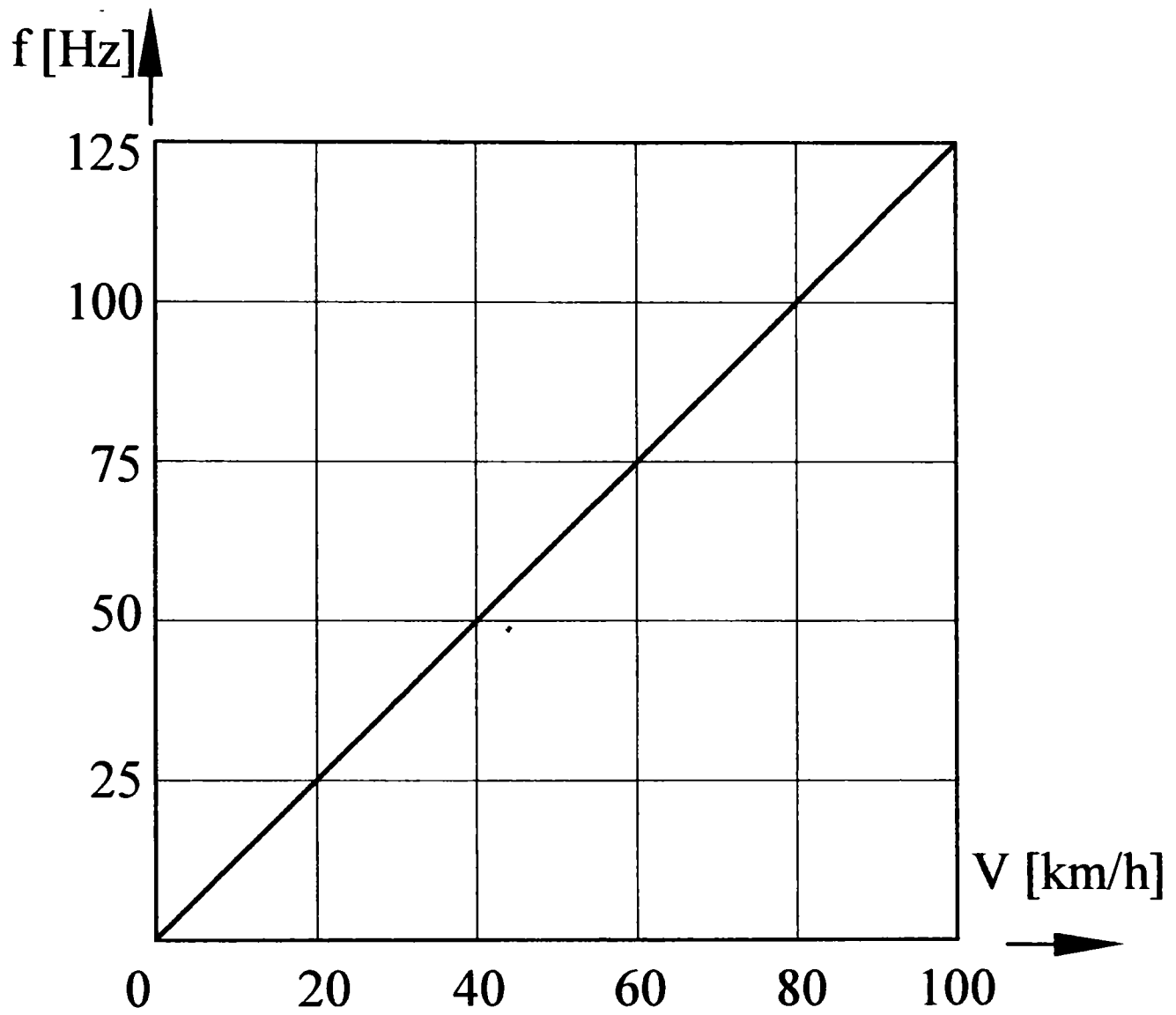


Fig.7.6. Caracteristica de comandă frecvență – viteză, $f(v)$, pentru metroul cu MT asincrone

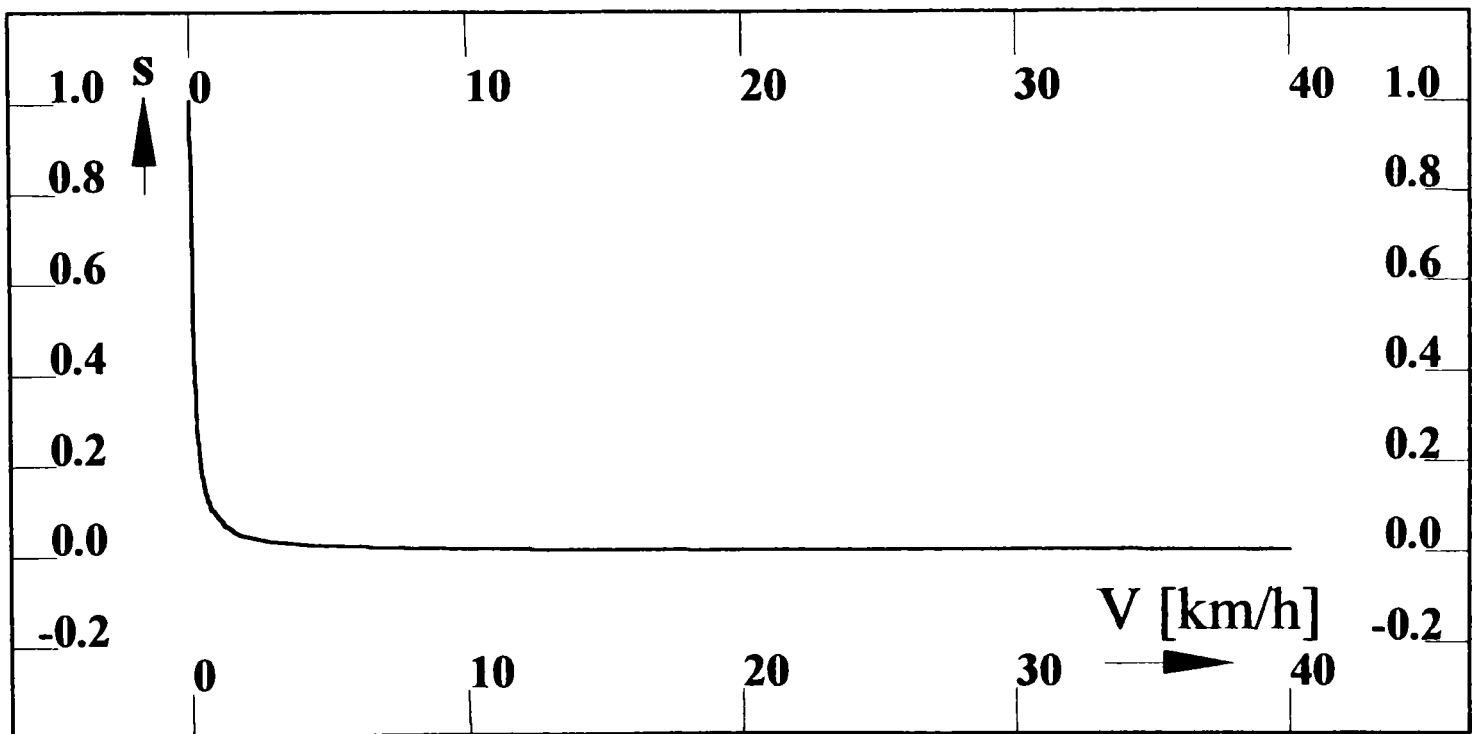


Fig.7.7. Caracteristica de comandă alunecare – viteză, $s(v)$, pentru metroul cu MT asincrone

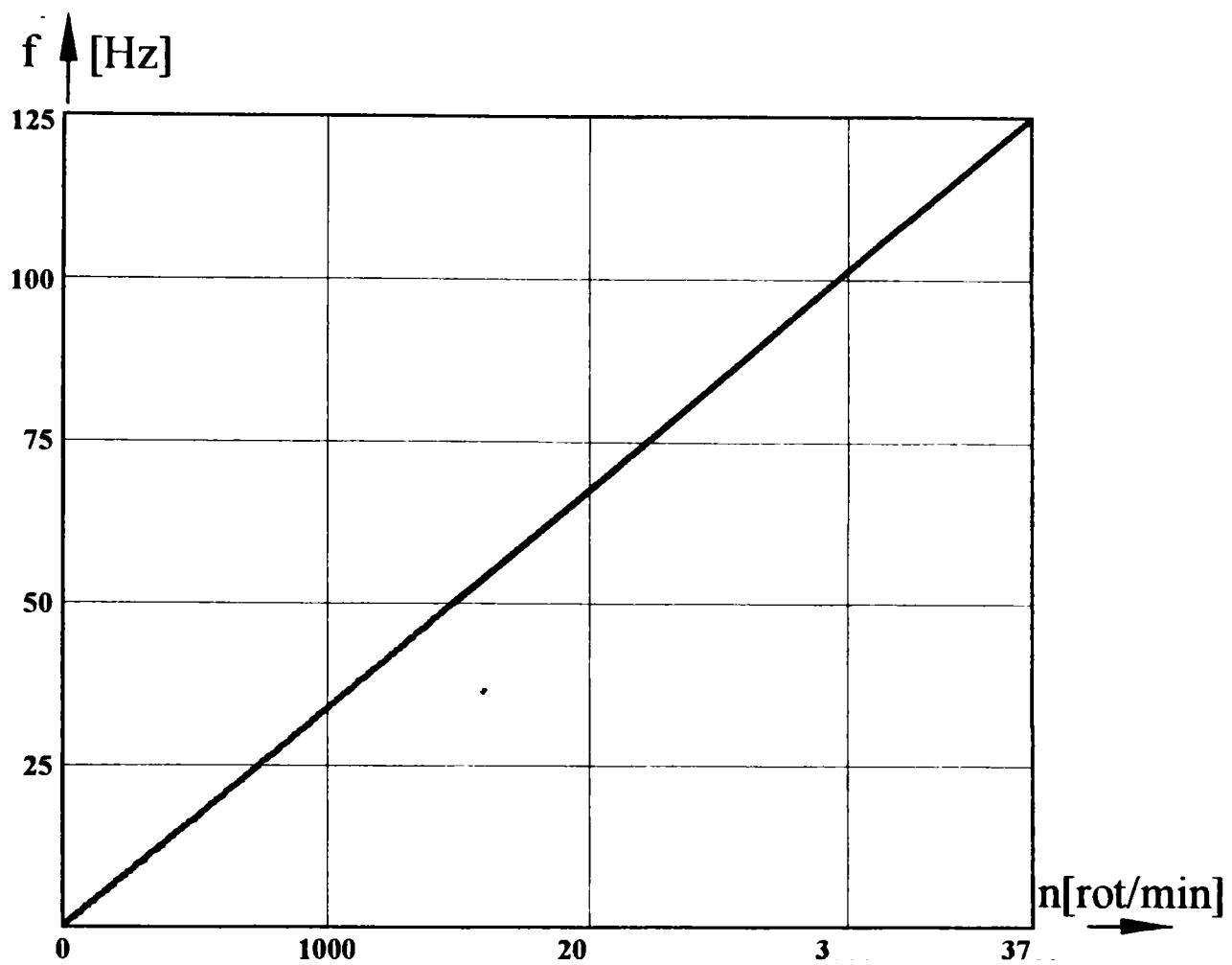


Fig.7.8. Caracteristica de comandă frecvență – turație, $f(n)$, pentru metroul cu MT asincrone

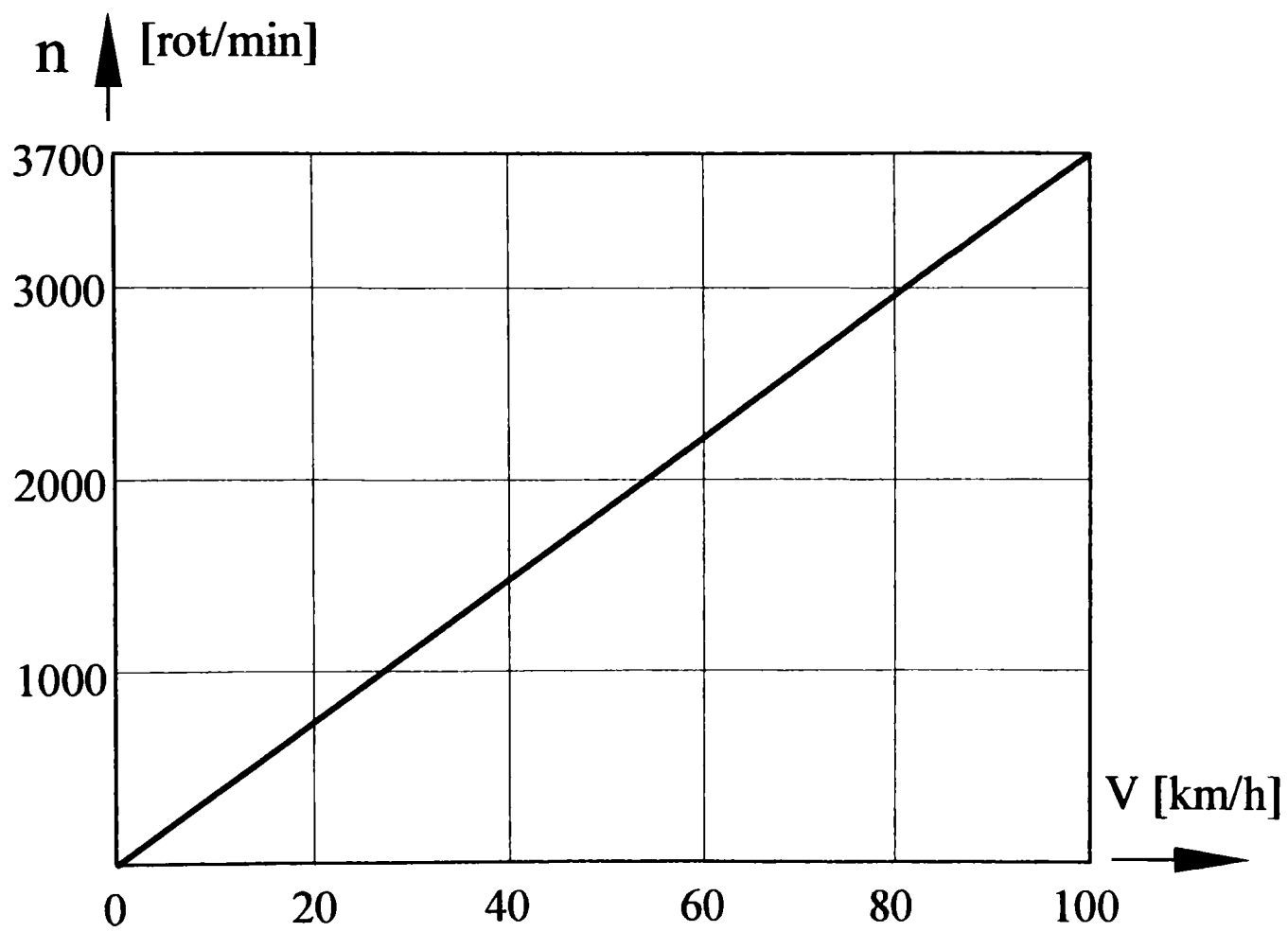


Fig.7.9. Caracteristica turație – viteză, $n(v)$, pentru metroul cu MT asincrone

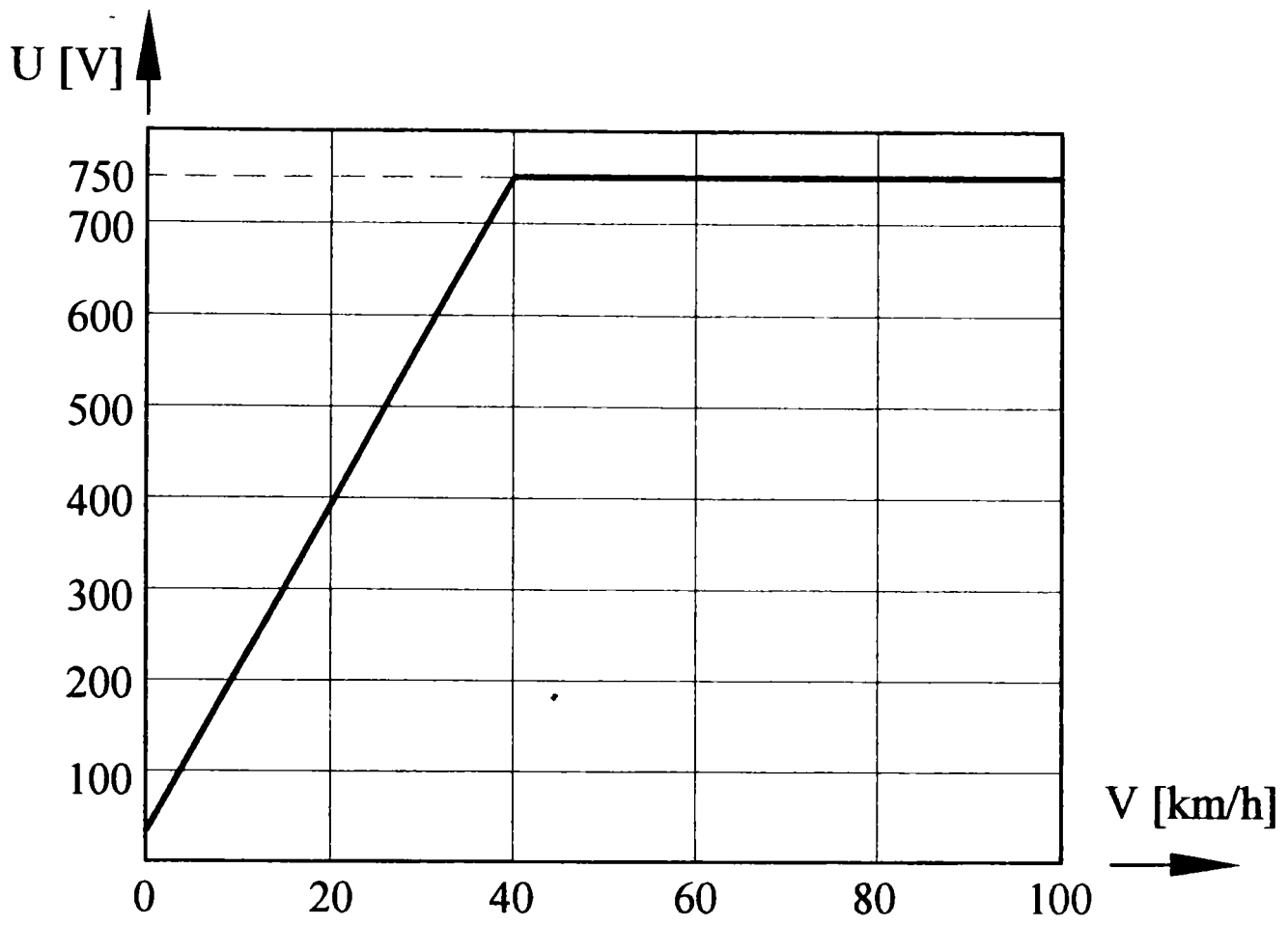


Fig.7.10. Caracteristica de comandă tensiune – viteză, $U(v)$, pentru metroul cu MT asincrone

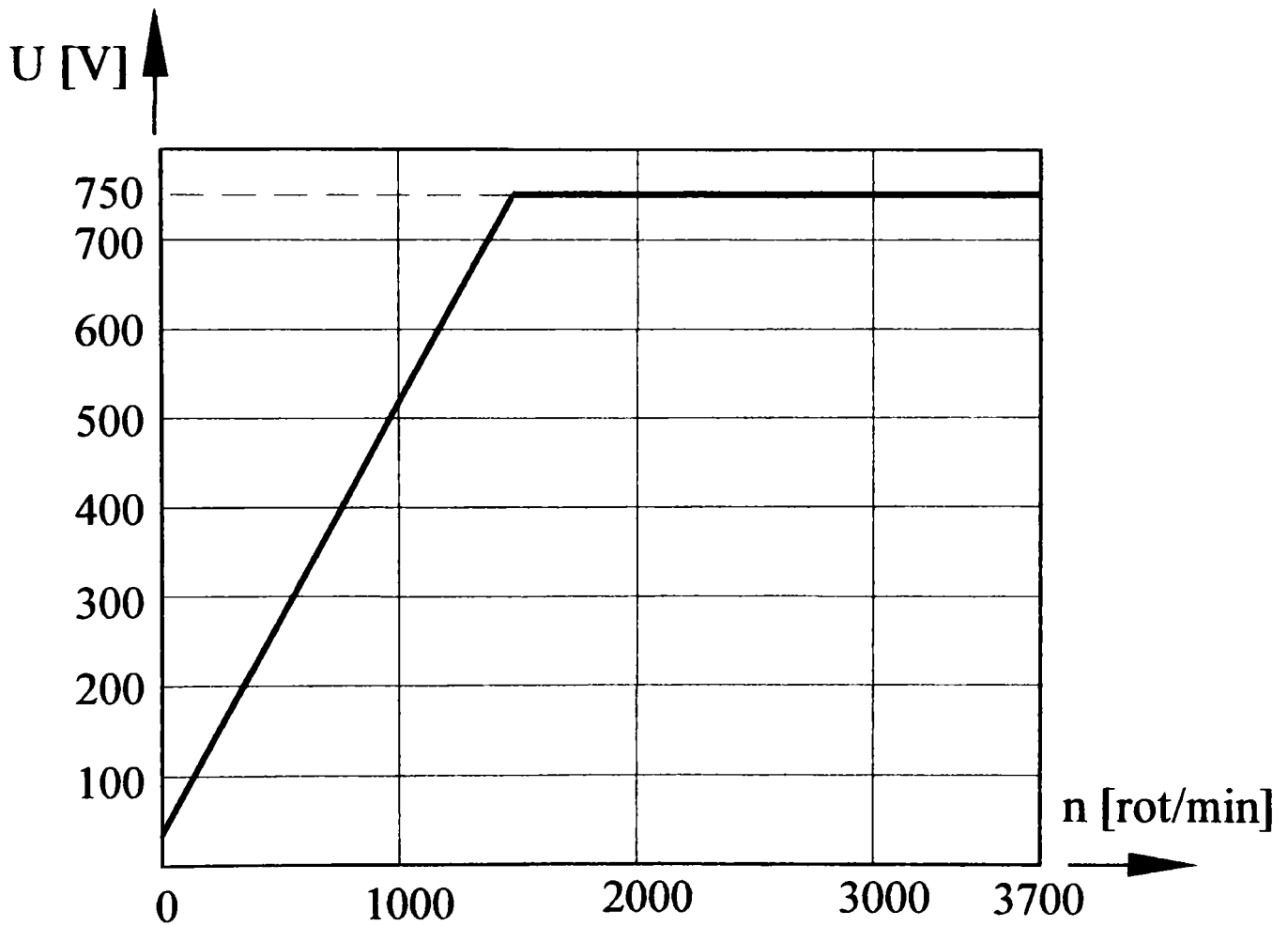


Fig.7.11. Caracteristica de comandă tensiune – turație, $U(n)$, pentru metroul cu MT asincrone

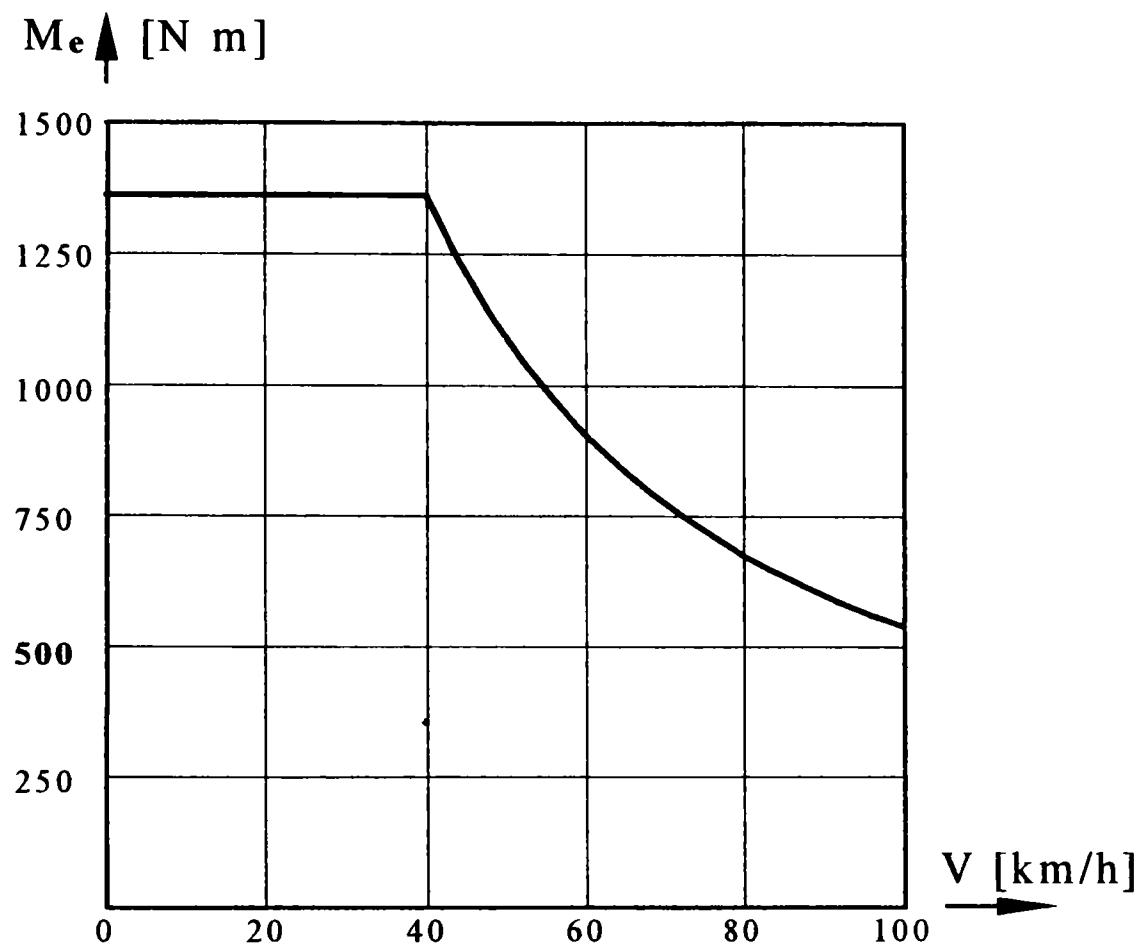


Fig.7.12. Caracteristica cuplu-viteză, $M_e(v)$, pentru metroul cu motoare de tracțiune asincrone

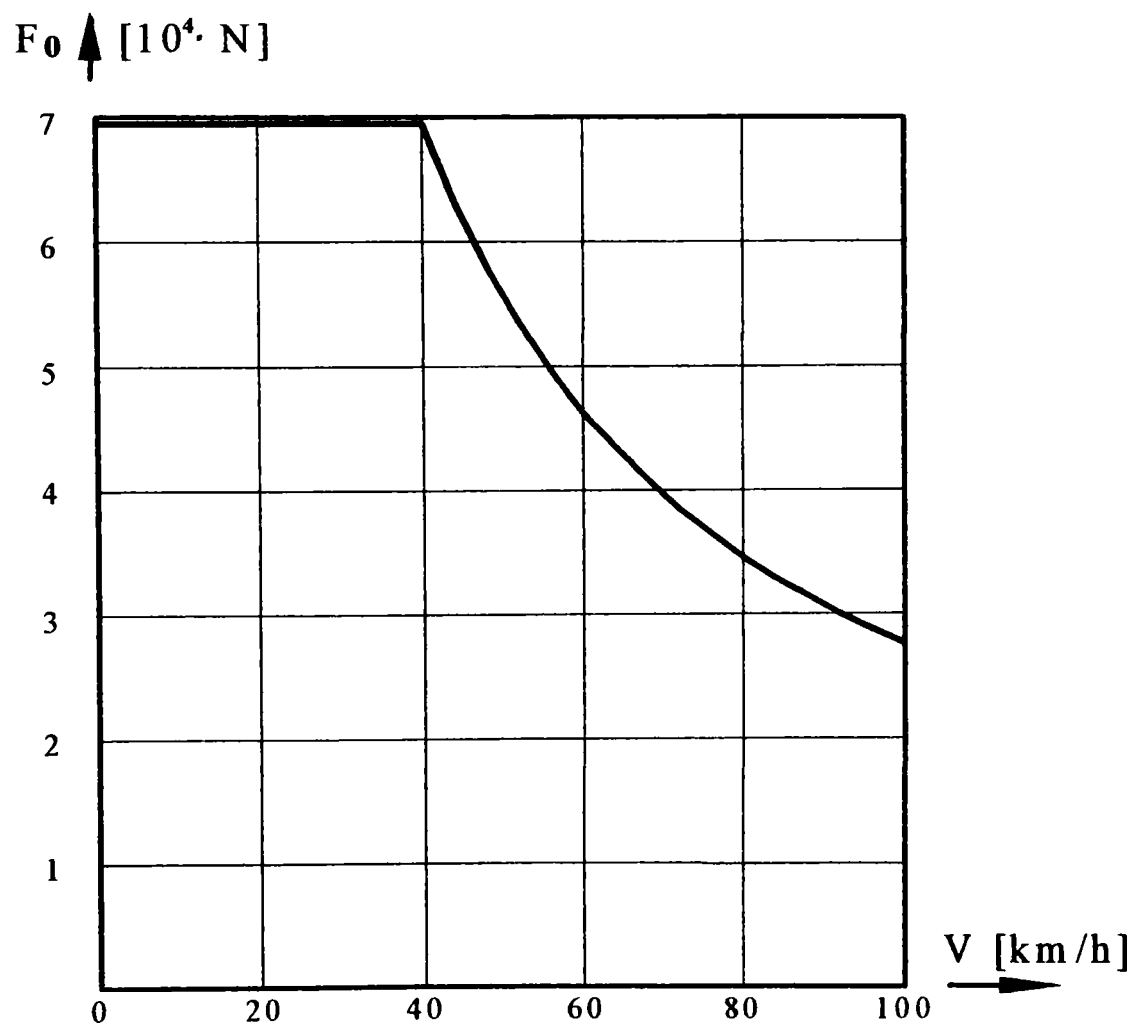


Fig.7.13. Caracteristica forței de tracțiune $F_0(v)$, pentru metroul cu MT asincrone

Tabelul 7.1

f [Hz]	U [V]	s	n [rot/min]	V [km/h]	M _e [N.m]	F ₀ [N]
29	448,49	0,0147646	857,29	23,17	1361,25	69516,38
30	462,84	0,0146512	886,89	23,97	1361,25	69516,38
31	477,2	0,0145452	916,49	24,77	1361,25	69516,38
32	491,56	0,0144457	946,09	25,57	1361,25	69516,38
33	505,92	0,0143522	975,69	26,37	1361,25	69516,38
34	520,28	0,0142643	1005,29	27,17	1361,25	69516,38
35	534,63	0,0141803	1035,26	27,98	1361,25	69516,38
36	548,99	0,014102	1064,86	28,78	1361,25	69516,38
37	563,35	0,014028	1094,46	29,58	1361,25	69516,38
38	577,71	0,0139578	1124,06	30,38	1361,25	69516,38
39	592,07	0,0138912	1153,66	31,18	1361,25	69516,38
40	606,42	0,013828	1183,26	31,98	1361,25	69516,38
41	620,78	0,013767	1213,23	32,79	1361,25	69516,38
42	635,14	0,0137098	1242,83	33,59	1361,25	69516,38
43	649,5	0,0136551	1272,43	34,39	1361,25	69516,38
44	663,85	0,013603	1302,03	35,19	1361,25	69516,38
45	678,21	0,0135532	1331,63	35,99	1361,25	69516,38
46	692,57	0,0135055	1361,23	36,79	1361,25	69516,38
47	706,93	0,0134593	1391,20	37,6	1361,25	69516,38
48	721,29	0,0134155	1420,80	38,4	1361,25	69516,38
49	735,64	0,0133736	1450,40	39,2	1361,25	69516,38
50	750	0,0133334	1480	40	1361,25	69516,38
55	750	0,0133334	1628	44	1236,98	63170,08
60	750	0,0133334	1776	48	1133,37	57879,2
65	750	0,0133334	1924	52	1045,67	53400,18
70	750	0,0133334	2072	56	970,45	49559,06
75	750	0,0133334	2220	60	905,23	46228,27
80	750	0,0133334	2368	64	848,13	43312,12
85	750	0,0133334	2516	68	797,71	40737,45
90	750	0,0133334	2664	72	752,87	38447,35
95	750	0,0133334	2812	76	712,71	36396,9
100	750	0,0133334	2960	80	676,55	34550,15
105	750	0,0133334	3108	84	643,81	32878,01
110	750	0,0133334	3256	88	614,02	31356,68
115	750	0,0133334	3404	92	586,8	29966,48
120	750	0,0133334	3552	96	561,82	28691,05
125	750	0,0133334	3700	100	538,82	27516,6

f [Hz]	U [V]	s	n [rot/min]	V [km/h]	M _e [N.m]	F ₀ [N]
0,1	33,55	1	0	0	1361,25	69516,38
0,2	34,99	0,5061728	2,96	0,08	1361,25	69516,38
0,3	36,42	0,341344	5,92	0,16	1361,25	69516,38
0,4	37,86	0,258883	8,88	0,24	1361,25	69516,38
0,5	39,29	0,2094017	11,84	0,32	1361,25	69516,38
0,6	40,73	0,1764051	14,8	0,4	1361,25	69516,38
0,7	42,17	0,1528334	17,76	0,48	1361,25	69516,38
0,8	43,6	0,1351532	20,72	0,56	1361,25	69516,38
0,9	45,04	0,121401	23,68	0,64	1361,25	69516,38
1	46,47	0,1103987	26,64	0,72	1361,25	69516,38
2	60,83	0,0608823	56,24	1,52	1361,25	69516,38
3	75,19	0,0443747	85,84	2,33	1361,25	69516,38
4	89,55	0,0360433	115,81	3,13	1361,25	69516,38
5	103,9	0,0311184	145,41	3,93	1361,25	69516,38
6	118,26	0,0278316	175,01	4,73	1361,25	69516,38
7	132,62	0,0254822	204,65	5,53	1361,25	69516,38
8	146,98	0,0237192	234,21	6,33	1361,25	69516,38
9	161,33	0,0223475	263,81	7,13	1361,25	69516,38
10	175,69	0,0212374	293,78	7,94	1361,25	69516,38
11	190,05	0,0203411	323,38	8,74	1361,25	69516,38
12	204,41	0,019594	352,98	9,54	1361,25	69516,38
13	218,77	0,0189615	382,58	10,34	1361,25	69516,38
14	233,12	0,0184192	412,18	11,14	1361,25	69516,38
15	247,48	0,0179491	441,78	11,94	1361,25	69516,38
16	261,84	0,0175329	471,75	12,75	1361,25	69516,38
17	276,2	0,0171704	501,35	13,55	1361,25	69516,38
18	290,55	0,016848	530,95	14,35	1361,25	69516,38
19	304,91	0,0165595	560,55	15,15	1361,25	69516,38
20	319,27	0,0162999	590,15	15,95	1361,25	69516,38
21	333,63	0,0160649	619,75	16,75	1361,25	69516,38
22	347,99	0,0158486	649,72	17,56	1361,25	69516,38
23	362,34	0,0156537	679,32	18,36	1361,25	69516,38
24	376,7	0,015475	708,92	19,16	1361,25	69516,38
25	391,06	0,0153106	738,52	19,96	1361,25	69516,38
26	405,42	0,0151588	768,12	20,76	1361,25	69516,38
27	419,77	0,0150182	797,72	21,56	1361,25	69516,38
28	434,13	0,0148861	827,32	22,37	1361,25	69516,38

Din calculele efectuate cu relațiile precedente, rezultă valorile frecvenței f , tensiunii U , turației n , vitezei v , cuplului M_e și forței de tracțiune F_0 , trecute în tabelul 7.1. Pe baza lor au fost trasate diagramele din figurile 7.5 până la 7.13, ele reprezentând modul de variație și de interdependență al parametrilor arătați mai sus, în cazul reglării vitezei metroului, pentru un motor de tracțiune asincron ales. Aceste interdependențe dintre frecvența f , tensiunea U și viteza v , trebuie să fie realizate de inverter, astfel încât să se obțină o reglare a vitezei continuu, fără șocuri mecanice și fără depășirea aderenței. Valorile parametrilor din tabelul 7.1 reprezintă de fapt limitele admisibile până la care poate să funcționeze vehiculul.

7.4. Invertorul de frecvență

7.4.1. Introducere, descriere și funcționarea schemei

În acest subcapitol se urmărește să se dea niște jaloane privind, sistemul de acționare cu mașina de curent alternativ asincron trifazat și reglarea vitezei prin inverter de frecvență, recomandat de autor pentru țara noastră.

Construcția pe bază de semiconductoare comandate a agregatelor componente din tracțiunea electrică a permis obținerea de performanțe în conducerea automată a vehiculului.

Odată cu apariția tiristoarelor GTO, ele au fost folosite și la realizarea invertoarelor, prezentând astfel unele aspecte noi, datorită performanțelor superioare ale acestora și anume:

- timp redus la aprindere și blocare;
- posibilitatea întreruperii curentului de sarcină la orice timp comandat;
- nu au circuite auxiliare de stingere;
- numărul semiconductoarelor pe partea circuitului de sarcină sunt reduse, datorită dispariției circuitelor de stingere.

Apariția tranzistoarelor de putere a dus la folosirea acestora și în tracțiunea electrică, simplificând și mai mult schema invertoarelor.

Una din schemele posibile de aplicat și la metroul din România este prezentată în figura 7.14, unde s-au făcut notațiile din tabelul 7.2.

Tabelul 7.2.

CF1	Condensatorul filtru
D1	Diodă de protecție
4D1	Diodă de sens pentru tracțiune pe pantograf vagon A
4D2	Diodă de sens pentru tracțiune pe pantograf vagon B

DF1 – DF6	Diode de frânare
DIF	Dioda de întoarcere la funcționarea în regim de frânare
DIT	Dioda de întoarcere la funcționarea în regim de tracțiune
F1 – F8	Siguranțe fuzibile rapide pe circuitul de intrare
F9	Siguranță fuzibilă rapidă pe circuitul de minus
F10	Siguranță fuzibilă rapidă pentru încărcare inițială condensator filtru
KR	Contactator pentru încărcare inițială a condensatorului filtru
KL	Contactatorul de linie
LC	Linia de contact
LR	Inductivitate de intrare
M1	Motorul de tracțiune asincron
S _{III}	Șina a III-a de contact
RF	Reostatul de frânare
RP	Rezistență de protecție pentru încărcarea inițială a condensatorului
Sc	Scurtcircuitor
TT1 – TT6	Tiristoare pentru funcționarea în regim de tracțiune
TFRp	Tiristor pentru funcționarea în regim frânare recuperativă
TFRs	Tiristor pentru funcționarea în regim frânare reostatică
1U1 – 1U8	Captatoarele energiei electrice
2U1 – 2U8	Contactele de minus la osie
3U1 – 3U2	Înterupătoarele automate ultrarapide
4U1	Pantograful
4U2	Contactator pentru alimentare prin pantograf
4U3	Releul maximal de curent
5U1 – 5U2	Protecția diferențială
5U3	Descărcătorul de tensiune
6U1	Traductorul de măsură a tensiunii din rețea (TTR)
7U1	Traductor de măsură a tensiunii din filtru (TTF)
8U1 – 8U3	Traductoare de măsură a curentului prin motoarele de tracțiune
9U1	Traductor de măsură a curentului de intrare prin inverter

În general, acolo unde aceste soluții au fost aplicate, pentru puteri mai mici, se folosesc tranzistoare IGBT (pentru construcția invertoarelor), iar pentru puteri mai mari, se utilizează tiristoare GTO.

Nu toate soluțiile aplicate de străini utilizează scheme și cu frânare reostatică, aceasta și datorită complicației inverterului precum și creșterii greutateii și volumului pentru reostatul de frânare.

Pentru soluția din România, inverterul va trebui să realizeze și frânarea reostatică, întrucât nu toate magistralele au substațiile conectate în paralel, astfel încât în orice moment să existe alte vehicule în regim de tracțiune. Inverterul propus de autor (folosit și de alte țări) are avantajul că este foarte simplu.

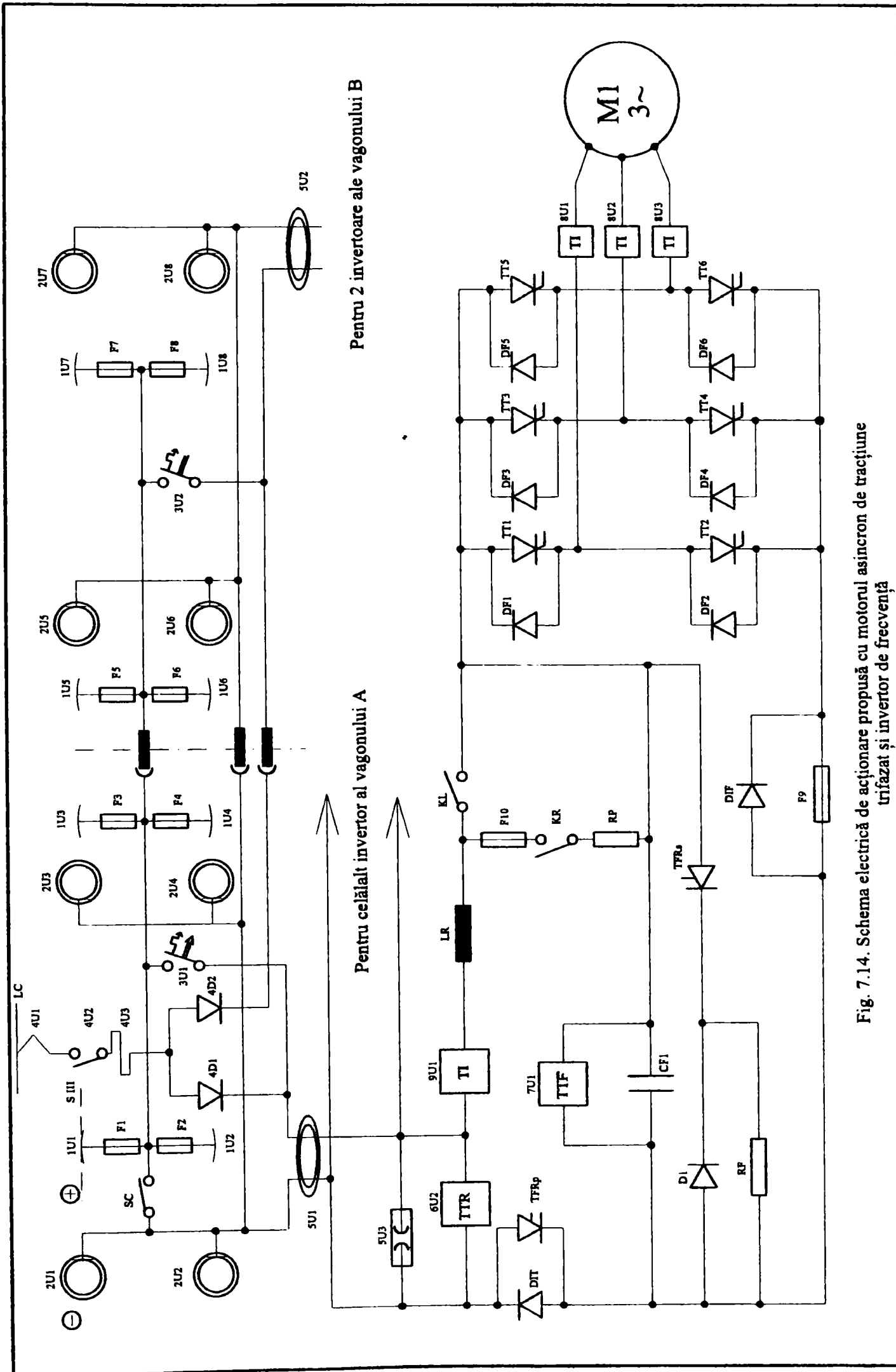


Fig. 7.14. Schema electrică de acționare propusă cu motorul asincron de tracțiune trifazat și inverter de frecvență

Invertorul, motorul asincron de tracțiune și celelalte agregate componente trebuie să asigure funcționarea vehiculului în toate condițiile impuse de exploatare.

a). Funcționarea pe captatoare

a.1). Regimul de tracțiune

În această situație, tensiunea de alimentare de 750 Vcc este preluată de la rețea prin șina a III-a și captatoarele 1U1 – 1U8. Circuitul electric de trecere al curentului se face apoi prin întrerupătorul automat rapid 3U1 (al vagonului A), respectiv 3U2 (al vagonului B). Odată trecut prin protecția diferențială 5U1, curentul se ramifică la cele 2 invertoare ale vagonului A, respectiv prin 5U2 la alte 4 invertoare ale vagonului B. De aici, în continuare, schema electrică este identică pentru toate cele 4 invertoare ale unei rame de metrou.

Protecția la scurtcircuit a conductoarelor de intrare de la fiecare captator, până la întrerupătorul automat ultrarapid, este realizată prin siguranțele fuzibile F1 – F8, iar protecția la scurtcircuit a întregii instalații de tracțiune se realizează de către întrerupătorul automat ultrarapid 3U1 pentru vagonul A și 3U2 pentru vagonul B.

Împotriva atingerilor accidentale la caroseria vagonului a unui conductor sau agregat, se utilizează protecția diferențială 5U1 respectiv 5U2, care la sesizarea unei diferențe de curent de aproximativ de 25 A între cele două căi de curent, va comanda deconectarea întrerupătoarelor automate ultrarapide 3U1 și 3U2.

Protecția la supratensiuni apărute în linia de alimentare este realizată de către descărcătorul 5U3.

Prezența tensiunii de la rețea la bornele invertorului este sesizată de către traductorul de tensiune rețea 6U2, iar a curentului prin invertor, de către traductorul de curent 9U1.

Circuitul de alimentare inițială a condensatorului filtru CF1 (când schema este conectată la rețea), este asigurat prin siguranța fuzibilă rapidă F10, contactorul KR și rezistența de protecție RP.

După încărcare, este comandat contactorul KL prin care se asigură circuitul electric de alimentare al invertorului. Tensiunea de încărcare (sau de descărcare) de la bornele condensatorului filtru CF1 este măsurată în permanență de traductorul de tensiune filtru (TTF), 7U1.

Prin comanda decalată în timp a tiristoarelor de tracțiune TT1 – TT6, se obține tensiunea alternativă trifazată la bornele motorului de tracțiune M1. Prezența curentului prin cele 3 faze ale motorului este sesizată și măsurată de către traductoarele de curent (TI), 8U1 – 8U3. După trecerea curentului prin motor, acesta continuă prin siguranța fuzibilă F9, dioda de întoarcere la tracțiune DIT, iar apoi la minusul vagonului.

a.2). Regimul de frânare

La frânarea recuperativă, energia electrică debitată de mașina asincronă devenită generator ajunge la rețea prin: diodele DF1 – DF6, contactorul KL, inductivitatea LR, traductorul de curent 9U1, protecția diferențială 5U1, întrerupătorul automat ultrarapid 3U1, siguranțele fuzibile F1 – F8, șina a III-a. Consumată de alte vehicule în regim de tracțiune, energia electrică dă naștere unui curent care se închide prin: contactele de osie 2U1 – 2U8, protecția diferențială 5U1, tiristorul frânării recuperative TFRp și apoi prin siguranța fuzibilă F9 (sau dioda de întoarcere la frânare DIF).

La frânarea reostatică (când nu există alt vehicul în regim de tracțiune), se comandă tiristorul de frânare TFRs care asigură închiderea curentului prin reostatul RF.

b). Funcționare pe pantograf

În această situație, tensiunea de alimentare de 750 Vcc este preluată de la linia de contact prin pantograful 4U1, contactorul separator 4U2, releul maximal de curent 4U2, dioda 4D1 pentru vagonul A și dioda 4D2 pentru vagonul B. După dioda 4D1, circuitul de tracțiune este același ca și în cazul funcționării pe captatoare.

Funcționare pe pantograf este condiționată de protecția muncii pentru personalul de deservire din depouri, unde șina a III-a nu mai poate exista, iar alimentarea vehiculului cu energie electrică se face prin catenara aeriană. Același mod de alimentare se regăsește în toate zonele de intrare din depouri în tunel (mai ales la depourile de suprafață).

Deoarece funcționarea pe pantograf se face numai în cazul manevrelor (deci cu viteză mică), așa cum se poate constata și din schemă, datorită diodelor 4D1 și 4D2 nu se poate realiza frânarea recuperativă, ci numai reostatică. Dacă circulația vehiculelor în această zonă este relativ mare (și se justifică o investiție în plus), atunci frânarea recuperativă și în această situație se poate realiza dacă se mai introduce câte un tiristor în antiparalel cu fiecare dintre diodele 4D1 și 4D2.

Autonomia funcționării cu un singur vagon (A sau B) dintr-o ramă de metrou, se poate realiza prin separarea alimentării cu energie electrică din întrerupătorul automat rapid 3U1 respectiv 3U2. Autonomia funcționării în cazul aceluiași vagon cu mai puțin de 4 invertoare este asigurată de către contactoarele KL și KR, care permit izolarea unui inverter.

7.4.2. Condiții tehnice de exploatare pentru invertoarele de tensiune – frecvență

Invertoarele trebuie să asigure funcționarea motoarelor de tracțiune în toate regimurile, în limitele caracteristicilor de tracțiune și de frânare.

Condițiile tehnice și de exploatare pentru inverterul care alimentează motoarele asincrone de tracțiune de curent alternativ cu rotorul în scurtcircuit, se determină din următoarele criterii [50]:

- destinația inverterului în sistemul de comandă al motoarelor de tracțiune asincrone;
- sistemul de formare a amplitudinii tensiunii pe fază pentru alimentarea motoarelor de tracțiune asincrone;
- schema de forță a inverterului;
- algoritmul de comandă a tiristoarelor de forță din inverter;
- schema de alimentare a motoarelor de tracțiune asincrone;
- parametrii tiristoarelor principale;
- dimensiunile de gabarit și masa inverterului.

Tensiunea de intrare trebuie să corespundă tensiunii la linia de contact.

Reglarea tensiunii de ieșire să se facă fără să apară pulsații ale forțelor de tracțiune.

Curentul maxim de ieșire din inverter să permită o valoare mai mare decât curentul nominal al motoarelor de tracțiune.

Randamentul în regim nominal nu trebuie să fie mai mic decât 0,95.

Calitatea curentului și tensiunii de ieșire din inverter în regim de putere nominală nu trebuie să micșoreze randamentul motorului asincron cu mai mult de 1% (comparativ cu alimentarea sinusoidală a tensiunii și curentului).

În domeniul frecvențelor scăzute, nu trebuie să apară pulsații ale cuplului mai mari de 10% față de valoarea medie a acestuia.

Schema de forță și comandă a vehiculului trebuie astfel proiectată, încât să permită funcționarea inverterului și atunci când au fost scoase din funcție o parte din invertoarele conectate în paralel.

Instalația de protecție împotriva perturbațiilor exterioare nu trebuie să genereze anomalii în regimurile de funcționare ale inverterului (comenzi false ale tiristoarelor).

Semiconductoarele să fie protejate împotriva scurtcircuitelor sau suprasarcinilor.

Timul de deconectare al întrerupătorului automat să fie foarte mic pentru a proteja inverterul la curenți de scurtcircuit.

Inverterul să fie construit cu instalație de semnalizare a defectelor.

Vehiculul înzestrat cu invertoare nu trebuie să depășească nivelul de perturbație permis de normele în vigoare.

Invertorul trebuie prevăzut cu instalație automată de descărcare a condensatoarelor, care să activeze imediat după deconectarea tensiunii, iar răcirea invertorului să fie forțată.

7.5. Reglarea vitezei motoarelor electrice de tracțiune asincrone alimentate prin convertoare de frecvență pe baza principiului orientării după câmp

Introducerea sistemului de acționare cu mașina asincronă alimentată prin inverter de frecvență, se poate face numai dacă se ține seama de particularitățile diferite pe care acest sistem îl are la metrou, referitoare la: tensiunea liniei de alimentare, pornirea mașinii electrice care se face direct în sarcină, opririle și pornirile foarte dese, sarcinile variabile în timp, accelerațiile și decelerațiile mari și timp de exploatare aproape continuu. Reglarea vitezei mașinii electrice asincrone se poate face economic și relativ simplu numai prin aplicarea principiului orientării după câmp.

Acest mod de reglare are la bază analogia dintre o mașină de curent continuu cu excitație separată și o mașină de curent alternativ asincronă. Analogia devine evidentă atunci când curenții și tensiunile din statorul mașinii asincrone sunt exprimate cu ajutorul vectorilor spațiali și raportați la un sistem de axe rotitoare cu viteza sincronă [40], [41], [71].

Curentul statoric se va descompune în două componente, una orientată după direcția fluxului învârtitor (corespunzătoare curentului de excitație la mașina de curent continuu), iar cealaltă perpendiculară pe această direcție (corespunzătoare curentului prin indus).

Aplicarea principiului orientării după câmp la mașinile trifazate se justifică și prin faptul că, în mașina electrică alimentată cu un sistem trifazat simetric de tensiuni, se rotește cu viteza sincronă atât fazorul spațial al câmpului învârtitor, cât și fazorii spațiali ai curenților ce apar în înfășurările statorice, respectiv ai tensiunilor aplicate la bornele motorului.

Acești fazori spațiali, având aceeași viteză unghiulară față de un sistem de coordonate, vor avea o poziție relativă staționară, adică pot fi considerați mărimi de curent continuu.

În acest fel, este posibilă realizarea reglajului cu ajutorul mărimilor de curent continuu, obținute prin raportarea la un sistem de axe rotitoare, a cărei axă reală este orientată după direcția fazorului spațial al fluxului învârtitor din întrefier.

Teoria fazorilor spațiali oferă un model matematic ce reflectă comportarea dinamică reală a sistemului inverter – motor [40], lucru ce nu a fost posibil cu metodele clasice cunoscute datorită numărului mare de mărimi de funcționare și a parametrilor care intervin, cu caracterul lor neliniar și disimetria caracteristică sistemelor trifazate sau datorită fenomenelor tranzitorii care apar.

Modelul matematic bazat pe teoria fazorilor spațiali reflectă cu fidelitate regimul dinamic al sistemelor. Ecuațiile mașinii asincrone deduse pe baza teoriei fazorilor spațiali, sunt exprimate matricial cu ajutorul componentelor fazorilor spațiali ai mărimilor într-un plan complex oarecare. Direcția fluxului determină cele două componente ale curentului activă și reactivă, care separă fenomenele mecanice de cele magnetice ale mașinii.

Schema bloc principală a unui sistem de reglare cu orientare după câmp al mașinii asincrone, alimentat de la un inverter static de frecvență, arată ca în figura 7.15 [40], unde s-au făcut notațiile:

Ω_r' și Ψ_m' – mărimi impuse ale vitezei unghiulare și fluxului;

RV – regulator de viteză;

R Ψ – regulator de flux;

ROC – reglare orientată după câmp;

ISF – inverter static de frecvență;

MA – mașină asincronă;

TG – tahogenerator (sau traductor de viteză);

Ω_r , Ψ_m și i_s – valorile reale ale vitezei unghiulare, fluxului și curentului.

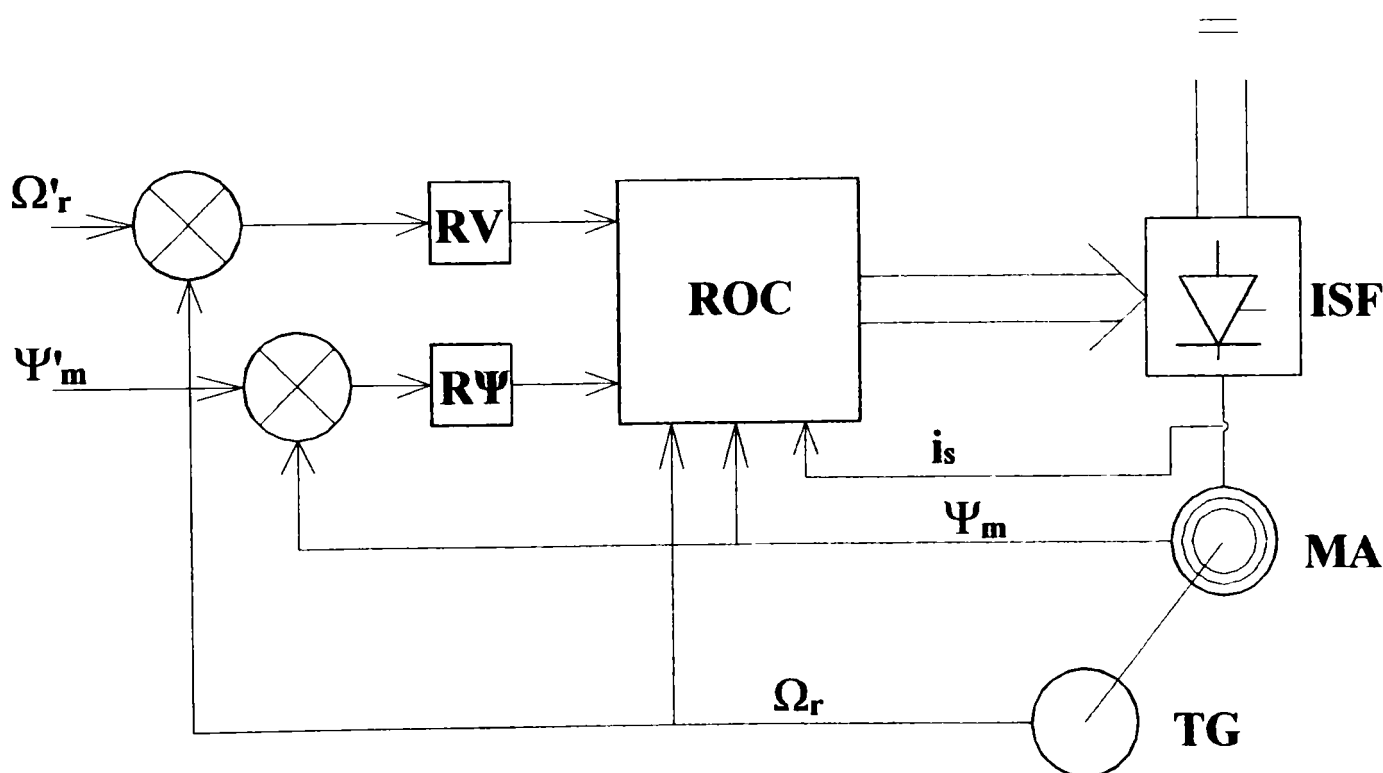


Figura 7.15. Schema bloc a unui sistem de reglare cu orientare după câmp

Regulatorul de viteză și de flux preia diferența dintre mărimile impuse (de exemplu ale vitezei unghiulare Ω_r și fluxului Ψ'_m) și mărimile măsurate (Ω_r și Ψ_r), și le transmite sistemului de reglare orientat după câmp care comandă invertorul static de frecvență.

Schema conține o serie de componente care furnizează diferite informații. Traductorul de viteză TG folosit poate fi în sistem optocuplor sau inductiv.

Există mai multe tipuri de scheme de principiu pe baza metodei orientării după câmp dintre care se vor aminti:

- comanda în curent a mașinii asincrone cu măsurarea directă a fluxului (alimentată de la un ISF cu un caracter sursă de curent);
- comanda în tensiune a mașinii asincrone cu măsurarea directă a fluxului (alimentată de la un ISF cu un caracter de sursă de tensiune);
- comanda în curent a mașinii asincrone cu măsurarea indirectă a fluxului.

Structura unui sistem de reglare, conceput pe baza principiului orientării după câmp, este determinată de mai mulți factori:

- traductoarele adică mărimile de reacție ale buclei de reglare;
- invertorul static de frecvență;
- fluxul (statoric, rotoric sau învârtitor);

După mărimile măsurate, există două variante:

- măsurarea directă a câmpului;
- măsurarea indirectă a câmpului.

La prima variantă, mărimea măsurată este chiar mărimea de reglare, motiv pentru care schemele sunt mai puțin sensibile din punct de vedere al erorilor.

La a doua variantă, schemele sunt influențate de variația rezistenței rotorice și a saturației fierului, dar elimină problemele legate de măsurarea directă a fluxului.

Reglarea bazată pe principiul orientării după câmp se poate aplica fără nici o restricție dată de invertorul static de frecvență [40].

În principiu, curentul statoric al mașinii de curent alternativ poate fi descompus în componenta de producere a fluxului și componenta de producere a cuplului, care apoi sunt decuplate și controlate separat.

La puteri mari, controlul vectorial în curent cu invertoarele de tensiune nu mai pot fi folosite deoarece trebuie redusă frecvența de comutație pentru micșorarea pierderilor [41]. În acest caz, invertorul trebuie comandat în tensiune.

Deoarece există trei fazori spațiali ai fluxurilor în mașina asincronă, reglarea vectorială se poate face cu:

- orientarea după fluxul din stator;

- orientarea după fluxul din rotor;
- orientarea după fluxul din întrefier.

Sistemul de control pentru reglarea vectorială după fluxul din rotor este cel mai simplu [41], dacă sistemul controlează curentul. Atunci când se realizează controlul în tensiune după fluxul din stator, nu sunt necesare decuplări pe bucla de reacție, rezultând în același timp un răspuns rapid în flux. În zona de slăbire de câmp, orientarea după fluxul din stator este mai bună decât celelalte două tipuri, deoarece circuitul statoric apare pur rezistiv.

Prin alegerea convenabilă a sistemului de referință față de care se observă fenomenele, se poate obține un model al mașinii asincrone, unde un curent reglează fluxul din mașină și celălalt curent (perpendicular) definește cuplul electromagnetic (similar cu mașina cu excitație separată).

Cu ajutorul sistemului de control vectorial al mașini asincrone, se comandă convertorul static de frecvență, se reglează în permanență curentul care produce fluxul după care s-a realizat orientare și curentul care produce cuplul electromagnetic. Acești curenți nu pot fi măsurați direct, ci se calculează plecând de la curenții de linie de alimentare.

În general controlul vectorial al mașinilor de curent alternativ oferă o precizie ridicată în reglarea vitezei și un cuplu tranzitoriu superior [41].

Din punct de vedere al realizărilor practice, sistemele de control vectoriale se clasifică în:

- analogice – realizate cu circuite integrate și tranzistoare;
- digitale – realizate cu procesoare de semnal;
- hibride – realizate cu circuite de comandă analogice și digitale.

Aplicarea principiului orientării după câmp presupune cunoașterea poziției fluxului de magnetizare.

Diagrama fazorială arată ca în figura 7.16, unde s-au făcut notațiile:

- d - q – sistemul de axe fix statoric;
- $d\lambda$ - $q\lambda$ – sistemul de axe orientat;
- λ – unghiul dintre cele două axe;
- a_s, b_s, c_s – înfășurările statorului;
- i_r – curentul relativ prin rotor;
- i_s – curentul relativ prin stator;
- $i_{sq\lambda}$ – curentul statoric descompus după direcția $q\lambda$;
- $i_{sd\lambda}$ – curentul statoric descompus după direcția $d\lambda$;
- ω_r – viteza unghiulară a rotorului;
- Ψ_m – fluxul de magnetizare (egal cu cel rotoric).

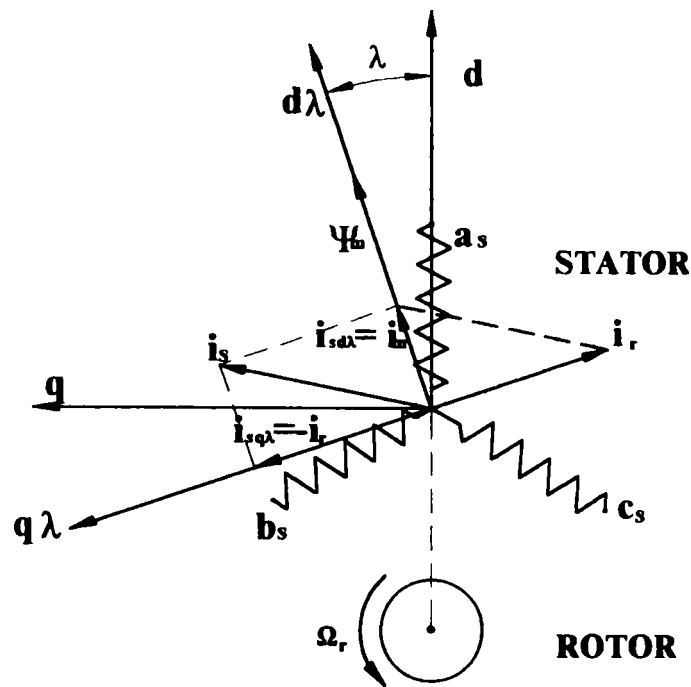


Figura 7.16. Diagrama fazorială

Componentele fluxului ψ (ψ_d și ψ_q) raportate la un sistem de axe statoric d - q arată ca în figura 7.17 și se poate obține prin măsurare sau prin calcul plecând de la relația cuplului în valori relative:

$$m_e = k_m \cdot \psi_r \cdot i_r. \quad (7.54)$$

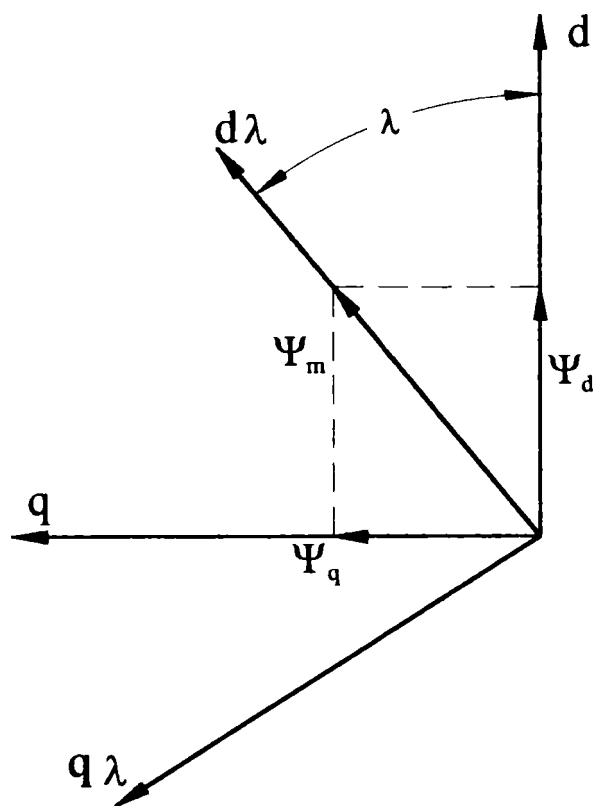


Figura 7.17. Diagrama fazorială a fluxului

Furnizarea informațiilor referitoare la câmp se face cu un analizor de fazor AF, care identifică poziția și modul de flux. Blocul analizor arată ca în figura 7.18.

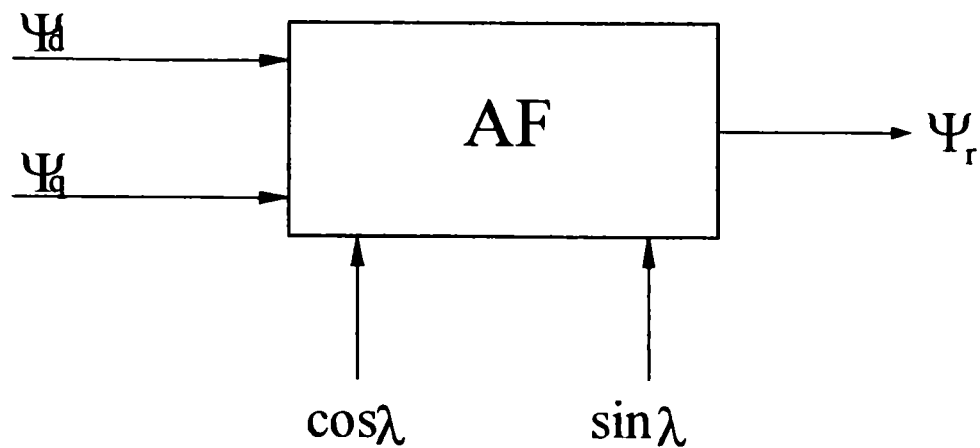


Figura 7.18. Blocul analizor de fazor

Modulul fazorului de flux are expresia:

$$\Psi_r = \sqrt{\Psi_d^2 + \Psi_q^2}, \quad (7.55)$$

iar funcțiile trigonometrice sunt:

$$\sin \lambda = \frac{\Psi_q}{\Psi_r}, \quad (7.56)$$

$$\cos \lambda = \frac{\Psi_d}{\Psi_r}. \quad (7.57)$$

Dacă se cunoaște poziția unghiulară a fluxului, funcțiile trigonometrice se pot obține cu un bloc oscilator.

Diagrama fazorială a curentului statoric și blocul transformărilor de axe TA, sunt prezentate în figura 7.19.

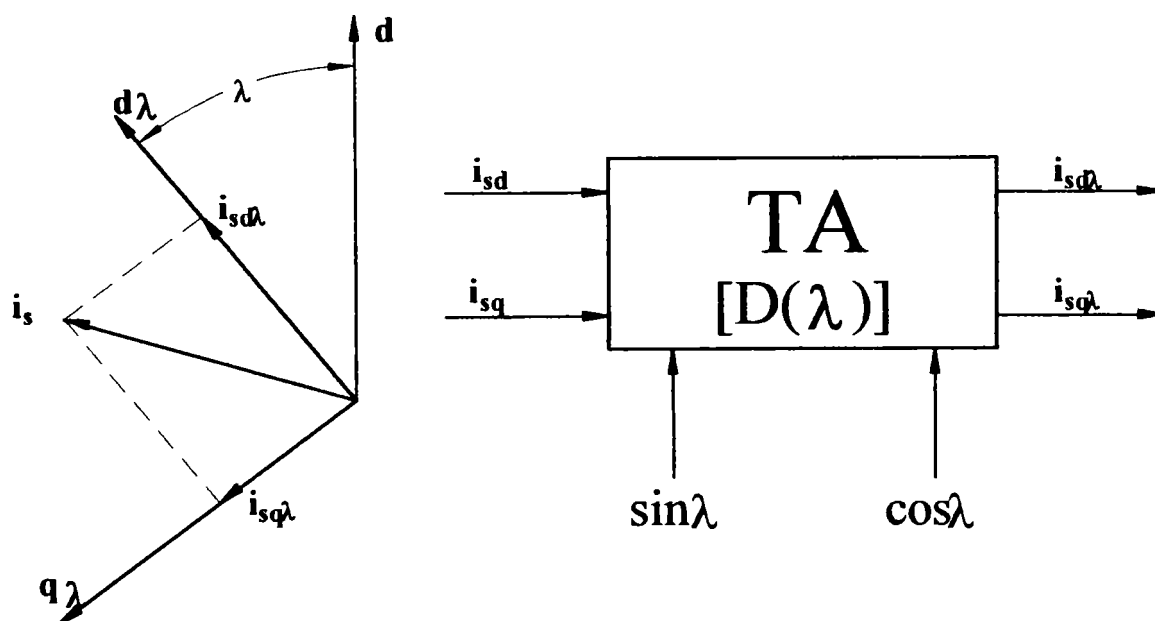


Figura 7.19. Diagrama fazorială a curentului statoric și blocul transformărilor de axe TA

Cunoscând poziția λ a fazorului de flux se poate efectua transformarea de axe în urma căreia se obțin mărimi orientate după câmp.

Din punct de vedere matematic, are loc rotirea sistemului de axe cu unghiul λ , cu ajutorul operatorului de rotire, matricea $[D]$:

$$[i_s] = \begin{bmatrix} i_{sd\lambda} \\ i_{sq\lambda} \end{bmatrix} = [D(\lambda)] \cdot [i_s]_{\perp} = \begin{bmatrix} \cos \lambda & \sin \lambda \\ -\sin \lambda & \cos \lambda \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix}. \quad (7.58)$$

Traductoarele de curenți tensiuni și flux ale mașinilor trifazate furnizează informații despre mărimile trifazate, motiv pentru care în buclele de reacție ale schemelor de reglare cu orientare după câmp, mai apar și blocuri TS care realizează transformarea mărimilor din sistemul trifazat în sistemul bifazat cu ajutorul matricei A . Pentru o mărime oarecare (tensiunea de exemplu), aceasta arată ca în figura 7.20.

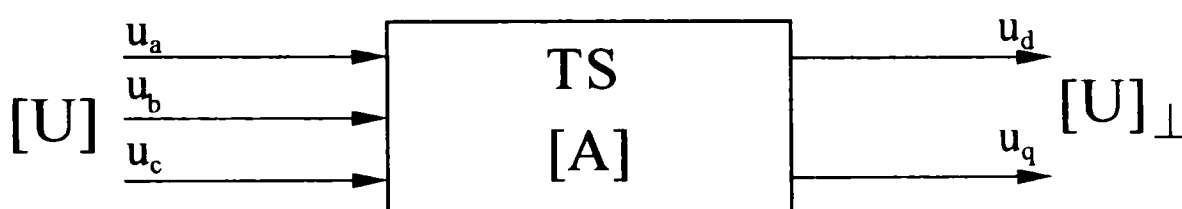


Figura 7.20. Blocul TS de transformare a mărimilor trifazate în mărimi bifazate

Matricea acestui bloc realizează operația matematică:

$$[u]_{\perp} = [A] \cdot [u]. \quad (7.59)$$

Transformarea mărimilor de reglare din sistemul bifazat într-un sistem trifazat, necesar comenzii inverterului static de frecvență, se realizează cu același bloc TS, la care se pune în evidență matricea $[A]^{-1}$ a transformării inverse.

Pentru o mărime oarecare (tensiunea de exemplu), aceasta arată ca în figura 7.21.

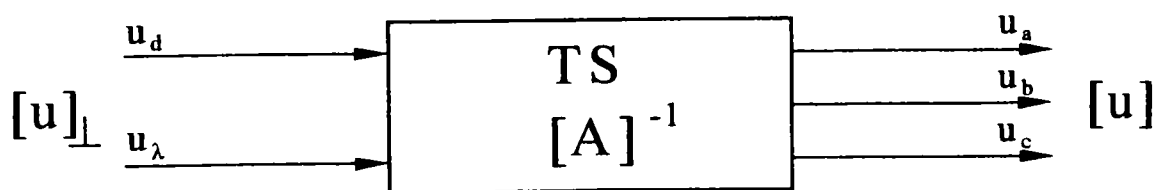


Figura 7.21. Blocul TS de transformare a mărimilor bifazate în mărimi trifazate

Din punct de vedere matematic, acest bloc realizează operația:

$$[u] = [A]^{-1} \cdot [u]_{\perp}. \quad (7.60)$$

Orientarea după câmp a mărimilor de reacție și calculul mărimilor de reglare se realizează în sistem bifazat. Mărimile de reglare sunt componentele active și reactive a curentului.

Metoda cea mai des tratată în literatura de specialitate [40], [72] este orientarea după fluxul rotoric, datorită simplității buclei de reglare și simplității mărimilor de comandă.

Dacă se neglijează inductivitatea de scăpări a rotorului, atunci fluxul din întrefier este identic cu fluxul rotoric după care trebuie realizată orientarea.

Dacă nu se neglijează inductivitatea de scăpări a rotorului, atunci din fluxul întrefierului măsurat direct sau indirect trebuie calculat fluxul rotoric fără să existe acces la curenții rotorici.

În cazul mașinii asincrone comandate în curent, cuplul urmărește rapid variația componentei active dacă fluxul rotoric este constant.

Fluxul rotoric însă fiind legat de componenta reactivă, va urmări variația componentei reactive, cu o întârziere determinată de o constantă de timp a motorului, deci mărimea fluxului nu poate fi schimbată brusc.

Evoluția rapidă a microelectronicii și apariția microprocesoarelor a oferit metode de reglare în condiții eficiente, cu o siguranță în funcționare și precizie mărită. În aceste condiții, pot fi atinse performanțe dinamice ridicate.

Un sistemul vectorial cu măsurare directă a câmpului, al motorului asincron orientat după fluxul rotoric cu inverter de tensiune arată ca în figura 7.22 [41], unde s-au făcut notațiile:

ISF – inverter static de frecvență;

MA – mașina asincronă;

T_v – traductor de viteză;

RV – regulator de frecvență;

GΨ_r – generator de flux;

R_{me} – regulator de cuplu;

Rψ_r – regulator de flux;

R_i – regulator de curent;

TA – blocul transformărilor de axe;

TS – blocul transformărilor bifazate în trifazate și invers;

DC – dispozitiv de comandă;

TI – traductor de curent;

TU – traductor de tensiune;

GTr – generator triunghiular;

U₁ – tensiunea la linia de contact;

v* – mărimea impusă a vitezei.

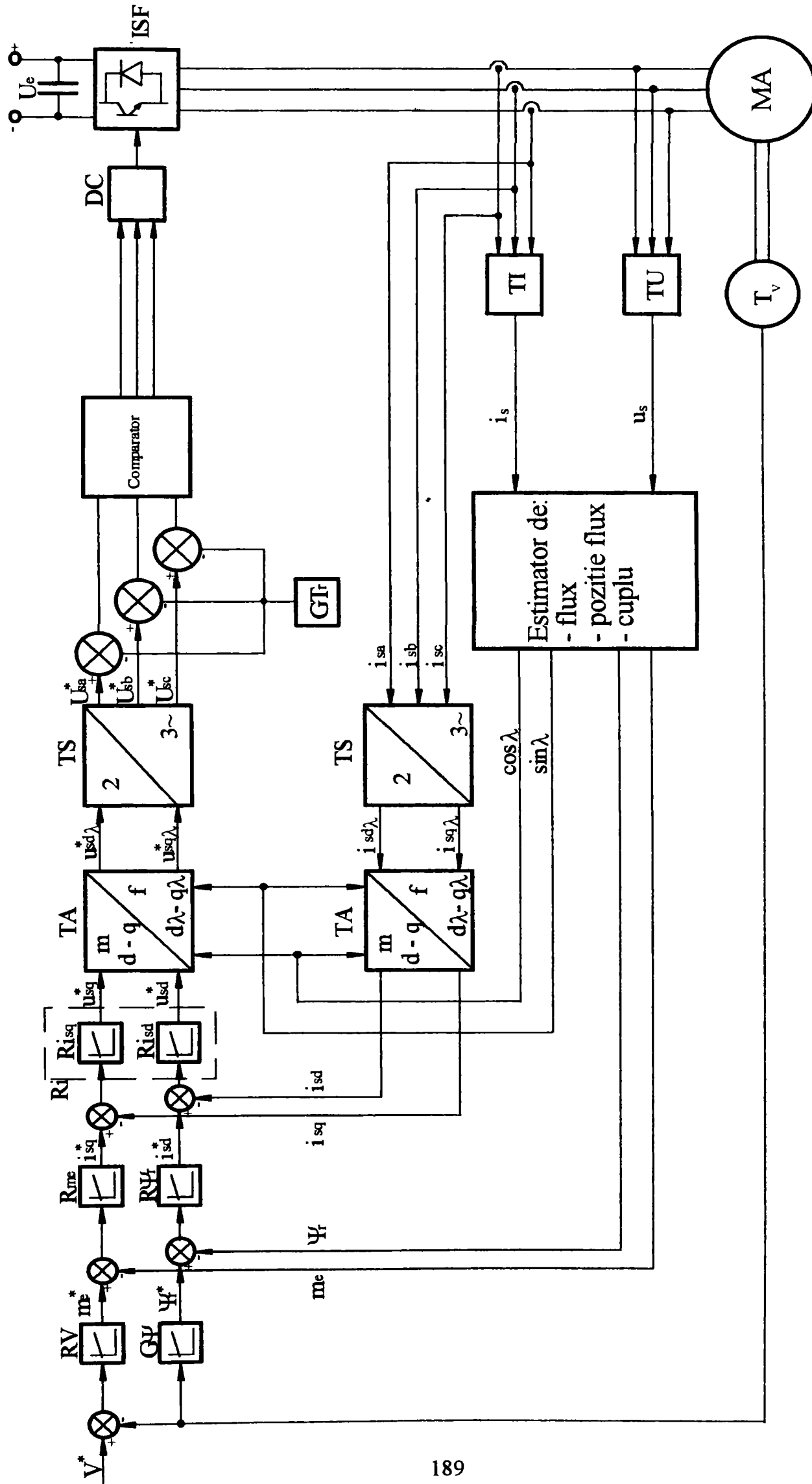


Figura 7.22. Sistem vectorial direct orientat după fluxul rotoric cu inverter de tensiune

Viteza măsurată de traductorul de viteză inductiv este folosită ca reacție inversă pentru intrarea în generatorul de flux $G\Psi$ și în același timp este comparată cu viteza impusă după care ajunge în regulatorul de viteză RV . Traductorul de tensiune TU măsoară continuu tensiunea la bornele motorului de tracțiune asincron și o transmite pentru prelucrare estimatorului de flux. În același mod, este măsurat și prelucrat curentul de către traductorul TI , însă acesta mai intră și în blocul TS de transformare a mărimilor trifazate în mărimi bifazate.

Estimatorul de flux, poziție flux și cuplu, după analiza și calculul acestor parametrii transmite informațiile spre comparatoarele curenților descompuși ai cuplului și fluxului. Aceleași informații sunt transmise și blocurilor transformatoare de axe TA .

Odată transformate, analizate, calculate și comparate, mărimile parametrice ajung la dispozitivul de comandă DC , iar apoi la invertorul stativ ISF pentru comanda reglării frecvenței și tensiunii motorului de tracțiune asincron, în vederea reglării vitezei acestuia.

7.6. Condiții privind înlăturarea influenței perturbatoare produsă de vehiculele de tracțiune, asupra instalațiilor din cale și din vecinătatea căii

Invertoarele sunt o permanentă sursă de influență perturbatoare cu un spectru larg de frecvență, curentul de tracțiune și cel de recuperare conținând frecvențe cuprinse în domeniul de la Hz până la MHz, iar amplitudinea frecvențelor este permanent variabilă în timp [50].

Nivelul perturbațiilor depinde de puterea sursei de perturbații, de parametrii electrici ai circuitelor de cale și din vecinătatea căii și de parametrii electrici ai sistemului de alimentare cu energie electrică a liniei de contact.

Influențele perturbatoare acționează asupra:

- circuitelor SCB și de automatizări feroviare;
- circuitelor de comunicații radio și televiziune;
- circuitelor de telecomandă;
- liniilor aeriene și liniilor în cablu.

La elaborarea schemelor invertoarelor și a schemelor de comandă, trebuie să se aibă în vedere că în exploatarea metrourilor trebuie să existe un curent de tracțiune sau de recuperare cu cea mai mică componentă de armonici.

Perturbațiile nu trebuie să depășească valorile limită admise, stabilite de administrația de cale ferată.

Măsurile pentru micșorarea influențelor perturbatoare produse de vehicul trebuie să aibă la bază o fundamentare tehnico – economică.

Pentru micșorarea influențelor perturbatoare se recomandă folosirea de filtre în circuitele din cale și din vecinătatea căii, sau în alte instalații. Dacă nu se obțin valori micșorate ale influențelor perturbatoare, se recomandă montarea în substații și în lungul liniei de contact a unor filtre speciale de compensare.

7.7. Concluzii

Sistemul de acționare cu mașina de curent alternativ asincron trifazat alimentată prin invertor de frecvență s-a dezvoltat atât din punct de vedere tehnic, cât și economic. Introducerea lui și în tracțiunea electrică, nu poate constitui o simplă aplicație de acționare electrică datorită particularităților diferite pe care acest sistem îl are la metrou și anume:

- linia de contact este alimentată la 750 Vcc;
- pornirea mașinii electrice este direct în sarcină;
- sarcinile variază în timp;
- opririle și pornirile sunt foarte dese (la aproximativ două minute);
- accelerațiile și decelerațiile sunt relativ mari;
- timp de exploatare continuu fără pauze;
- la fiecare pornire, există riscul apariției fenomenului de patinare, iar la fiecare oprire riscul apariției blocării, motiv pentru care sistemul trebuie să fie dotat cu instalații pentru prevenirea acestora;
- funcționarea tuturor agregatelor are loc în mediu cu praf și pulbere metalică iar umiditatea relativă din tunel este de 90% la 25°C;
- intervalul temperaturii mediului de funcționare este de la -25°C (iarna la suprafață), până la +20°C (iarna sau vara în tunel), într-o perioadă scurtă de timp (de două minute);
- agregatele instalației electrice și pneumatice sunt amplasate pe ambele vagoane ale ramei de metrou, atât datorită unor funcții comune, cât și datorită necesității distribuirii echilibrate a greutateților și volumelor acestora;

La noi în țară, s-a încercat introducerea acestui sistem încă din 1986 pe un model experimental.

Activitatea de studiu și de cercetare s-a continuat până în 1993, când s-a materializat prin realizarea unui prototip de metrou construit pe scheletul unei rame clasice. După primele probe realizate în București, această acțiune a fost întreruptă.

Motorul de tracțiune asincron cu rotorul în scurtcircuit se bucură de parametri tehnico-economici superiori, fapt care a determinat introducerea lui și în tracțiunea electrică. Dimensiunea redusă, gabaritul redus, fiabilitatea crescută în exploatare și nu în ultimul rând prețul de cost relativ mai scăzut, au fost premisele care au stat la baza

folosirii acestui tip de motor de către foarte multe companii străine care fabrică și metroui.

Numeroasele avantaje obținute la acționările cu motorul de tracțiune asincron cu rotorul în colivie ridică problema introducerii lui și la metroul din România prin studii, examinări și cercetări, astfel încât această soluție să poată trece de stadiul de prototip.

În tracțiunea electrică, motorul asincron poate funcționa numai alimentat de la un invertor de frecvență.

Pentru obținerea unor accelerații relativ mari până la limita aderenței, este necesară alimentarea individuală a fiecărui motor de la un invertor.

Schema electrică de forță este relativ simplă (prin lipsa contactoarelor de schemă), dar invertorul este destul de complicat, datorită numeroaselor componente semiconductoare (componente care totuși s-au redus prin folosirea tiristoarelor GTO sau a tranzistoarelor IGBT).

Electronica de comandă este foarte complicată și sofisticată datorită comenzilor individuale pentru fiecare invertor. Și prețul de cost al acesteia este foarte mare datorită tehnologiei de fabricație existente la ora actuală de tip american (singurul de fapt prezent și în Europa).

Relațiile de calcul sunt aceleași ca și în cazul tuturor acționărilor cu mașina asincronă, însă reglarea turației motorului de tracțiune asincron (sau a vitezei vehiculului) se poate face numai prin modificarea atât a frecvenței, cât și a tensiunii de alimentare.

Modificarea frecvenței se poate face într-un domeniu destul de mare (de la 0,1 Hz până la 125 Hz), iar modificarea tensiunii de asemenea (de la valoarea minimă necesară obținerii cuplului maxim de pornire, până la valoarea maximă a tensiunii liniei de contact, adică 750 Vcc).

Determinarea caracteristicii de tracțiune $F_0(v)$, a cuplului $M_e(v)$ precum și interdependența dintre tensiune, frecvență, turație și viteză s-a făcut pentru un caz concret, atât al unui vehicul, cât și al unui motor de tracțiune asincron. Cu acest prilej, s-a determinat viteza până la care cuplul (adică forța de tracțiune) rămâne constant, situație în care este necesară modificarea atât a frecvenței, cât și a tensiunii (caz în care s-a determinat și trasat $U(f)$). Peste această viteză, tensiunea rămâne constantă și egală cu cea a liniei de contact, iar frecvența continuă să crească, astfel încât are loc micșorarea forței de tracțiune odată cu creșterea vitezei (dar cu păstrarea constantă a puterii).

Pornind de la o schemă electrică principială a unui invertor folosită și de alți constructori din lume, autorul propune o schemă electrică de forță specifică metroului din țara noastră (vezi figura 5.14).

În varianta folosirii în fabricarea invertoarelor a tiristoarelor GTO, este prezentată funcționarea schemei electrice în toate regimurile specifice metroului, adică tracțiunea în ambele sensuri, precum și frânarea recuperativă și reostatică (toate regimurile realizându-se atât la alimentarea metroului prin captatoare cât și prin pantograf).

Autonomia funcționării unui singur vagon din tren, sau în cadrul unui vagon a unui singur inverter, este asigurată de către schema propusă de autor, ducând astfel la posibilitatea retragerii ramei din tunel la apariția unui defect și implicit la creșterea fiabilității.

Reglarea vitezei motoarelor electrice de tracțiune asincrone alimentate prin invertoare de frecvență se face pe baza principiului orientării după câmp. Aplicarea acestui principiu este absolut necesar avându-se în vedere particularitățile diferite pe care îl are sistemul de acționare de la metrou și care au fost enunțate la începutul acestui subcapitol.

Teoria fazorilor spațiali oferă un model matematic ce reprezintă comportarea dinamică reală a sistemului convertor – motor. Modelul matematic bazat pe teoria fazorilor spațiali reflectă cu fidelitate regimul dinamic al sistemelor.

În buclele de reacție ale schemelor de reglare, apar blocuri care realizează transformarea mărimilor din sistemul trifazat într-un sistem bifazat și invers.

Deoarece invertoarele sunt o permanentă sursă de influență perturbatoare având un spectru larg de frecvență, acestea influențează circuitele SCB și de automatizări, circuitele de comunicații radio și televiziune, circuitele de telecomandă, și circuitele liniilor aeriene sau prin cablu vecin cu linia de metrou. Este necesar astfel, ca la elaborarea schemelor invertoarelor și a schemelor de comandă să se aibă în vedere ca în exploatare curentul de tracțiune sau frânare să fie cu componente de armonici cât mai mici. Măsurile pentru micșorarea influențelor perturbatorii trebuie să aibă o fundamentare tehnico – economică.

În urma studiilor făcute de către autor, se poate trage concluzia că sistemul de acționare cu mașina de curent alternativ trifazat asincronă trebuie să fie introdus și la metroul din România. Sistemul de comandă trebuie să asigure reglarea automată a vitezei vehiculului în regim de tracțiune și frânare, menținerea forței de tracțiune și frânare impuse până la viteza stabilizată, trecerea automată din regimul tracțiune la cel de frânare și trecerea automată de la regimul frânării recuperative la cel reostatic.

Capitolul 8

Concluzii și contribuții

8.1. Concluzii comparative între cele două sisteme moderne de acționare electrică la metrou

Liniile electrice de alimentare în prezent la metroul din București sunt la 750 Vcc. Orice extindere în continuare se poate face numai prin alimentarea lor la aceeași tensiune, astfel că în viitorul apropiat nu există posibilitatea înlocuirii sistemului de alimentare, deci nici introducerea altor sisteme de acționare (diferite de cele trei prezentate în lucrare de autor).

Datorită marilor neajunsuri din sistemul actual de acționare (reglarea reostatică cu consum mare de energie electrică, frânarea reostatică, nerecuperativă, șocuri electrice, termice și mecanice datorate reglării în trepte, performanțelor scăzute ale actualei mașini electrice de acționare în curent continuu), nu se mai pune problema fabricării de vehicule noi cu acest sistem de acționare.

Cele două sisteme moderne: “acționarea cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei cu VTC”, precum și “acționarea cu mașina de curent alternativ trifazat asincronă și reglarea vitezei cu invertor static de frecvență”, au atât avantaje, cât și dezavantaje raportate mai ales la situația actuală (economică) a României.

8.1.1. Acționarea cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei cu VTC

Reglarea vitezei vehiculului realizându-se prin modificarea continuă a tensiunii de la zero la valoarea maximă de către VTC, odată cu dezvoltarea electronicii de putere, acestea au luat un deosebit avânt care le-a conferit anumite *avantaje* prezentate în continuare.

- Folosindu-se mai nou tiristoare GTO, construcția VTC - ului este simplă, rezumându-se doar la tiristorul principal GTO și la unul obișnuit pentru frânare (vezi subcapitolul 5.5).

- Potrivit celor enunțate mai sus, volumul și greutatea VTC-ului sunt foarte reduse.

- Randamentul acționării este relativ mare, iar economia de energie poate să ajungă până la 30% [74].

- Criteriul de comandă al vehiculului este menținerea în permanență $I^2 = \text{constant}$, adică unghiul manetei de accelerație respectiv decelerație, este direct proporțional cu I^2 . În acest fel, se evită șocurile electrice și termice la MT, și se poate obține atât o

pornire, cât și o oprire lină a vehiculului. Alegerea menținerii constante a lui I^2 permite reducerea erorilor și o urmărire mai precisă de către automatul programabil în exploatare (Dacă s-ar alege menținerea lui I constant, prin ridicarea la putere ar mări foarte mult abaterea respectivă, mai ales pe intervale de timp mici).

- Funcționarea în timpul demarajului (frânării), pe o perioadă cât mai mare de timp cu accelerație (decelerație) constantă, duce implicit la $\frac{da}{dt} = \text{constant}$, adică la o funcționare fără șocuri [72] (vezi subcapitolul 4.2.4).

- Echipamentul de comandă al VTC - ului este foarte simplu.

- Întreaga instalație de supraveghere și reglare a vehiculului se pretează la utilizarea în comandă a automatului programabil cu microprocesor. Comanda aprinderii și stingerii tiristorului GTO se poate realiza prin fibră optică, eliminând astfel toate distorsiunile și paraziții care ar putea să apară în timpul funcționării. Pentru VTC, automatul programabil se poate realiza în tehnologie convențională cu software cunoscute în Europa (adică la prețuri relativ mici). Automatul programabil prelucrează semnalele în sistemul Master-Slave, ducând astfel la blocarea lui în cazul existenței unei defecțiuni interne.

- Automatul programabil este mult mai simplu decât la reglarea cu invertor.

- Afișarea codului de erori pe un display cu 2 sau 3 digiți, permite stabilirea și determinarea unor defecte chiar în timpul funcționării, simplificând în acest fel procedura de diagnosticare realizată de personalul de exploatare și întreținere (vezi subcapitolul 5.6.2.4).

- Deoarece atât închiderea, cât și deschiderea circuitului electric de tracțiune este realizat de către tiristorul principal, se evită formarea arcului electric între contactele contactoarelor de linie, ducând astfel la creșterea fiabilității acestora.

- Trecerea din regimul de tracțiune la cel de frânare se face cu timpi mici de răspuns.

- Prezența condensatorului filtru rețea atenuază vârfurile de tensiune, măbind astfel atât durata de viață a echipamentelor, cât și a motorului de tracțiune.

- Permite utilizarea mai rațională a substațiilor de tracțiune (prin evitarea șocurilor de curent în timpul exploatării).

- Împreună cu automatul programabil ridică confortul călătorilor ($a = \text{constant}$ pe o perioadă cât mai mare de timp) și dă posibilitatea automatizării cu oprire la punct fix.

- Diminuează posibilitățile de apariție a patinării și respectiv a blocării la frânare (prin menținerea curentului sub limita valorii care duce la pierderea aderenței).

- Permite comanda ușoară în trenuri formate din 2 sau 3 rame.
- Acționarea cu VTC se pretează mai bine decât cea cu inverter, la materialul rulant cu roți independente, datorită simplității VTC-ului și implicit a prețului mai mic de cost.
- Schema electrică de forță a vehiculului este simplă și cu consum redus de conductoare.
- Posibilitățile de exploatare sunt simple și ușor de realizat, ducând la o siguranță ridicată în exploatare, folosind pentru diagnoză automatul programabil și un laptop.
- Cheltuielile de întreținere sunt foarte reduse în exploatare și datorită numărului redus de personal necesar.
- Poate fi ușor introdus pe caroseria ramelor clasice cu prilejul reparațiilor capitale, ducând astfel la reducerea prețului de cost.
- Este folosit încă în foarte multe țări și constituie principalul produs de fabricație a unor companii consacrate (Bombardier – Canada) (vezi subcapitolul 3.2.1).

În condițiile actuale din București, unde există variații foarte mari ale tensiunii la linia de contact (1400 V față de valoarea maximă admisă de 900 V), VTC-ul și actualul MT îmbunătățit s-au comportat admirabil (din informațiile pe care le am până în prezent referitor la comportarea acestui sistem aplicat pe troleibuzul 415T din București), rezultând o funcționare ireproșabilă. Pe o perioadă de 2 ani la 100 de vehicule s-au înlocuit doar 2 tiristoare GTO (care se încadrează în procentul de defecte apărute în timpul probelor) și un singur motor de tracțiune TN96A (dar cu probleme mecanice la rulmenți).

În favoarea acționărilor cu motorul de curent continuu, în general pledează factorul economic și echipamentele actuale de comandă relativ mai simple.

8.1.2. Acționarea cu mașina de curent alternativ trifazat asincronă și reglarea vitezei cu inverter de frecvență

La acest tip de acționare, reglarea vitezei se realizează prin modificarea concomitentă a tensiunii și frecvenței până la atingerea tensiunii nominale, după care continuarea modificării vitezei vehiculului se face pe baza modificării frecvenței. Introducerea acestui tip de acționare a fost posibilă datorită avântului luat de electronica de putere prin fabricarea tiristoarelor GTO și a tranzistoarelor IGBT.

Sistemul s-a impus și se impune în continuare datorită numeroaselor *avantaje* prezentate în continuare:

- Folosind motorul de tracțiune de curent alternativ trifazat asincron, construcția acestuia se simplifică, este mai robust, se reduce consumul de cupru, necesită întreținere minimă și are volum respectiv greutate redusă.

- La aceeași greutate și volum, puterea motorului de tracțiune este mai mare.

- Se pretează la folosirea automatului programabil cu microprocesor.

- La construcția inverterului cu 4 cadrane, se elimină o parte din contactoarele de schemă (vezi schema din figura 7.13).

- Caracteristicile mecanice rigide ale MT permit restabilirea foarte ușor a aderenței fără riscul supraturării acestuia, comparativ cu motorul de curent continuu cu reglare vitezei rezistivă.

- Datorită menținerii constante a accelerației și decelerației, demarajul respectiv frânarea sunt line și fără șocuri.

- În condițiile date ale metroului din România, nu am adoptat această soluție, dar ea poate fi introdusă într-un viitor nu prea îndepărtat.

Diferențele acestui sistem față de sistemul de reglare cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei cu VTC sunt prezentate în continuare:

- Echipamentele de comandă ale inverterului sunt mai complicate (vezi subcapitolul 7.2 și 7.4.1).

- Reducerea greutății mașinii electrice se regăsește în greutatea componentelor de acționare (inductivități, inverter, echipamente de răcire și de comandă) (vezi subcapitolul 7.2).

- Automatul programabil cu microprocesor este realizat de către toți constructorii cu software într-o tehnologie americană neintrodusă încă în Europa (adică cu preț de cost ridicat).

- Prețul de cost al inverterului și instalației de comandă este mult mai mare.

- Invertoarele sunt o permanentă sursă de influență perturbatoare, cu un spectru larg de frecvențe de la câțiva Hz până la MHz, având și o amplitudine variabilă în timp (vezi subcapitolul 7.7).

- Un inverter alimentează toate motoarele aceluiași vagon, motiv pentru care la pierderea aderenței unei osii (situație foarte des întâlnită la metrou, unde demarajele se fac la limita aderenței), se reduce cuplul la toate osiile, ducând astfel la nefolosirea integrală a posibilităților de aderență la întreaga capacitate la un moment dat. Pentru eliminarea acestui neajuns, ar fi necesar realizarea unui inverter la fiecare motor de tracțiune, situație în care prețul ar fi dublu (vezi subcapitolul 7.2).

- Instalația de comandă a tiristoarelor (sau tranzistoarelor) este foarte sofisticată. De exemplu, firma Elin comandă tranzistoarele din instalația de acționare pentru un vagon (cu două motoare), cu 15 fibre optice. Dacă se montează un inverter pentru fiecare boghiu sau mai mult pentru fiecare osie, atunci numărul fibrelor optice ar fi: $4 \times 15 = 60$ (vezi subcapitolul 3.3.4).

- Posibilitățile de exploatare sunt mai complicate, cu personal necesar mai numeros și evident cu preț de cost mai ridicat.

- Pentru introducerea invertoarelor de frecvență și a motoarelor de curent alternativ asincrone în acționarea de la metrou, ar fi necesar fabricarea a 2 prototipuri cu care să se facă încercări de durabilitate în București, după care să se poată trage concluzii în continuare necesare proiectării și execuției de serie (vezi subcapitolul 7.2).

8.1.3. Alte modificări

Gravele probleme cu care s-a confruntat exploatarea metroului până în prezent nu au fost legate numai de mașina de curent continuu cu colector sau de reglarea vitezei reostatic. Numeroasele neajunsuri s-au datorat și apariției unor defecte de masă cauzate de fiabilitatea redusă a componentelor schemei de acționare și de comandă.

Aceste defecte au apărut și ca urmare a unor complicații în concepție și fabricare, datorate obligativității folosirii componentelor doar din fabricația indigenă existentă la acea dată în România (izolată de Europa de Vest).

Situația economică a României nu va permite cel puțin deocamdată achiziționarea unor rame de metrou noi, executate de firme de prestigiu cu bogată experiență în domeniu. Prețul unei rame noi gata echipată din import depășește la ora actuală 5.000.000 \$, astfel că la cursul de schimb al dolarului și pentru 100 de rame, valoarea totală se ridică la 500 milioane \$, adică 6000 miliarde de lei.

Indiferent de cele două soluții care se aplică, varianta optimă ar fi implementarea noului sistem pe o ramă clasică în cadrul unei reparații capitale, dar cu execuție în România pentru reducerea prețului de cost.

Pentru perfecționare sistemului și pentru creșterea fiabilității mai sunt necesare și alte modificări cum sunt (vezi subcapitolul 4.2):

- simplificarea cablajului de forță concomitent cu reducerea consumului consumul la ora actuală fiind de aproximativ 1000m/REM);

- simplificarea cablajului de comandă și reducerea lui printr-o raționalizare a traseelor și o reamplasare a aparaturii deservite (consum ce se ridică la 25.000 m/REM);

- perfecționarea blocului automat de comandă a reglării vitezei prin înlocuirea lui cu "AUTOMATUL PROGRAMABIL cu microprocesor";

- înlocuirea contactoarelor de forță și de comandă cu altele din import cu fiabilitate ridicată;

- proiectarea schemelor electrice cu fiabilitate ridicată;

- dacă este folosit sistemul de acționare cu mașina de curent continuu, atunci se impune modificarea acestei mașini în vederea creșterii fiabilității, reducerii gabariturii și a greutății;

- proiectarea și realizarea schemelor electrice în varianta execuției tehnologice;
- înlocuirea convertizorului rotativ cu unul static;
- proiectarea amenajărilor să se facă, astfel încât să crească accesibilitatea la toate componentele vehiculului, situație nerealizată în prezent.

8.2. Concluzii finale

În acest subcapitol, se realizează o prezentare sintetică a concluziilor parțiale de la fiecare capitol privind problemele care au constituit obiectul tezei, majoritatea fiind abordate de către autor într-o concepție originală.

Modernizarea mijloacelor de transport în comun pe calea ferată, în general și la metrou, în special, reprezintă principalul obiectiv al unei companii de cale ferată. Dezvoltarea sistemelor de tracțiune și a electronicii de putere au permis realizarea acestui obiectiv de către unele administrații de cale ferată din lume, iar într-un viitor apropiat și la metroul din România.

Un mijloc de transport confortabil, independent și rapid nu se poate realiza decât prin: creșterea vitezelor de circulație, a randamentului, a puterilor instalate pe vehicule, creșterea și menținerea constantă a accelerației și reducerea șocurilor, creșterea automatizărilor și creșterea fiabilității tuturor componentelor de tracțiune și comandă.

Realizarea dezideratelor de mai sus se pot face prin:

- **modernizarea actualei rame de metrou** a cărui sistem de acționare electrică este cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei reostatic;
- **construirea de noi vehicule** cu acționare modernă;
- **construirea de noi linii de alimentare și noi vehicule** cu acționare modernă.

Avându-se în vedere situația economică a României și în viitorul apropiat, în prezent se pune problema doar a modernizării actualei rame electrice de metrou, construirea de rame noi și de linii noi, fiind posibilă doar într-un viitor mai îndepărtat.

Aplicarea altor soluții de acționare electrică la metroul din România, mai fiabile și mai economice, implică în primul rând cunoașterea amănunțită și detaliată a soluției existente, a modificărilor și îmbunătățirilor aduse pe parcursul celor 20 de ani de exploatare.

Principalele neajunsuri al actualului sistem de acționare electrică la metrou sunt prezentate în continuare (vezi subcapitolul 4.1).

Folosirea mașinii electrice de curent continuu atrage după sine o serie de dezavantaje derivate din aceasta cum sunt:

- existența colectorului și a periilor colectoare, deci a unui contact electric între piese în mișcare;
- apariția cercului de foc datorat proastei comutații, precum și străpungerii izolației;
- greutate și gabarit crescut;
- consum de cupru și preț ridicat.

Folosirea reglării reostatice a vitezei duce la apariția mai multor dezavantaje și anume:

- consum ineficient de energie electrică prin reostat;
- existența șocurilor de curent, deci a solicitărilor electrice termice și mecanice (în toată instalația de acționare);
- prezența șocurilor asupra călătorilor;
- reglarea vitezei nu este continuă;
- existența unui controler de tracțiune și frânare;
- instalația de forță este foarte complicată și cu consum exagerat de conductoare de secțiune mare (70 mm^2 și 95 mm^2);
- existența unui reostat pentru demaraj și frânare care depășește 500 Kg pe un vagon;
- existența unui agregat pentru răcirea reostatului;
- prețul de cost al tuturor acestor agregate suplimentare este destul de ridicat;
- frânarea este numai reostatică;
- cheltuielile de întreținere și exploatare sunt foarte mari;

La reglarea rezistivă, toate supratensiunile datorate comutației din linia de contact (apărute la tăierea tracțiunii prin contactoarele electromecanice de linie de la alte vehicule în circulație), intră în echipamente, micșorându-le rezistența de izolație și durata de viață în timp. Aceste supratensiuni ajung și pe motoarele de tracțiune producându-le aceleași neajunsuri.

Alte neajunsuri sunt datorate celorlalte componente folosite la fabricarea metroului și anume:

- crește consumul energetic pentru alimentarea excitației independente din circuitul de frânare;
- instalația de comandă este foarte complicată conținând un număr foarte mare de rele, contactoare și conductoare de legătură;
- protecția circuitelor de joasă tensiune nu este corespunzătoare (la unități cuplate permitea conectarea mai multor siguranțe automate în paralel pe același circuit);
- numeroase defecte ale convertizorului rotativ pentru serviciile auxiliare;
- apariția defectelor de masă datorate fiabilității reduse ale componentelor instalației de forță și de comandă;

- lipsa accesibilității la foarte multe componente a dus la nerespectarea programului de revizii prevăzut în cartea tehnică, și implicit, la apariția multor defecte;

- folosirea conductoarelor din circuitul de forță foarte rigide, mai ales la temperaturi mici, cu degajare puternică de fum și de gaze toxice;

- prezența unui întrerupător automat principal defectuos care a dus la apariția nenumăratelor incendii.

Circulația realizându-se cu 3 unități cuplate, deci cu 6 vagoane, apariția unui defect la un vagon în concepția ramelor actuale, poate duce la imobilizarea unei unități sau chiar a trenului.

Totalitatea agregatelor componente a dus în final la depășirea tarei unui vagon și implicit la creșterea consumului energetic.

Acest sistem de acționare clasic, pe lângă dezavantajele prezentate mai sus, are totuși și unele *avantaje* (vezi subcapitolul 3.1 și 4.2.4):

- fiind foarte vechi (în tracțiunea electrică din România având peste 100 ani) este bine cunoscut în exploatare, a fost modificat în permanență, și deci a devenit foarte simplu;

- aparatura de comandă este simplă, ușor de manevrat și de întreținut;

- în multe orașe ale lumii, sistemul este încă păstrat cu anumite modificări și îmbunătățiri mai ales în circuitul de comandă și reglare dotat cu automat programabil cu microprocesor (Marsilia, Cairo, Budapesta, Praga, Viena, Berlin, Paris).

Cu toată prezența celorlalte vehicule de transport în comun de la suprafață și cu toate problemele cu care se confruntă exploatarea metroului la această oră, nu se pune problema renunțării la acest mijloc de transport datorită investițiilor foarte mari, atât în vehicule, cât și în construcția tunelului. Se impune deci menținerea lui în exploatare prin îmbunătățirea substanțială a fiabilității și implicit prin aplicarea unor soluții moderne de acționare, cu cheltuieli reduse de întreținere, exploatare și reparație.

Un nou sistem modern de acționare la metrou trebuie să funcționeze cu fiabilitate ridicată, iar un defect, care apare la un vagon, nu trebuie să influențeze funcționarea celorlalte.

Acționarea cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei cu VTC este foarte simplă și s-ar preta foarte bine la echiparea ramelor de metrou din România. Acest sistem este folosit de foarte multe administrații de transport din lume, el fiind introdus încă din 1967 în Chicago și San Francisco. Alte orașe care folosesc metrouri construite cu acest sistem sunt: metrourile fabricate de firma Gec-Alstom (Paris, Lyon, Caracas, Mexic), metroul din Bruxelles, metrouri fabricate de firma ABB și alte firme japoneze. Sistemul a dus la eliminarea multor dezavantaje create de cel clasic, astfel că reglarea

vitezei nu se mai face în trepte, se elimină consumul rezistiv la demaraj, permite recuperarea energiei electrice la frânare și se menține un curent respectiv un cuplu constant atât la demaraj, cât și la frânare (vezi subcapitolul 3.2).

Marile firme producătoare de instalații și agregate de tracțiune electrică pentru metrou se pot împărți în 3 mari categorii (vezi subcapitolul 3.2):

- firme care produc numai VTC-uri și agregatele corespunzătoare;
- firme care produc numai invertoare și agregatele corespunzătoare;
- firme care produc și VTC-uri și invertoare.

Folosirea tiristorului GTO la realizarea VTC-ului simplifică foarte mult construcția acestuia, eliminând astfel o serie de componente necesare stingerii (vezi subcapitolul 5.5).

Comanda reglării și a întregii instalații a vehiculului cu automat programabil cu microprocesor aduce îmbunătățiri printre care și comanda de aprindere sau stingere a tiristorului cu fibră optică. Prezența display-ului cu 2 sau 3 digiți dă posibilitatea afișării codului de erori care îmbunătățește foarte mult instalația de diagnosticare, adică ușurează munca de depistare a unor defecte chiar de către conducătorul vehiculului. Pe baza unui program bine stabilit, cu ajutorul unui laptop și monitor, se pot stabili ordinea cronologică a unor informații de intrare sau ieșire din automatul programabil exact în momentul apariției defectului sau erorii. De asemenea, pot fi vizualizate și unele fenomene tranzitorii care apar în desfășurarea procesului de tracțiune (vezi subcapitolul 5.6.2).

Cutia neagră a automatului programabil poate înregistra o serie de informații care să stabilească cauza apariției unor avarii sau defecte, chiar și atunci când a avut loc un accident de circulație sau o întrerupere a sursei de energie de comandă (vezi subcapitolul 5.6.2.2).

Controlul permanent al parametrilor de tracțiune și frânare cu automat programabil asigură cea mai bună protecție împotriva fenomenului de antipatinare – antiblocare (vezi subcapitolul 5.6.2.).

La alegerea motorului de tracțiune, calculul puterii trebuie să se facă în condiții date, identice cu cele ale metroului din București referitoare la: viteza maximă dorită, accelerația maximă impusă la sfârșitul procesului de demaraj, distanța reală dintre stații și timpul real de staționare. În conformitate cu graficele din figura 5.3, pentru intervalele de variație alese ale parametrilor menționați, puterea motorului de tracțiune variază între 206 kW și 402 kW, adică dublu (vezi subcapitolul 5.3 și figura 5.3).

Avându-se în vedere că un mijloc modern de circulație trebuie să parcurgă un anumit spațiu într-un timp cât mai scurt, adică cu o viteză comercială cât mai mare, pentru același interval de variație a

parametrilor menționați anterior, viteza comercială se modifică de la 24,8 km/h la 49,3 km/h, deși viteza maximă atinsă variază doar între 80 și 100 km/h (vezi figura 5.4).

Calculul de dimensionare a inductivităților și condensatorului filtru de intrare a arătat o diferență foarte mare la acești parametri, în funcție de intervalul impus de ondulație maximă a tensiunii și a curentului dat în literatura de specialitate (vezi figurile 5.5 și 5.6).

Astfel, la undulațiile mari ale curentului de 27 A de exemplu, valoarea inductivității L_F se modifică foarte puțin cu variația ondulației tensiunii (de la 0,7 mH la 1,4 mH), dar totuși diferența este dublă.

La undulații mici ale curentului de 5,4 A de exemplu, valoarea inductivității L_F se modifică foarte mult cu variația ondulației tensiunii (de la 3,2 mH la 6,4 mH), dar tot o dublare a acesteia.

Capacitatea condensatorului C_F se modifică neglijabil cu ondulația curentului (de la 5,9 mF la 6,2 mF), dar modificarea este foarte mare odată cu variația ondulației tensiunii aleasă între 50 V și 105 V (de la 3 mF la 6,2 mF).

Avându-se în vedere cele prezentate mai sus, se impune o alegere cu grijă a ondulației maxime a curentului și a tensiunii, ținând seama și de valorile respective stabilitate de alți constructori sau proiectanți de scheme de acționare cu VTC, știind că valorile mari ale inductivității L_F și capacității C_F duc la majorarea greutateilor, volumelor și implicit a prețului de cost (vezi subcapitolul 5.3.2).

Pentru acționarea cu mașina de curent alternativ trifazat și reglarea vitezei cu invertor de frecvență, s-au putut determina relațiile de dependență între frecvență și tensiune, astfel încât la demaraj cuplul electromagnetic respectiv forța de tracțiune să se păstreze constante, iar după atingerea tensiunii nominale, atât cuplul electromagnetic, cât și forța de tracțiune să se modifice în funcție de viteză după o hiperbolă (vezi diagramele din figurile 7.5 până la 7.11, împreună cu tabelul 7.1), de asemenea la acest sistem de reglare a vitezei, se pretează foarte bine principiul orientării după câmp.

Încercările experimentale realizate pe un stand la firma Ganz-Ansaldo din Budapesta, cu componente aproape identice cu cele necesare acționării cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei cu VTC pentru un metrou, au permis o serie de modificări de care nu s-a putut ține seama din proiectare (vezi subcapitolul 6.6).

De asemenea, a fost posibilă și o verificare în funcționare de lungă durată pentru toate componentele. Marele avantaj al încercărilor pe modelul experimental este acela că scurtează foarte mult durata de proiectare a standului (în cazul probelor pe un vehicul introdus în stand), durata de realizare a lui, durata încercărilor, dar și prețul de cost. Pentru un metrou, timpul de proiectare, realizare și încercări pe un model experimental este de cca. 1 an, dar pentru un prototip poate

ajunge până la 3 ani, iar prețul de cost poate să fie de aproximativ 10 ori mai mare (vezi subcapitolul 6.7).

Tot cu prilejul încercărilor experimentale se poate trage concluzia că o serie de componente ale schemei de forță sau comandă pot fi realizate în țară cu importuri de completare. Dintre acestea se pot aminti: VTC-ul, inductivitățile și condensatorul filtru, sursa statică de tensiune pentru servicii auxiliare, sursa statică pentru preexcitare (la frânare), întrerupătorul automat principal, siguranțele fuzibile rapide și chiar motorul de tracțiune de curent continuu (vezi subcapitolul 5.5 și 6.6).

Alte concluzii desprinse în urma încercărilor experimentale sunt acelea că totuși o serie întreagă de componente (pe lângă cele de completare), trebuie importate de la furnizori specializați, care garantează o fiabilitate foarte ridicată a acestora. Acestea sunt: conductoare foarte flexibile cu degajare minimă de fum și fără degajare de gaze toxice, contactoare de forță pentru curenți mari, contactoare de comandă, siguranțe automate monopolare, bipolare sau tripolare și nu în ultimul rând automatul programabil cu microprocesor (vezi subcapitolul 6.6).

Cu toate neajunsurile prezentate aici sau în literatura de specialitate, motorul de curent continuu poate fi îmbunătățit din punct de vedere constructiv și realizat chiar în țară (dar mai ales în Europa), astfel încât în colaborare cu VTC-ul și automatul programabil cu microprocesor, să realizeze un sistem de acționare care să reducă foarte mult rata defectelor sau implicit să-i crească fiabilitatea (vezi subcapitolul 4.2.2 și 5.6.2).

Modernizarea motorului de tracțiune constă în fabricarea într-o clasă de izolație superioară (H sau C), modificarea constructivă a lui, astfel încât punctul de funcționare la curentul nominal (sau la un curent mai mare decât acesta) să iasă pe caracteristica naturală la o viteză cât mai mare, adică la o accelerație constantă pe o durată de timp cât mai mare.

După doi ani de exploatare, 100 de motoare de tracțiune de curent continuu tip TN96A funcționează fără probleme, iar la VTC au apărut doar două defecte la tiristoarele GTO (și acestea în timpul probelor), încadrându-se într-un procent normal al defectelor de fabricație (vezi subcapitolul 6.6).

Criteriile de comparație între cele două sisteme de acționare au avut la bază calitățile funcționale, confortul, realizarea accelerației și decelerației, fiabilitatea, siguranța în exploatare, prețul de cost și consumul de energie.

În acest fel, se poate realiza un vehicul mult mai simplu, mai fiabil, mai economic, mai ieftin într-un timp foarte scurt, mai ușor de întreținut în exploatare și cu cheltuieli minime.

8.3. Contribuții personale

Având particularități și condiții de circulație aparte față de alte mijloace electrice de transport, metroul nu poate fi privit ca o aplicație simplă a unei acționări electrice. Circulația acestor vehicule trebuie să se facă foarte regulat, mai ales acolo unde numărul de pasageri transportați pe oră și sens este foarte mare (exemplu în București). Nenumăratele neajunsuri și deficiențe ale actualelor rame de metrou au dus deseori la blocări ale traficului, la evacuarea pasagerilor în tunel și deplasarea lor pe jos până în stații, la incendii sau începuturi de incendii care nu de puține ori au periclitat viața celor care au folosit acest mijloc de transport (vezi subcapitolul 4.1).

Metroul din București ca un mijloc de transport cu acționare electrică foarte complex conceput și realizat în anii "75" după modele europene vecine, cu componente aproape în exclusivitate românești, conține în jur de [89], [92]: 25:000 m conductoare de comandă (cu secțiunile de la 1 mm² la 35 mm²), 1000 m conductoare de forță (cu secțiunile 50, 70 și 95 mm²), 110 siguranțe automate monopolare, 150 rele și contactoare de comandă, 90 contactoare de forță pentru curenți mari, mașini electrice auxiliare, alte agregate de forță (reostate, convertizoare, transformatoare), instalații electronice de comandă, 50 de butoane de comandă, 35 lămpi de semnalizare, și o greutate totală de 38 tone pe vagon, din care aproximativ trei tone de cupru (materializat în conductoare, transformatoare, contactoare și mașini electrice) (vezi subcapitolul 4.2.6).

Teza de doctorat prezentată de autor cu titlul "CONTRIBUȚII PRIVIND OPTIMIZAREA ȘI ALEGEREA SISTEMELOR DE ACȚIONARE ELECTRICĂ PENTRU METROU" și-a găsit motivația în marile neajunsuri dovedite de acest mijloc de transport în comun pe parcursul celor 20 de ani de exploatare și aducerea lui la parametri tehnici mondiali actuali.

Contribuțiile personale ale autorului pot fi grupate în următoarele direcții:

- a – referitoare la caracterul monografic al lucrării;
- b – conceperea schemelor electrice pentru o acționare nouă și modernă la metroul din România;
- c – realizarea încercărilor experimentale pe o instalație care simulează fizic metroul;
- d – cercetarea cu contribuții personale care să ducă la o finalizare concretă pentru aplicarea la metrou;
- e – referitoare la aportul și completările actualului sistem clasic.

În calitate de participant la construirea celor 252 de vehicule de metrou din București, participant activ la toate dezbaterile care au avut loc referitoare la deficiențele acestui sistem de acționare din exploatare încă de la darea în folosință a primului tronson de metrou,

autorul tece în revistă numeroasele lui neajunsuri, determină caracteristicile de tracțiune și frânare, într-o prezentare sintetică și monografică de studiu personală (vezi capitolul 2).

Cu prilejul celor 15 ani de fabricație și de exploatare, autorul a participat direct la punerea în funcțiune a schemei de acționare din circuitul de forță și comandă, la măsurătorile realizate în vederea omologării seriei zero. De asemenea și-a adus aportul făcând o serie de completări la actualul sistem prin (vezi subcapitolul 4.2 4.3 și [1,2,5,6,7,8,9]):

- redimensionarea conductoarelor de legătură și a unor agregate;
- optimizarea traseelor de conductoare din circuitul electric de forță și de comandă;
- reproiectarea amenajărilor instalațiilor electrice și pneumatice în vederea creșterii accesibilității atât la execuție, cât și în exploatare;
- reamenajarea amplasării aparatelor și agregatelor prin separarea componentelor de forță de cele de comandă;
- refacerea schemelor electrice în varianta execuției tehnologice, care ușurează foarte mult procesul de fabricație, probele de control și recepție precum și procesul de exploatare și întreținere;
- depistarea unor defecțiuni cu caracter de masă care au dus la imobilizări de peste 50% din parcul exploatat și eliminarea parțială a lor (în anul 1986);
- redimensionările și reamenajările au dus la reducerea consumului de cupru cu 30% și a greutateii vagonului cu 2 tone.

Autorul analizează sistemele de acționare la metrou, împărțindu-le în 3 mari categorii reprezentative, din care fac parte și cele două sisteme moderne folosite în întreaga lume în prezent. Cele două noi sisteme au preponderență la ora actuală aproape egală.

Indiferent de sistemul modern ales în continuare, autorul pe lângă acesta face *propuneri* concrete pentru o serie de modificări, în varianta cea mai economică și mai accesibilă pentru România, care vor duce implicit la creșterea fiabilității vehiculului. Aceste propuneri pot fi aplicate și la actualul sistem din exploatare, dar mai ales la unul modern în varianta constructivă integrată în România (cu importuri pentru unele componente și agregate, respectiv cu importuri de completare pentru altele).

Aceste propuneri concrete sunt (vezi subcapitolul 4.2, 4.3 și [6,7,8,9]):

- modernizarea motorului de tracțiune și fabricarea lui într-o clasă de izolație H, fabricare care se poate realiza în Europa sau chiar și în România. Această modernizare va duce la îmbunătățirea comutației, creșterea rezistenței de izolație, îmbunătățirea caracteristicilor prin creșterea timpului de funcționare cu accelerație constantă, deci implicit la creșterea fiabilității și a confortului;

- simplificarea cablajului de forță prin redimensionare și folosirea de conductoare foarte flexibile din import rezistente la foc și fără degajare de gaze toxice (prețul acestora este egal sau chiar mai mic decât cele indigene);

- simplificarea cablajului de comandă și amplasarea judicioasă a componentelor pentru reducerea consumului;

- perfecționarea instalațiilor auxiliare și de comandă odată cu folosirea unor componente fiabile;

- înlocuirea sursei rotative de tensiune cu o sursă statică;

- perfecționare blocului automat de comandă prin folosirea automatului programabil cu microprocesor;

- păstrarea aceleiași caroserii.

O parte dintre aceste propuneri prezentate mai sus sunt studiate de către autor și materializate în proiecte și scheme care pot fi aplicate imediat (vezi subcapitolul 5.5 și 6.6).

Teza abordează o problemă importantă de o deosebită actualitate, propunând reglarea vitezei metroului cu VTC și frânare recuperativă, în special pentru faptul că pornirile și opririle sunt foarte dese (la un interval de 2 minute). Principalul obiectiv al lucrării l-a constituit studiul, cercetarea și realizarea unei scheme de acționare care să ducă la îmbunătățirea fiabilității actualei rame de metrou, creșterea confortului, reducerea prețului de cost și reducerea consumului energetic (vezi subcapitolul 5.5). Soluția propusă are în vedere importanța obiectivului și responsabilitatea autorului.

Pentru sistemul de acționare cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei cu VTC, autorul realizează *calculul de dimensionare* pentru unele componente, cum sunt: motorul de tracțiune, inductivitățile de intrare și de netezire, condensatorul filtru. Cu prilejul acestor dimensionări, calculează, trasează și prezintă câteva diagrame din care se pot trage o serie de concluzii la alegerea componentelor (vezi subcapitolul 5.3). Acestea sunt:

- diagramele de variație ale puterii motorului de tracțiune în funcție de mai mulți parametri: distanța dintre stații, viteza maximă la sfârșitul procesului de demaraj, accelerația de demaraj și de frânare, timpul de staționare;

- diagramele vitezei comerciale în funcție de aceiași parametri;

- diagramele de variație ale inductivității și capacității filtrului de intrare, în funcție de ondulația tensiunii impuse și a curentului maxim impus, prezentate în literatura de specialitate.

În continuare, autorul prezintă schema electrică de acționare a circuitelor de forță de concepție originală a sistemului de acționare cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei cu VTC pentru o unitate de metrou, împreună cu explicațiile funcționale în toate regimurile impuse de exploatare și de schemă (vezi subcapitolul 5.5).

În situația inevitabilă, de comandă și reglare a sistemului cu automat programabil și microprocesor, autorul prezintă schema organizării generale a comenzilor electrice pe metrou. Tot aici, el descrie performanțele acestui sistem automat, totalitatea informațiilor de intrare și ieșire, precum și posibilitățile de diagnosticare control și depistare a defectelor în exploatare (vezi subcapitolul 5.6).

În urma studiului făcut, luând în considerare toate soluțiile posibile (ținând seama și de factorul economic real), autorul a trecut la experimentarea soluției de acționare cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei cu VTC. În acest fel, pe lângă contribuțiile teoretice de studiu și concepție a sistemului de reglare cu VTC (pentru metroul din România), autorul mai are contribuții practice de participare concretă la realizarea unui stand pentru încercări experimentale, luând parte la desfășurarea măsurărilor și la modificările apărute în urma încercărilor. Aceste încercări s-au făcut pe un model experimental conținând componente originale în mărime naturală cu parametrii foarte apropiați sistemului de la metrou (vezi capitolul 6).

Cu prilejul studiului făcut pentru implementarea unei soluții moderne la metrou, autorul a proiectat o instalație de comandă, a participat activ la proiectarea schemei electrice de acționare (similară metroului) și a realizat proiectul de execuție la întreaga instalație de tracțiune cu VTC pentru troleibuzul 415T, furnizat în București. În același timp, a coordonat întreaga activitate de punere sub tensiune, probe și control pentru 100 de vehicule, a coordonat și participat direct la încercările experimentale pe un prototip și pe seria zero în vederea omologării. Pentru realizarea încercărilor tuturor troleibuzelor, a conceput și executat un stand pentru verificarea întregii instalații, care să simuleze automatul programabil (în timpul probelor), înaintea conectării finale cu acesta. Aplicarea metodologiei de încercări și probe propusă de autor cu simulatorul sus amintit va duce la reducerea timpului pentru aceste operații de la 800 ore la 40 ore pentru o unitate de metrou și totodată la creșterea calității produsului fabricat (vezi subcapitolul 6.6 și [9]).

Schemele electrice de forță și comandă pentru troleibuz au fost realizate de către autor într-o reprezentare unică centralizată [8], care permit o fabricare, o exploatare și o înțelegere foarte ușoară.

Pentru soluția de acționare cu mașina de curent alternativ și reglarea vitezei cu invertor de frecvență, autorul a elaborat metodologia de calcul a caracteristicii de tracțiune $F_0(v)$, determinând relațiile de dependență între variația tensiunii și a frecvenței, astfel încât până la atingerea tensiunii nominale forța de tracțiune să rămână constantă, iar după aceea, aceasta să se modifice hiperbolic cu viteza.

Analiza comparativă între cele două sisteme a fost făcută de către autor pe baza complexității, fiabilității, prețului de cost al fabricației (sau achiziționării), ușurința întreținerii și a exploatării, de unde se

justifică aplicarea soluției propuse de reglare cu VTC pentru perioada imediată, iar cealaltă soluție (cu mașina de curent alternativ și reglarea vitezei cu invertor de frecvență), pentru perioada viitoare. Această analiză a fost necesară datorită complexității în ansamblu a problemelor de la metrou.

Pe baza schemei unui invertor de frecvență cunoscut și aplicat în lume, autorul a propus o schemă electrică de acționare pentru metrou de concepție proprie, care să respecte toate condițiile specifice de funcționare și de exploatare ale acestuia (vezi subcapitolul 7.4.1).

BIBLIOGRAFIE

- 1) Bele, I. – *Necesitatea și modul menținerii la parametri ridicați a sistemului de tracțiune în curent continuu, alimentat la 750 V*. La: Sesiunea de comunicări științifice a U.A.V. Arad, Secțiunea “Rezistența materialelor și Material Rulant” (pag. 69-73), mai 1994.
- 2) Bele, I. – *Calculul desfășurat al curentului echivalent în vederea dimensionării circuitelor de forță la metrou*. La: Sesiunea de comunicări științifice a U.C.B. Târgu-Jiu, “Analele universității”, Nr.2/1995 (pag. 65-70), 1995.
- 3) Bele, I. – *Modificarea instalației electrice de tracțiune în vederea reducerii numărului de defecte la motorul TN-71*. La: Sesiunea de comunicări științifice a U.A.V. Arad, Volumul 7 “Material Rulant” (pag. 30-33), mai 1996.
- 4) Bele, I. – *Automatizarea procesului de modificare a vitezei la tramvaiul “Timiș”*. La: Sesiunea de comunicări științifice a U.A.V. Arad, Volumul 7 “Material Rulant” (pag. 34-37), mai 1996.
- 5) Bele, I. – *Înlocuirea convertizorului rotativ pentru servicii auxiliare cu convertor static la metrou*. La: Sesiunea de comunicări științifice a U.A.V. Arad, Volumul IX “Material Rulant” (pag. 95-98), Octombrie 1997.
- 6) Bele, I. – *Realizarea schemelor de comandă și forță a tracțiunii electrice în varianta execuției tehnologice*. La: Sesiunea de comunicări științifice a U.A.V. Arad, Volumul IX “Material Rulant” (pag. 103-106), Octombrie 1997.
- 7) Bele, I. – *Comanda și supravegherea tracțiunii cu microprocesor*. La: Sesiunea de comunicări științifice a U.A.V. Arad, Volumul IX “Material Rulant” (pag. 111-114), Octombrie 1997.
- 8) Bele, I. – *Achievement of drive control schemes in a unique centralized alternative*. Revista UAV Arad, mai 1999.
- 9) Bele, I. – *Stand for the check of the control and drive installation before the coupling to the microprocessor of the trolleybus adjusted to VTC*. Revista UAV Arad, mai 1999.
- 10) Bele, I. – *Locomotive și trenuri electrice*, U.A.V., Arad 1998.

- 11) Bendel, H. – *Die elektrische lokomotive. Aufbau Funktion Neue*, Technik Transspres, Berlin 1994.
- 12) Bodea, M. – *Diode și tiristoare de putere*, Ed. Tehnică, București 1990.
- 13) Boschat, F. – *Les contraintes applicables aux composants dans le materiel roulant du métro*, L'onde électrique, 1980.
- 14) Boțan, N. – *Reglarea vitezei sistemelor de acționare electrică*, Ed. Tehnică, București 1974.
- 15) Boțan, N. – *Comanda sistemelor de acționare electrică*, Ed. Tehnică, București 1977.
- 16) Boțan, N; Balaban, E; Boțan, C; Diaconescu, M. – *Regimuri economice ale sistemelor de acționara electrică*, Ed. Tehnică, București 1985.
- 17) Cartianu, Gh.; Săvescu, M.; Constantin, I., Stanomir, D. – *Semnale circuite și sisteme*, Ed. Tehnică, București 1980.
- 18) Cetin, I. – *Folddurchflutung und Foldhauptindukivitat bei Mischstrom-tribmotorum*, ETZ Nr. 8/1964.
- 19) Cioc, I; Nica, C. – *Proiectarea mașinilor electrice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București 1994.
- 20) Câmpeanu, A. – *Mașini electrice. Probleme fundamentale speciale și de funcționare optimală*, Ed. Scrisul Românesc, Craiova 1988.
- 21) Condacse, N. – *Locomotive și trenuri electrice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București 1980.
- 22) Daba, M. – *Bazele electrotehnicii*, I.P.T.V., Timișoara 1989.
- 23) Damachi, E.; Tunsoiu, A.; Doboș, L.; Tomescu, N. – *Electronică*, Ed. Didactică și Pedagogică, București 1979.
- 24) Dordea, T. – *Mașini electrice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București 1977.
- 25) Fransua, Al.; Măgureanu, R. – *Mașini și acționări electrice. Elemente de execuție*, Ed. Tehnică, București 1986.
- 26) Gheorghiu, I; Fransua, Al. – *Tratat de mașini electrice. Vol. I. Mașini de curent continuu*, Editura Academiei RSR 1968.

- 27) Gheorghiu, I; Fransua, Al. – *Tratat de mașini electrice. Vol. I. Mașini asincrone*, Editura Academiei RSR 1971.
- 28) Halász, S. – *Automatizált villamos Hajtások I.*, Tankönyvkiado, Budapest 1989.
- 29) Iancu, V.; Rădulescu, H.; Păpușoiu, Gh. – *Tracțiune electrică*, I.P.C.N., Cluj 1989.
- 30) Ionescu, F.; Păcuraru, E. – *Mutatoare*, I.P.T.V., Timișoara 1983.
- 31) Izvercianu, P.N.; Suciu, Gh. – *Matamatici superioare și elemente de teoria grafurilor*, I.P.T.V., Timișoara 1974.
- 32) Jaques di Meo – *Convertisseur de courant pour l'énergie*
- 33) Jean-Pierre Riff – *L'évolution des materiales roulants METRO*
- 34) Katta, T. – *Chopper control system of new standard car*, 1978.
- 35) Katta, T. – *Teito rapid transit authority*, 1979.
- 36) Katta, T. – *Thyristor control of traction motors*, Raport for U.I.T.P. 1980.
- 37) Kelemen, A.; Imecs, M. – *Mutatoare*, Ed. Didactică și Pedagogică, București 1978.
- 38) Kelemen, A. – *Accionări electrice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București 1980.
- 39) Kelemen, A.; Imecs, M. – *Electrotehnică de putere*, Ed. Didactică și Pedagogică, București 1983.
- 40) Kelemen, A.; Imecs, M. – *Sistem de reglare cu orientare după câmp ale mașinilor de curent alternativ*, I.P.C.N., Cluj Napoca 1987.
- 41) Kisch, D.O. – *Reglarea vectorială a mașinilor de curent alternativ*, Ed. ICPE, București 1997.
- 42) Kostenko, M; Piotrovski, L. – *Machines électriques. Tome II. Machines á courant alternatif*, Éditions Mir, Moscou 1969.
- 43) Kovács, P. – *Analiza regimurilor tranzitorii ale mașinilor electrice (traducere și adaptare Kelemen, A.; Imecs, M.)* Ed. Tehnică, București 1980.
- 44) Leroy, J. – *Expérimentations d'équipements a hacheurs pour le contrôle des moteurs de traction*, Revue Générale des Chemnis de Fer, 1973.

- 45) Marcu, M. – *Schemele electrice și comenzile locomotivelor*, Ed. Tehnică, București 1992.
- 46) Măgureanu, R.; Micu, D. – *Convertoare statice de frecvență în acționări cu motoare asincrone*, Ed. Tehnică, București 1985.
- 47) Măgureanu, R. – *Acționări electrice. Tendințe actuale*, Ed. Tehnică, București 1988.
- 48) Mihăilescu, D.; Lie, A. – *Considerații privind funcționarea vehiculelor feroviare cu transmisie în curent alternativ cu motoare asincrone de tracțiune*, Revista transporturilor și telecomunicațiilor Nr. 11, București 1984.
- 49) Mihăilescu, D.; Pantelimon, M. – *Analiza armonică a transmisiilor în curent alternativ la vehicule de tracțiune*, Revista transporturilor și telecomunicațiilor Nr. 4, București 1985.
- 50) Mihăilescu, D. – *Locomotive și trenuri electrice cu motoare de tracțiune asincrone*, Ed. Didactică și Pedagogică, București 1997.
- 51) Muntean, N. – *Convertoare statice*, Ed. Politehnica, Timișoara 1998.
- 52) Negreanu, A. – *Frecvența optimă la reglarea motoarelor serie de curent continuu prin lățimi de impulsuri de tensiuni*, Teză de doctorat, I.P.T.V., Timișoara 1968.
- 53) Negreanu, A. – *Locomotive și trenuri electrice*, I.P.T.V., Timișoara 1979.
- 54) Negreanu, A. – *Îndrumător pentru proiectarea Locomotivelor și trenurilor electrice*, I.P.T.V., Timișoara 1976.
- 55) Negreanu, A. – *Îndrumător de lucrări de laborator la disciplina Locomotivelor și trenurilor electrice*, I.P.T.V., Timișoara 1976.
- 56) Negreanu, A.; Turoș, Gh. – *Condițiile utilizării expresiei analitice a caracteristicilor de mers în gol, la mașinile de curent continuu*, Sesiunea de comunicări științifice I.P., Iași 1967.
- 57) Nițu, C.; ș.a. – *Echipamente electrice și electronice de automatizare*, Ed. Didactică și Pedagogică, București 1980.
- 58) Novac, I.; ș.a. – *Mașini și acționări electrice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București 1982.

- 59) Păpușoiu, Gh. – *Tracțiune electrică*, U.P.T., Timișoara 1996.
- 60) Păpușoiu, Gh. – *Contribuții la modificarea și reglarea vitezei motoarelor asincrone utilizate în tracțiune*, Teză de doctorat, I.P.T.V., Timișoara 1987.
- 61) Păun, Șt.; s.a. – *Determinarea randamentului motoarelor asincrone în regim de tracțiune feroviară*, Revista Căilor Ferate Române Anul 85 Nr. 1/1998 (pag. 31-33), București 1998.
- 62) Păun, Șt.; s.a. – *Calculul factorului de putere al motorului asincron în regim de tracțiune feroviară*, Revista Căilor Ferate Române Anul 85 Nr. 2-3/1998 (pag. 40-42), București 1998.
- 63) Popa, Al. – *Locomotive și automotoare cu motoare termice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București 1978.
- 64) Popa, G. – *Influența sistemului de reglare asupra realizării forței de tracțiune feroviară*, Revista Căilor Ferate Române, Anul 84 Nr. 3/1997 (pag. 22-26) București 1997.
- 65) Popescu, V. – *Electronică de putere* Editura de Vest, Timișoara 1998.
- 66) Popovici, D. – *Frânarea recuperativă cu variatoare de tensiune continuă la mașinile de curent continuu*, Teză de doctorat, I.P.T.V., Timișoara 1980.
- 67) Postnicov, I.M. – *Proiectarea mașinilor electrice (traducere din limba rusă)* Ed. Energetica de stat, 1954.
- 68) Prodan, M. – *Mutatoare*, I.P.T.V., Timișoara 1985.
- 69) Răduți, C; Nicolescu, E. – *Mașini electrice rotative fabricate în România*, Ed. Tehnică, București 1981.
- 70) Saal, C; Szabo, W. – *Sisteme de acționare electrică. Determinarea parametrilor de funcționare*. Ed. Tehnică, București 1981.
- 71) Seracin, E. – *Acționări electrice*, I.P.T.V., Timișoara 1980.
- 72) Seracin, E.; Popovici, D. – *Tehnica acționărilor electrice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București 1985.
- 73) Străinescu, I.; Dan, I. – *Echipamente moderne tiristorizate pentru ramele de metrou*, M.I.C.M., București 1981.

- 74) Străinescu, I. – *Variatoare statice de tensiune continuă*, Ed. Tehnică, București 1983.
- 75) Străinescu, I.; Condruș, M. – *Tiristorul*, Ed. Tehnică, București 1988.
- 76) Șoran, I. F. – *Aționări electrice*, I. Politehnic, București 1988.
- 77) Tomescu, I. – *Probleme de combinatorică și teoria grafurilor*, Ed. Didactică și Pedagogică, București 1981.
- 78) Tregubleac, S.; Popa, G. – *Analiza parametrilor electrici la pornirea locomotivelor cu motoare asincrone*, Revista Căilor Ferate Române, Anul 84 Nr. 2/1997 (pag. 26-29) București 1997.
- 79) Turbuțiu, Gh. – *Locomotive electrice – Volumul I*, Centrul de documentare și publicații tehnice MTTC 1972.
- 80) Turbuțiu, Gh. – *Locomotive electrice – Volumul II*, Centrul de documentare și publicații tehnice MTTC 1972.
- 81) Turbuțiu, Gh. – *Inginerie de sistem, automatizări și informatică în transporturi feroviare, navale, aeriene, rutiere*, Ed. Tehnică, București 1988.
- 82) Turbuțiu, Gh. – *Inginerie de sistem, automatizări și informatică în transporturi feroviare, navale, aeriene, rutiere*, Ed. Tehnică, București 1989.
- 83) Tunsoiu, Gh.; Seracin, E.; Saal, C. – *Aționări electrice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București 1982.
- 84) Turoș, Gh. – *Vehicule neconvenționale de tracțiune feroviară*, I.P.T.V., Timișoara 1977.
- 85) Văzdăuțeanu, V. – *Tracțiune electrică*, I.P.T.V., Timișoara 1984.
- 86) Veșenevski, C. H. – *Harakteristiki dvigatelei v elektroprivade*, Moskva, Energhia 1977.
- 87) Zăgănescu, I. – *Locomotive și automotoare cu motoare termice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București 1972.
- 88) *** – *ABB-HENSCHEL Vaggon Union GmbH*.
- 89) *** – *ACEC Revue 3-4/1976*.
- 90) *** – *Cartea tehnică a metroului 239 Vol. I – Vol. VII*, Arad 1988.

- 91) *** – *Cartea tehnică a troleibuzului 415T*, București 1998.
- 92) *** – *Chopper cars in Japan*.
- 93) *** – *Documentația de execuție a metroului din București*.
- 94) *** – *Documentația tehnică de execuție a troleibuzului 415T pentru București*.
- 95) *** – *Les voiteurs de métro de Bruxelles*,
- 96) *** – *Metros der welt lexicon*, Berlin 1983.
- 97) *** – *Rama electrică de metrou*, ICPTT, București 1984.
- 98) *** – *Revue Generale des Chemnis de Fer*, Noiembrie 1981.
- 99) *** – *Revue Generale des Chemnis de Fer*, Aprilie 1982.
- 100) *** – *Revue Generale des Chemnis de Fer*, Ianuarie 1983.
- 101) *** – *Revue Generale des Chemnis de Fer*, Mai 1983.
- 102) *** – *Revue Generale des Chemnis de Fer*, Iunie 1983.
- 103) *** – *Revue Generale des Chemnis de Fer*, Octombrie 1983.
- 104) *** – *Revue Generale des Chemnis de Fer*, Mai 1984.
- 105) *** – *Revue Generale des Chemnis de Fer*, Octombrie 1984.
- 106) *** – *Revue Generale des Chemnis de Fer*, Aprilie 1985.
- 107) *** – *Revue Generale des Chemnis de Fer*, Octombrie 1985.
- 108) *** – *Revue Generale des Chemnis de Fer*, Decembrie 1987.
- 109) *** – *Revue Generale des Chemnis de Fer*, Septembrie 1989.
- 110) *** – *Revue Generale des Chemnis de Fer*, Iulie 1991.
- 111) *** – *Revue Generale des Chemnis de Fer*, Septembrie 1993.
- 112) *** – *Schemele electrice de forță și comandă ale metroului din București*.
- 113) *** – *Schemele electrice de forță și comandă a troleibuzului 415T București*.
- 114) *** – *TOSHIBA, Train monitoring device*.
- 115) *** – *TOSHIBA, Chopper controllers*.
- 116) *** – *Tehnische beschreibung des U-ban*, Vien 1975.
- 117) *** – *Wiener U-Bahn*, Vien 1980.
- 118) *** – *Westcode semiconductors*, Summary England 1996
- 119) *** – *Vessatile dual voltage traction from Holec*.

ANEXA I

Caracteristicile de tracțiune determinate pe cale analitică și grafică

Caracteristicile de tracțiune ale metroului au fost determinate de către autor, pe baza datelor existente referitoare la motorul de tracțiune și la vehicul. Ele au fost calculate și trasate pe calc milimetric. În capitolul 2 s-au prezentat copii ale acestora micșorate.

Acestea sunt prezentate în continuare și conțin:

- 1). Caracteristica magnetică universală $\varphi(I)$;
- 2). Caracteristica magnetică a motoarelor de tracțiune $\Phi(I)$;
- 3). Caracteristicile vitezei unghiulare $\Omega(I)$;
- 4). Caracteristica randamentului $\eta(I)$;
- 5). Caracteristicile cuplurilor $M_e(I)$, $M_u(I)$;
- 6). Caracteristicile mecanice $M_u(\Omega)$;
- 7). Diagrama de variație a cuplului de frânare $M_f(I)$.

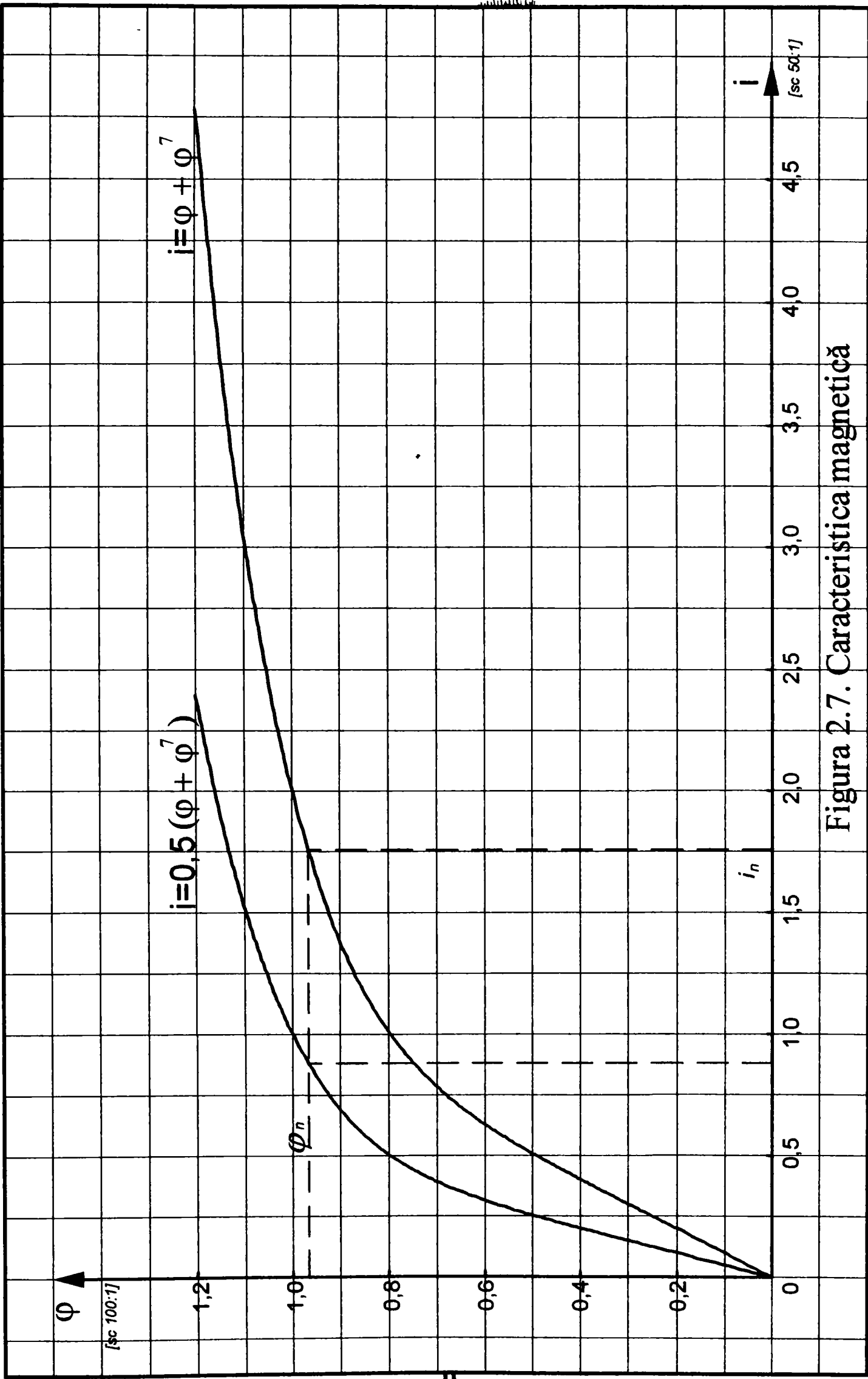


Figura 2.7. Caracteristica magnetică

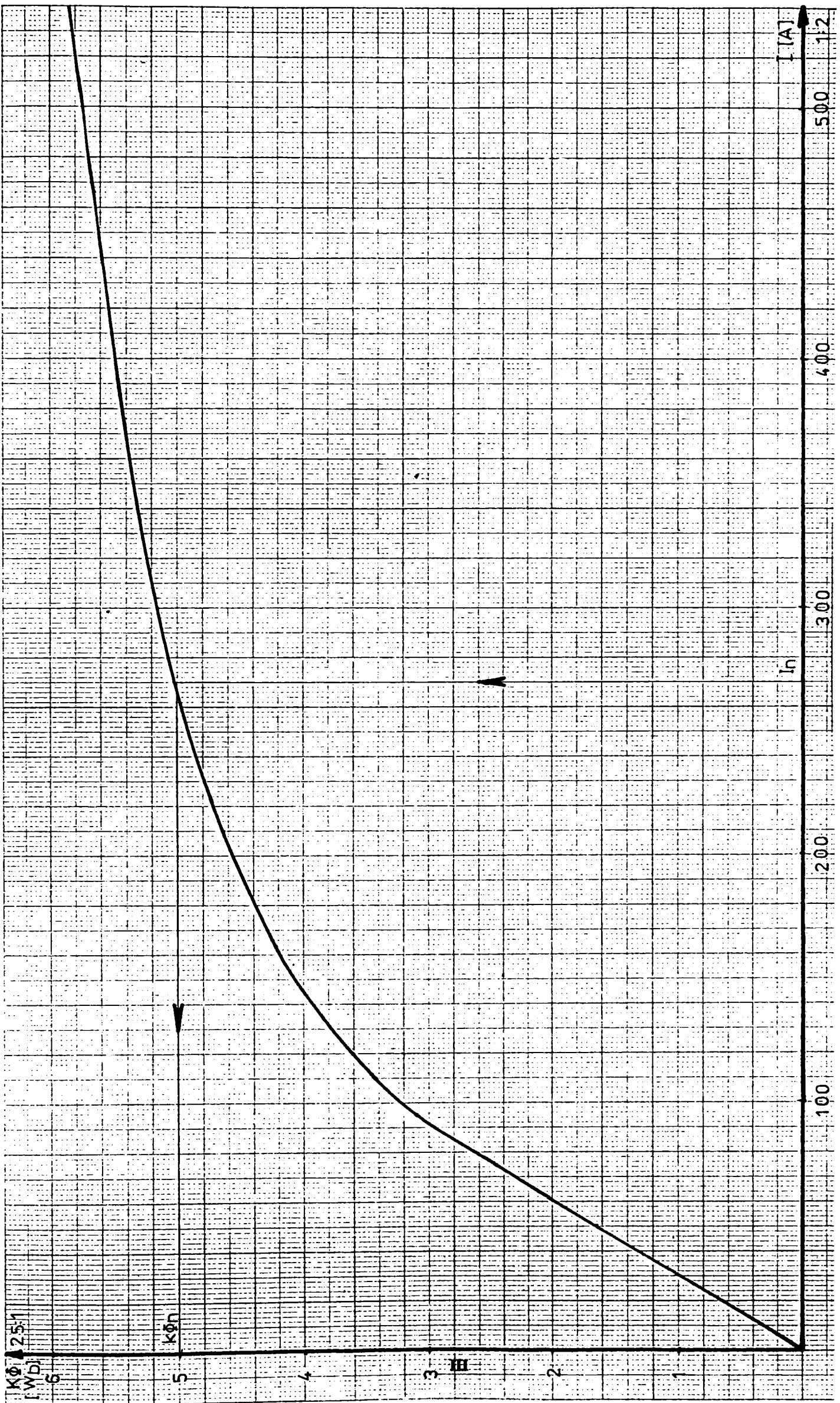


Figura 2.8. Caracteristica magnetică a MT

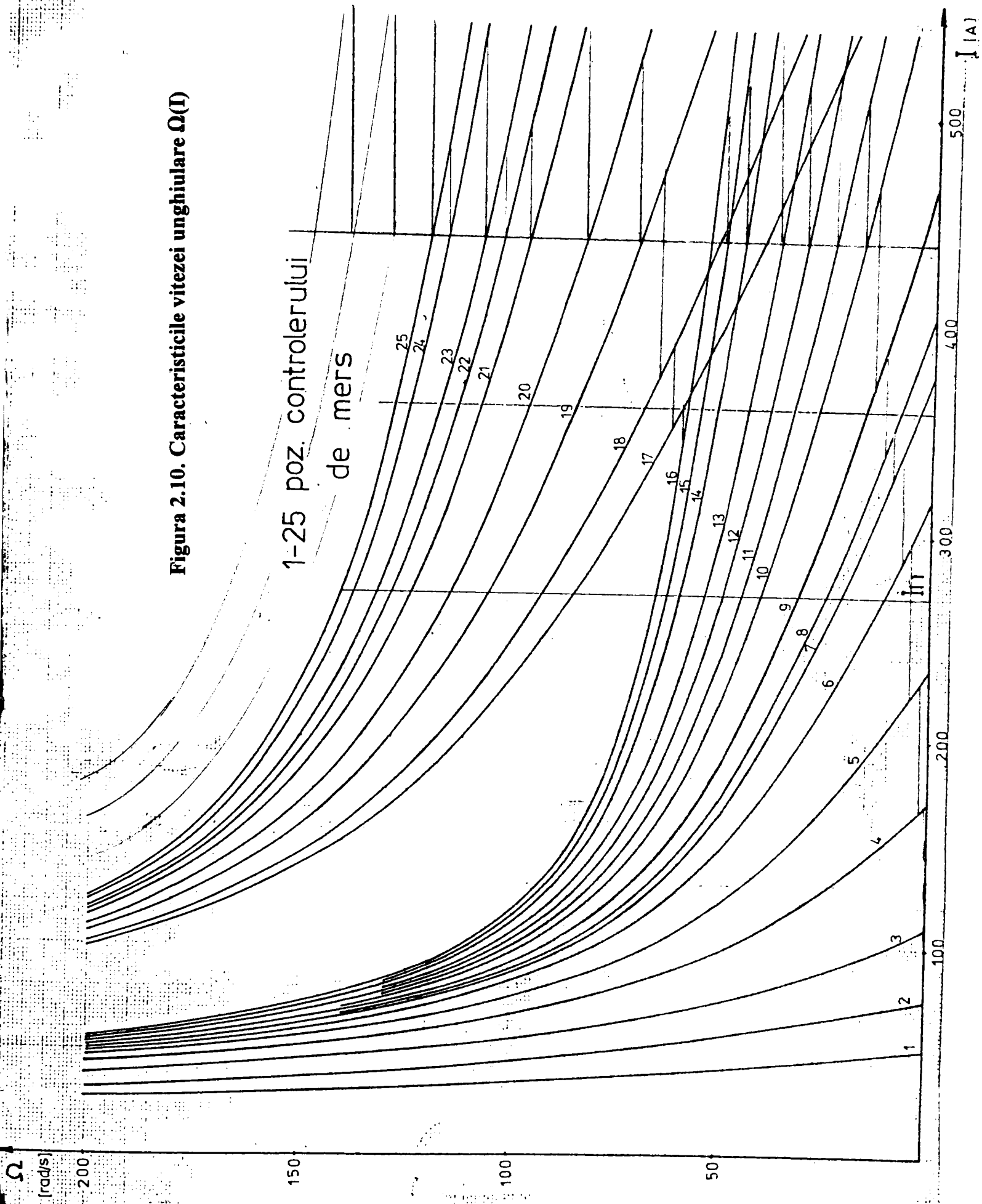


Figura 2.10. Caracteristicile vitezei unghiulare $\Omega(I)$

1-25 poz. controlerului
de mers

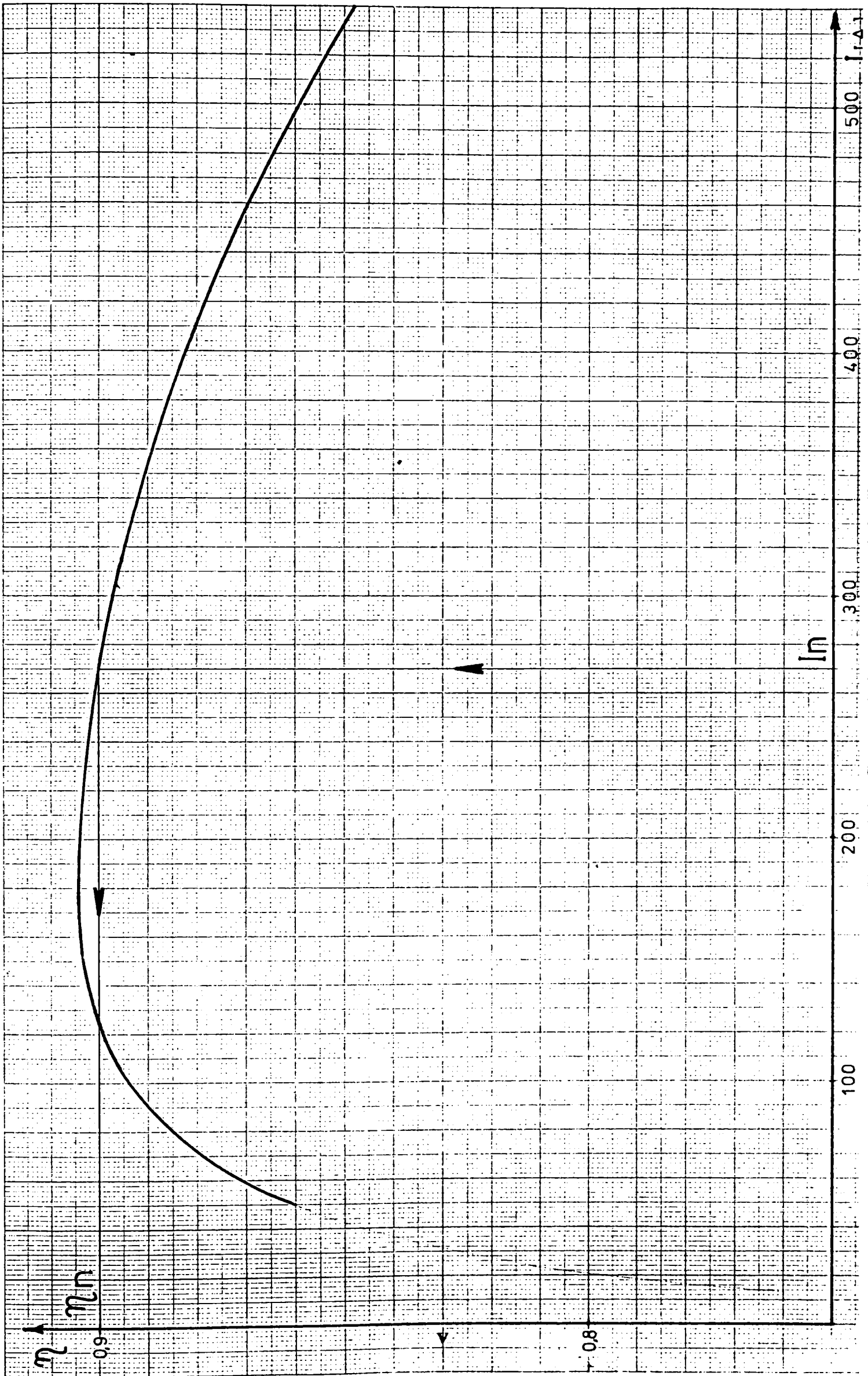


Figura 2.11. Caracteristica randamentului $\eta(I)$

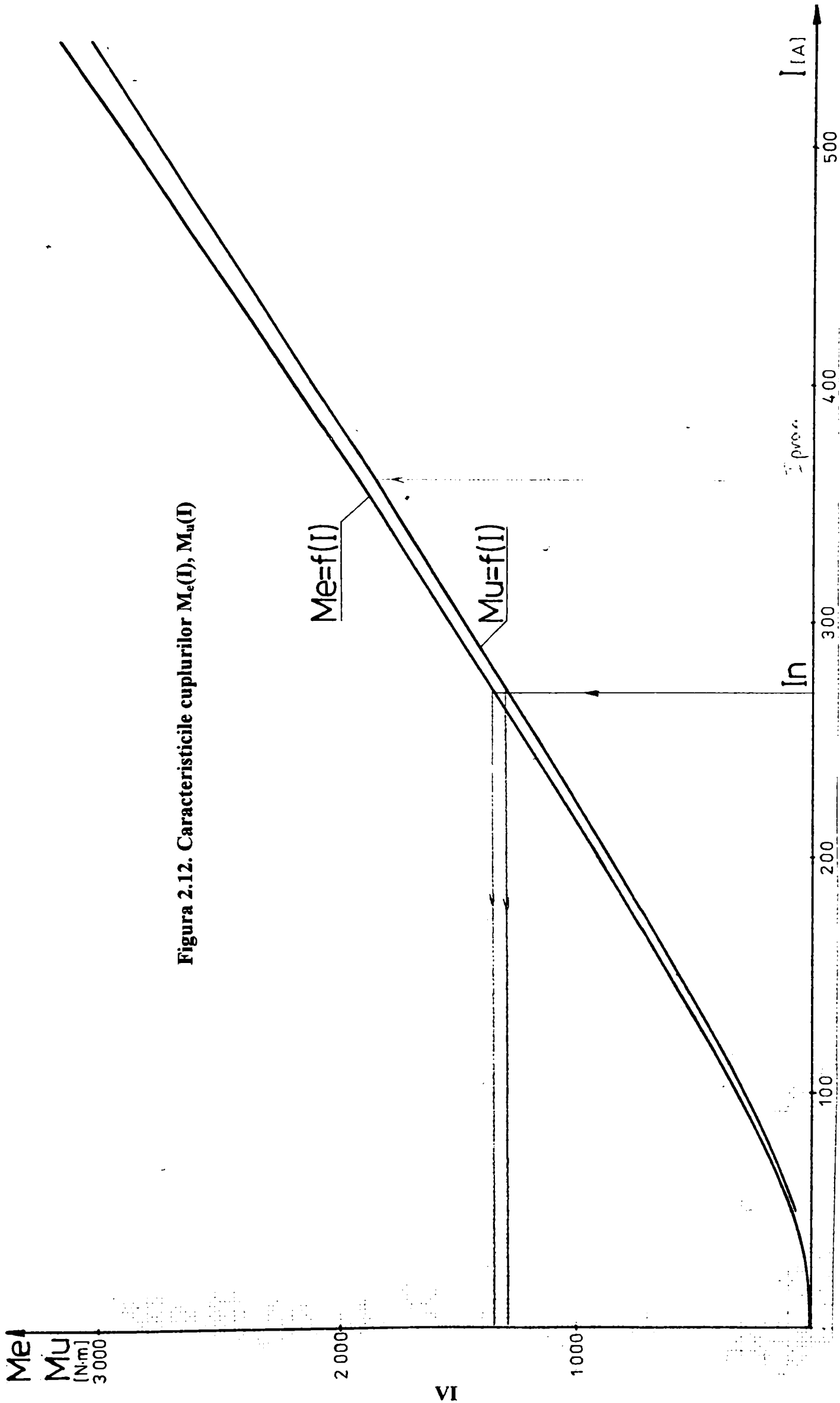


Figura 2.12. Caracteristicile cuplurilor $M_e(I)$, $M_u(I)$

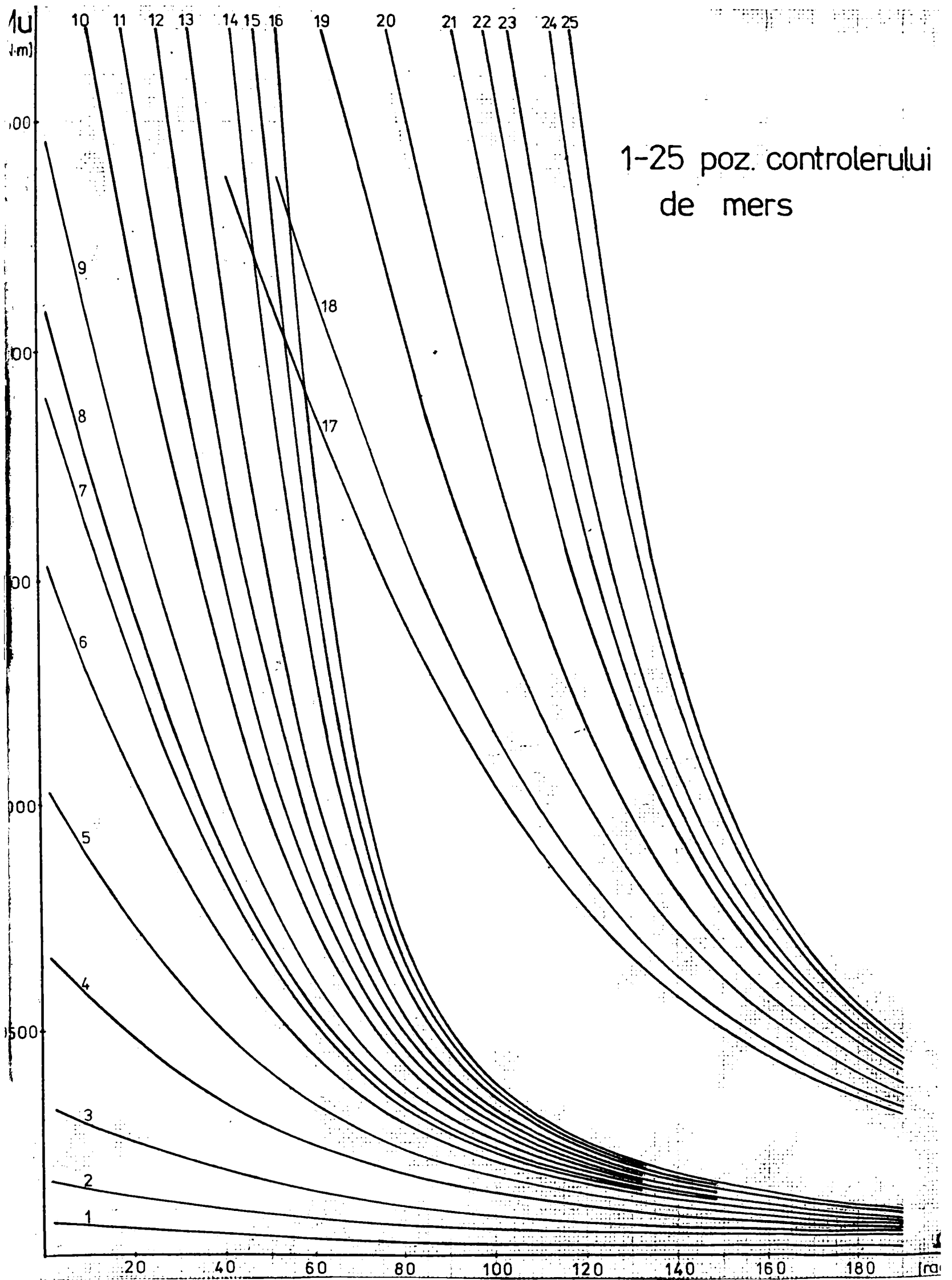
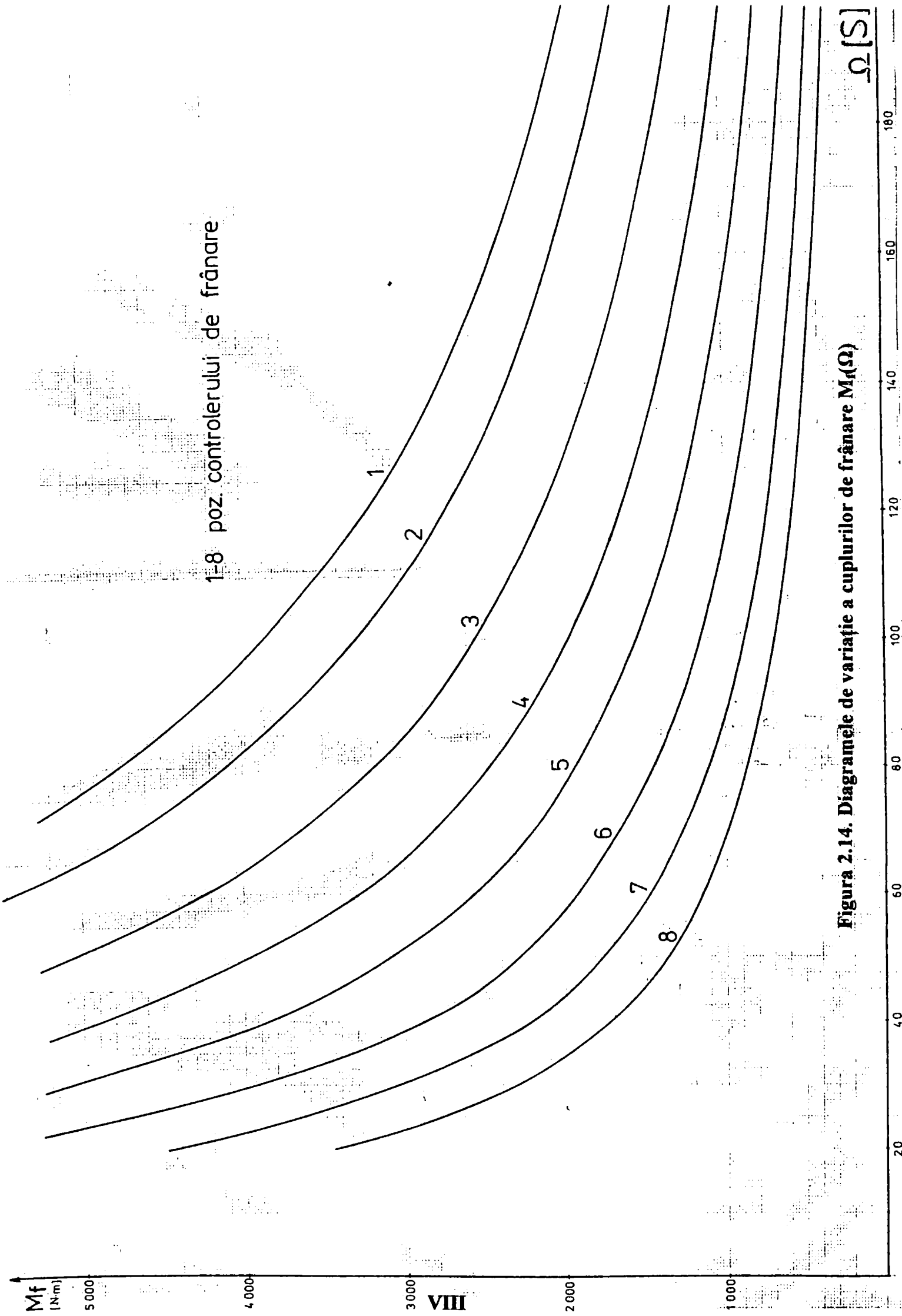


Figura 2.13. Caracteristicile mecanice $M_n(\Omega)$
VII



1-8 poz. controlerului de frânare

Figura 2.14. Diagramele de variație a cuplurilor de frânare $M_f(\Omega)$

ANEXA II

Caracteristicile vehiculelor de tracțiune fabricate de firma ABB

A). Vehicule acționate cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei cu VTC

a).

1 - Beneficiar	STADTWERKE KARLSRUHE;
2 - Bucăți	10;
3 - Anul de fabricație	1991;
4 - Fabricat partea mecanică	DUEWAG;
5 - Lungime / Lățime	37160 mm/2450 mm;
6 - Ecartament / Raport de transmitere	1435 mm/1:5,11;
7 - Locuri pe scaune / în picioare	101/248 (8 pasageri/m ²);
8 - Tară / Sarcină	58t/74,8t,
9 - Tipul motorului de tracțiune	Gbd 280;
10 - Caracteristici MT (Tensiune, putere, curent, turație)	750V/245kW/350A/1720 min ⁻¹ ;
11 - Controler	chopper;
12 - Sistem de comandă	control electronic;
13 - Frână adițională	frână cu resort, patină pe șină

b).

1 - Beneficiar	DUISBURGER;
2 - Bucăți	15;
3 - Anul de fabricație	1991-1992;
4 - Fabricat partea mecanică	DUEWAG;
5 - Lungime/Lățime	25640 mm/2200 mm;
6 - Ecartament/Raport de transmitere	1435 mm/1:5,36;
7 - Locuri pe scaune/în picioare	50+1/152 (8 pasageri/m ²);
8 - Tară/Sarcină	29,5t/38,75t;
9 - Tipul motorului de tracțiune	1KB2021-MK02;
10 - Caracteristici MT (Tensiune, putere, curent, turație)	750V/185kW/287A/1500 min ⁻¹ ;
11 - Controler	chopper
12 - Sistem de comandă	control electronic
13 - Frână adițională	frână cu resort, patină pe șină.

c).

1 - Beneficiar	ATM Torino;
2 - Bucăți	54;
3 - Anul de fabricație	1991-1992;
4 - Fabricat partea mecanică	FIAT FERROVIARA/OMS
5 - Lungime/Lățime	2200 mm/2300 mm;

6 - Ecartament	1435 mm;
7 - Locuri pe scaune/ în picioare	51/180;
8 - Tară/Sarcină	30t/42t;
9 - Tipul motorului de tracțiune	4 ELO 2245;
10 - Caracteristici MT (Tensiune, putere, curent, turație)	540V/150kW/229A/1630 min ⁻¹ ;
11 - Controler	chopper cu GTO;
12 - Sistem de comandă	control electronic;
13 - Frână adițională	Frână electropneumatică și electrică cu recuper.

d).

1 - Beneficiar	DORTMUNDER;
2 - Bucăți	34;
3 - Anul de fabricație	1991-1993;
4 - Fabricat partea mecanică	DUEWAG;
5 - Lungime/Lățime	26850 mm/2650 mm;
6 - Ecartament/Raport de transmitere	1435 mm/1:5,625;
7 - Locuri pe scaune/în picioare	72/196;
8 - Tară/Sarcină	37,3t/57,5t;
9 - Tipul motorului de tracțiune	CUSC 5668 b1;
10 - Caracteristici MT (Tensiune, putere, curent, turație)	750V/222kW/425A/1436 min ⁻¹ ;
11 - Controler	chopper;
12 - Sistem de comandă	MICAS-C - unicat de control vagon;
13 - Frână adițională	frână cu resort cu patină.

e).

1 - Beneficiar	KARLSRUHE;
2 - Bucăți	10;
3 - Anul de fabricație	1992;
4 - Fabricat partea mecanică	DUEWAG;
5 - Lungime/Lățime	37370 mm/2650 mm;
6 - Ecartament	1435 mm;
7 - Locuri pe scaune/în picioare	118/248 (8 pasageri/m ²);
8 - Tară/Sarcină	51t/69,1t;
9 - Tipul motorului de tracțiune	Gbd 280;
10 - Caracteristici MT (Tensiune, putere, curent, turație)	750V/245kW/350A/1720 min ⁻¹ ;
11 - Controler	chopper;
12 - Sistem de comandă	control electronic;
13 - Frână adițională	frână cu resort, cu patină.

f).

1 - Beneficiar	STUTTGART;
2 - Bucăți	12;
3 - Anul de fabricație	1992-1993;

4 - Fabricat partea mecanică	DUEWAG;
5 - Lungime/Lăţime	37640 mm/2650 mm;
6 - Ecartament/Raport de transmitere	1435 mm/1:5,625;
7 - Locuri pe scaune/în picioare	110/248 (8 pasageri/m ²);
8 - Tară/Sarcină	52,2t/78,5t;
9 - Tipul motorului de tracţiune	CUSC 5668 b1;
10 - Caracteristici MT (Tensiune, putere, curent, turaţie)	750V/245kW/360A/1370 min ⁻¹ ;
11 - Controler	chopper (răcire cu evaporator);
12 - Sistem de comandă	control electric cu microprocesor;
13 - Frână adiţională	frână cu resort, cu patină.

g).

1 - Beneficiar	KARLSRUHE;
2 - Bucăţi	20;
3 - Anul de fabricaţie	1994;
4 - Fabricat partea mecanică	DUEWAG;
5 - Lungime/Lăţime	37610 mm/2650 mm;
6 - Ecartament/Raport de transmitere	1435 mm/1:5,11;
7 - Locuri pe scaune/în picioare	101/248 (8 pasageri/m ²);
8 - Tară/Sarcină	58t/74,8t;
9 - Tipul motorului de tracţiune	Gbd 280;
10 - Caracteristici MT (Tensiune, putere, curent, turaţie)	750V/245kW/350A/1720 min ⁻¹ ;
11 - Controler	chopper;
12 - Sistem de comandă	control electronic;
13 - Frână adiţională	frână cu resort, cu patină.

B). Vehicule acţionate cu maşina de curent alternativ trifazat asincronă şi reglarea vitezei cu invertoare

a).

1 - Beneficiar	BALTIMORE
2 - Bucăţi	3;
3 - Anul de fabricaţie	1991;
4 - Fabricat partea mecanică	ABB;
5 - Lungime/Lăţime	28975 mm/2898 mm;
6 - Ecartament	1435 mm;
7 - Locuri pe scaune/în picioare	84/177;
8 - Tară/Sarcină	48,1t/65t;
9 - Tipul motorului de tracţiune	motor de curent alternativ;
10 - Caracteristici MT (putere)	4x160 kW;
11 - Controler	invertor VVVF cu GTO;
12 - Sistem de comandă	comandă electrică;
13 - Frână adiţională	frână cu resort, cu patină.

b).

1 - Beneficiar	FREIBURG;
2 - Bucăți	16;
3 - Anul de fabricație	1993;
4 - Fabricat partea mecanică	DUEWAG;
5 - Lungime/Lățime	33090 mm/2300 mm;
6 - Ecartament/Raport de transmitere	1000 mm/1:8,181;
7 - Locuri pe scaune/în picioare	85/121;
8 - Tară/Sarcină	38,5t/59,9t;
9 - Tipul motorului de tracțiune	4WxA răcite cu apă ;
10 - Caracteristici MT (Tensiune, putere, curent, turație)	355V/65kW/145A/2004 min ⁻¹ ;
11 - Controler	invertor cu tranzistori (răciți cu apă);
12 - Sistem de comandă	control electronic (MICAS -S);
13 - Frână adițională	frână cu resort, cu patină.

c).

1 - Beneficiar	MANHEIN
2 - Bucăți	50;
3 - Anul de fabricație	1993-1995;
4 - Fabricat partea mecanică	DUEWAG;
5 - Lungime/Lățime	29200 mm/2400 mm;
6 - Ecartament	1000 mm;
7 - Locuri pe scaune/în picioare	86/153;
8 - Tară/Sarcină	31,5t/50,1t;
9 - Tipul motorului de tracțiune	4WxA 2544;
10 - Caracteristici MT (putere, curent, turație)	95kW/200A/5922min ⁻¹ ;
11 - Controler	invertor cu tranzistori;
12 - Sistem de comandă	control electronic;
13 - Frână adițională	frână cu resort, cu patină.

d).

1 - Beneficiar	KARLSRUHE;
2 - Bucăți	20;
3 - Anul de fabricație	1995;
4 - Fabricat partea mecanică	DUEWAG;
5 - Lungime/Lățime	29155 mm/2650 mm;
6 - Ecartament/Raport de transmitere	1435 mm/1:7,25;
7 - Locuri pe scaune/în picioare	90/200;
8 - Tară/Sarcină	34t/53,5t;
9 - Tipul motorului de tracțiune	4WxA 2557;
10 - Caracteristici MT (putere, turație)	125kW/2008 min ⁻¹ ;
11 - Controler	invertor cu tranzistori;
12 - Sistem de comandă	Control electronic (MICAS-S);
13 - Frână adițională	frână cu resort, cu patină.

ANEXA III. Specificația de echipament folosită

la realizarea standului pentru încercări experimentale

Elementele principale din schema electrică de forță și de comandă a standului împreună cu simbolul, caracteristicile tehnice, tipul, codul, furnizorul și numărul de bucăți sunt date în tabelul următor.

Nr. Cr.	SIMBOL	DENU-MIREA	CARACTERISTICI TEHNICE	TIP COD	FURNIZOR	Buc
1.	QL, QL-1	Intrerupător automat ultrarapid	-bidirecțional, monopolar - $U_N = 1500$ Vcc; - $I_N = 500$ A; - $I_r = 450$ A; -27 kA capacitate de rupere la $t = 15$ ms - $t_{deschidere} = 2,5$ ms la viteza de creștere a curentului de 2×10^6 A/s -durata viața mecanică 5×10^6 acț. - $U_{bob} = 24$ Vcc ^{+25%/-30%} -in carcasa de protecție	UR4-E24D 1B40E30TD P00	ICPE București	2
2.	KL, KM2 KF1, KF2 KE1 KE2 KL-1 KM2-1 KF1-1 KF2-1 KE1-1 KE2-1	Contactor	-monopolar, bidirecțional, $I_N = 350$ A la $U_n = 750$ Vcc, -600 A capacitate rupere la 750 Vcc, - $U_{N\ bob} = 24$ Vcc. - 5×10^6 acționari durată de viața mecanică - 5×10^5 acționari durată de viața electrică. - CEI 77	LTHS320/1p	Micro-electrica Științifică	12
3	KM1 KM1-1	Contactor	-bipolar, bidirecțional, $I_N = 350$ A la $U_N = 750$ Vcc, -600 A capacitate rupere la 750V - $U_{N\ bobina} = 24$ Vcc ^{+25%/-30%} - 5×10^6 acț. durată viață mecanică - 5×10^6 acț. durată viață electrică -CEI 77	LTHS320/2p	Micro-electrica Științifică	2
4	KR, KP, K1, K2, K3, KR-1 KP-1	Contactor	-monopolar, unidirecțional, $I_N = 80$ A, - $U_{N\ bob} = 24$ Vcc ^{+25%/-30%} - 5×10^6 durată de viață mecanică - 5×10^6 durată de viață electrică	LTHS60/1p	Micro-electrica Științifică	7
5	F2, F2-1	Soclu pentru siguranțe tubulare	- $I_N = 63$ A, $U_N = 1500$ Vcc. -marime d.22 x 127 -cu contact de semnalizare -pt.tractiune electrică	SF1100/96	SC Electroceramica Timișoara	2
6	F2, F2-1	Element inlocuire ultrarapid cu percutor	-D.22 x 126 - $U_N = 1200$ Vcc. - $I_N = 63$ A		ICPE Laborator 30	2
7	F1, F1-1	Element fuzibil cu contact de semnaliz.	- $U_N = 1200$ Vcc. - $I_N = 315$ A		ICPE Laborator 30	2

8	RF	Rezistență frânare	RF = 2,4 ohmi		ICPE-SAERP București	1
9	R _{a1} , R _{a1-1} , R _{a2-1}	Rezistență adițională frânare	R _{a1} = 1,2 ohmi, R _{a2} = 0,6 ohmi		ICPE-SAERP București	2
10	RP, RP-1	Rezistența protecție încărcare	-100 ohmi / 250 W	BGR 6250	ICEP Curtea d Argeș	2
11	2u-VTC	Variator de tensiune continua	- U _N = 750 Vcc. ^{+25%/-30%} - tensiune blocare 450 Vcc. - I _N = 220 A - curent pornire : max 440 A - f = 400 Hz. ^{+5%/-5%} - ondulație rotor : I < 15% U _{N comanda} = 24 Vcc. ^{+25%/-30%}	VTC -G -220 FR 750, Sf 17 / 96	ICPE SAERP București	1
12	VTC-F	Variator tensiune continua pentru frânare	-U _N = 600 Vcc. ^{+25%/-30%} - tensiune blocare 400 Vcc. -I _N = 280 A - curent pornire : max 400 A - f = 350 Hz. ^{+5%/-5%}		Gantz Ansaldo	1
13	UP, UP-1	Sursa de preexcitare	- U ₁ = 24 Vcc. - DA 25% - U _{izolare} = 1200 Vcc. - U _e = 1,5 V; I _e = 120 A ptr. 5s	SPT-02 SF21/96	ICPE SAERP București	2
14	LM, LM-1	Inductanța filtru motor	3,7 mH ^{+/-10%} ; U _{iz} = 1000 V, I _N = 220 A; DA 100%	SF19/96	ICPE SAERP București	2
15	LR, LR-1	Inductanța filtru rețea	1,4 mH ^{+/-10%} ; U _{iz} = 1200 V, I _N = 220 A; DA = 100%	SF 20/96	ICPE SAERP București	2
16	TTR, TTR-1	Traductor tensiune rețea	-U _N = + / - 15 Vcc. -I _{allim} = 0,8 A, U ₁ = max 1000 Vcc -tensiune de prag: 450-500 Vcc	TTR, SF 22/96	ICPE SAERP București	2
17	CF, CF-1	Condensator filtru rețea	3 mF / 1100 Vef ; DA 100% 4,1 Kohmi / 500 W	SF 23/96	ICPE SAERP București	2
18	R _{e1} , R _{e2} , R _{p-1} , R _{e1-1} , R _{e2-1}	Rezistența slabire câmp și protecție	-R _p = 0,035 ohmi / 110 A -R _{e1} = 0,35 ohmi / 110 A -R _{e2} = 0,27 ohmi / 110 A		ICPE SAERP București	2
19	MT, GF	Motor tractiune	serviciu S1, P _N = 150 kW, U _N = 750Vcc, n _m = 2100 rot / min -cuplu N = 680 Nm -U _{max} = 900 Vcc, U _{min} = 525 Vcc -n _{max} = 3600 rot/min, I _{rmax} = 440A -cuplu max = 1600 Nm -grad excitație = min 0,4; -U _{max.gen} = 1300 Vcc	tip TN-96A SF 32/96	UMEB București	2
20	-	Conductoare	-clasa 3kV, din PVC, -ptr. tractiune electrica conform UIC 8950 R, -foarte flexibile	BIIC 3000	Anglia	

21	a1	Bateriile de acumulare	-12 V _{cc} -110 Ah	Acumulatorul		2
22	Kb	Contactator conectare tensiune de comandă	-U _{bob} = 24 V -I _N = 160 A			1
23	U3	Convertizor static	-U _{iN} =750 V _{cc} ^{+25%/-30} , I _{imax} =25 A -U _{eN} =3x380 V ^{+/-10%} , P _{3N} =7 Kw -f _N =50 Hz +/-1Hz -U _{eN} =26-28 V _{cc} , I _N =70 A, -limitare curent baterie 10-30A -asigura pornirea in sarcina a masinilor asincrone	CS-11T, SF 16/96	ICPE SAERP Bucuresti	1
24	Fî, Fc	Soclu siguranță și patron	U _N = 440 V _{cc} , I _N = 160 A, caracteristică rapidă	SIST 201, NT00	IAEI Titu	2
25	Q1-Q11 Q1,11 Q4,5,6 Q2,3,9 Q7,10 Q8	Siguranță automată monopolară	- cu contact auxiliar de semnalizare - caracteristică K - U _N = 24 V _{cc} , - I _r = 4 A - I _r = 6 A - I _r = 10A - I _r = 16 A - I _r = 25 A		ABB	2 3 4 1 1
26	AP	Automat programabil cu microprocesor	-U _N = 24 V _{cc} -P _N = 150 W -optocuploare pe intrări digitale -autotest -diagnoză -memorie nevolatilă	RTC 101	Gantz Ansaldo	1
27	KA1	Contactator de comandă	-4 contacte ND -U _{bob} = 24 V _{cc} -I _N = 4 A -durata de viață electrică la T=15msecs de 2,5x10 ⁶ acționări	LP4K09BW3	Telemecanique. Electro-total București	1
28	KA2	Contactator de comandă	-3 contacte ND + 1 contact NÎ -U _{bob} = 24 V _{cc} -I _N = 4 A -durata de viață electrică la T=15msecs de 2,5x10 ⁶ acționări.	LP31K09 BW3	Telemecanique. Electro-total București.	1
29	Kat1	Releu de timp MET 13-3	-U _N = 24 V _{cc} -I _N = 6 A -domeniu de temporizare la acționare 0,3-3s	RS74785 BAA	Electromagnetica București	1
30	RQL	Rezistență protecție	-24 ohmi / 150 W	BGR 6140	ICEP Curtea de Argeș	1
31	KMS	Releu metrou stop	U _N = 24 V -I _N = 6 A	RI 13	Electro- aparataj București	1
32	H1,H2,H3 H4,H5	Lămpi de semnaliza-	-U _N = 24 V _{cc} -I _N = 2A	LC-5	Electro- far	8

	H6,H7,H8	re			Timișoara	
33	Sd	Buton declanșare IAR	-U _N = 24 Vcc 1NÎ+1ND -I _N = 10A	G25	Electrotehnica București	1
34	Sa	Buton anclanșare IAR	-U _N = 24 Vcc 1NÎ+1ND -I _N = 10A	G25	Electrotehnica București	1
35	U4	Indicator de viteză	-U _N = 24 Vcc		Gantz Ansaldo	1
36	U5	Indicator ore funcționare	-U _N = 24 Vcc		Gantz Ansaldo	1
37	U6	Taductor inductiv tracțiune	-U _N = 24 Vcc -I _{MAX IEȘIRE} = 5 mA		Gantz Ansaldo	1
38	U7	Taductor inductiv frânare	-U _N = 24 Vcc -I _{MAX IEȘIRE} = 5 mA		Gantz Ansaldo	1
39	U8	Taductor inductiv izolație străpunsă	-U _N = 24 Vcc -I _{MAX IEȘIRE} = 60 mA		Gantz Ansaldo	1
40	U9	Traductor turație	-U _N = 24 Vcc -I _{MAX IEȘIRE} = 5 mA		Electrocontact Buzău	1
41	Sî	Comutator încălzire	-U _N = 24 Vcc -I _N = 6 A	C16	Electrocontact Buzău	1
42	mî	Motor încălzire	-U _N = 24 Vcc -I _N = 10 A		Gantz Ansaldo	1
43	S1i,S2i, S3i,S4i	Buton comandă	-U _N = 24 Vcc 1NÎ+1ND -I _N = 10A	G25	Electrocontact Buzău	4
44	SUi	Limitatoare uși	-U _N = 24 V - I _N = 6A		Electrocontact Buzău	12
45	2Ui	Sigurante automate tripolare	- U _N = 24 V I _r = 16A - Cu contact de semnalizare - Caracteristică K		ABB	1
46	3Ui	Protecție termică încălzitoare	-U _N = 24 V -I _N = 10 A -T _r = 115° C		Gantz Ansaldo	1
47	4Ui	Protecție termică MT	-U _N = 24 V -I _N = 10 A -T _r = 135° C		Gantz Ansaldo	1
48	5Ui	Protecție termică serv.aux.	-U _N = 24 V -I _N = 10 A -T _r = 125° C		Gantz Ansaldo	1

ANEXA IV. Măsurătorile experimentale

BLEK-BOX DATA TABEL CU VALORI MASURATE IN TIMP

Curent maneta acceleratie, Curent maneta deceleratie, Curent referinta motor, Curent motor, Tensiunea filtrului retea, Viteza vehiculului Cod SRC comandus, SRC status

DATE: 97/05/11 TIME: 11:47 IDENTIFIER:

Timebase [ms]: 50.0

t[ms]:50	ia[μA]	Id{μA]	Im ref[A]	Im[A]	Uf{V]	v{Km/h)x100	Cod SRC _c	Cod SRC _s
0	2954	401	214	226	775	1380	11	0
1	2954	410	214	211	781	1399	11	0
2	2964	410	214	209	782	1419	11	0
3	3101	410	215	218	775	1439	11	0
4	3140	410	216	218	774	1449	11	0
5	3082	401	222	219	785	1468	11	0
6	2827	410	206	223	770	1488	11	0
7	2338	410	178	209	784	1518	11	0
8	1585	410	120	181	784	1537	11	0
9	1135	410	83	129	791	1547	11	0
10	978	410	72	87	796	1557	11	0
11	988	410	73	77	798	1567	11	0
12	988	410	73	73	788	1587	11	0
13	988	410	68	72	793	1587	11	0
14	988	410	77	71	790	1606	11	0
15	988	410	68	77	794	1606	11	0
16	988	401	77	69	789	1616	11	0
17	988	410	73	80	789	1606	11	0
18	978	401	73	77	788	1616	11	0
19	949	410	69	75	796	1616	11	0
20	772	401	49	70	789	1616	11	0
21	401	410	0	53	794	1626	10	0
22	401	410	0	0	831	1626	10	0
23	401	401	0	0	840	1626	10	0
24	401	401	0	0	844	1616	10	0
25	401	401	0	0	846	1626	10	0
26	401	401	0	0	848	1626	10	0
27	401	567	0	0	848	1626	10	0
28	401	998	10	0	849	1626	10	0
29	401	1761	20	0	849	1636	10	0
30	401	2142	26	0	849	1636	10	0
31	401	2299	36	0	850	1626	10	0
32	401	2387	43	0	850	1616	10	0
33	401	2573	50	0	850	1616	30	0
34	401	2778	55	0	850	1616	32	0
35	401	2925	55	1	821	1616	32	10
36	401	2935	55	4	802	1606	32	10
37	401	2935	52	10	808	1616	32	10
38	401	2935	51	38	820	1606	32	10
39	401	2935	52	44	810	1596	32	10
40	401	2935	59	46	812	1596	32	10
41	401	2935	69	60	821	1587	32	10
42	401	2994	76	68	801	1587	32	10
43	401	3033	86	71	817	1577	32	10
44	401	3043	93	81	810	1577	32	10

45	401	3033	103	79	816	1557	32	10
46	401	3043	105	87	813	1547	32	10
47	401	3033	112	91	816	1527	32	10
48	401	3033	114	97	813	1518	12	10
49	401	3033	121	91	815	1498	12	10
50	401	3033	123	90	810	1478	12	10
51	401	3033	125	81	815	1468	212	10
52	401	3033	100	78	812	1449	212	10
53	401	3033	100	75	815	1429	212	10
54	401	3033	136	102	810	1399	292	10
55	401	3033	133	142	818	1380	292	10
56	401	3033	135	132	813	1350	292	10
57	401	3033	132	129	818	1320	292	10
58	401	3033	129	132	810	1291	292	10
59	401	3033	126	124	816	1271	292	10
60	401	3033	128	129	809	1242	292	10
61	401	3033	125	125	816	1222	292	10
62	401	3033	127	126	810	1192	292	10
63	401	3033	124	131	814	1163	292	10
64	401	3033	121	128	809	1143	292	10
65	401	3033	123	121	814	1113	292	10
66	401	3033	120	121	810	1084	292	10
67	401	3033	117	120	828	1054	292	10
68	401	3033	114	120	817	1035	292	10
69	401	3033	116	115	809	995	292	10
70	401	3033	108	117	813	975	292	10
71	401	3013	110	102	818	936	292	10
72	401	2935	102	108	815	906	292	10
73	401	2915	99	97	816	877	292	10
74	401	2925	96	94	813	847	292	10
75	401	2915	93	84	816	818	292	10
76	401	2915	90	72	813	798	292	10
77	401	2925	92	64	814	266	292	10
78	401	2925	89	54	824	729	292	10
79	401	2915	81	46	813	709	292	10
80	401	2925	83	38	822	680	292	10
81	401	2925	80	31	825	660	292	10
82	401	2915	82	24	812	640	292	10
83	401	2906	84	21	818	630	292	10
84	401	2876	91	18	818	601	292	10
85	401	2876	88	15	826	581	292	10
86	401	2876	90	13	812	571	292	10
87	401	2876	97	11	813	552	292	10
88	401	2876	99	10	821	542	292	10
89	401	2876	106	9	823	532	292	10
90	401	2906	113	7	810	512	292	10
91	401	2964	115	5	815	492	292	10
92	401	3003	0	5	810	483	90	10
93	401	3013	0	0	838	463	10	0
94	401	3033	0	0	845	463	10	0
95	401	3033	0	0	847	453	10	0
96	401	3043	0	0	848	433	10	0
97	401	3052	0	0	849	433	10	0
98	401	3043	0	0	849	414	10	0
99	401	3043	0	0	850	394	10	0
100	401	3043	0	0	850	394	10	0
101	401	3052	0	0	850	394	10	0
102	401	3052	0	0	850	364	10	0
103	401	3043	0	0	850	364	10	0
104	401	3043	0	0	850	335	10	0

105	401	3052	0	0	850	325	10	0
106	401	3052	0	0	850	315	10	0
107	401	3052	0	0	850	295	10	0
108	401	3043	0	0	850	285	10	0
109	401	3043	0	0	850	276	10	0
110	401	3043	0	0	850	266	10	0
111	401	3043	0	0	850	236	10	0
112	401	3043	0	0	850	236	10	0
113	401	3043	0	0	850	216	10	0
114	401	3043	0	0	850	216	10	0
115	401	3043	0	0	850	207	10	0
116	401	3043	0	0	850	187	10	0
117	401	3043	0	0	850	177	10	0
118	401	3043	0	0	850	167	10	0
119	401	3043	0	0	850	157	10	0
120	401	3043	0	0	852	147	10	0
121	401	3043	0	0	852	138	10	0
122	401	3043	0	0	852	128	10	0
123	401	3043	0	0	852	118	10	0
124	401	3043	0	0	852	98	10	0
125	401	3043	0	0	852	78	10	0
126	401	3043	0	0	852	69	10	0
127	401	3052	0	0	852	59	10	0
128	401	3043	0	0	852	49	10	0
129	401	3043	0	0	852	39	10	0
130	401	3023	0	0	852	19	10	0
131	401	3023	0	0	852	19	10	0
132	401	3023	0	0	852	9	10	0
133	401	3023	0	0	852	0	10	0
134	401	3023	0	0	852	0	10	0
135	401	3023	0	0	852	0	10	0
136	401	3023	0	0	850	0	10	0
137	401	3023	0	0	852	0	10	0
138	401	3023	0	0	850	0	10	0
139	401	3023	0	0	852	0	10	0
140	401	3023	0	0	852	0	10	0
141	401	3023	0	0	852	0	10	0
142	401	3023	0	0	852	0	10	0
143	401	3003	0	0	852	0	10	0
144	401	2994	0	0	852	0	10	0
145	401	2984	0	0	852	0	10	0
146	401	2974	0	0	850	0	10	0
147	401	2964	0	0	852	0	10	0
148	401	2906	0	0	852	0	10	0
149	401	2847	0	0	852	0	10	0
150	401	2818	0	0	852	0	10	0
151	401	2818	0	0	852	0	10	0
152	401	2818	0	0	852	0	10	0
153	401	2818	0	0	852	0	10	0
154	401	2778	0	0	852	0	10	0
155	401	2749	0	0	852	0	10	0
156	401	2710	0	0	852	0	10	0
157	401	2671	0	0	852	0	10	0
158	401	2641	0	0	852	0	10	0
159	401	2573	0	0	850	0	10	0
160	401	2416	0	0	850	0	10	0
161	401	2221	0	0	850	0	10	0
162	401	2103	0	0	850	0	10	0
163	401	1986	0	0	850	0	10	0
164	401	1849	0	0	850	0	10	0

165	401	1790	0	0	852	0	10	0
166	401	1604	0	0	852	0	10	0
167	401	1066	0	0	852	0	10	0
168	401	410	0	0	852	0	10	0
169	401	401	0	0	852	0	10	0
170	401	410	0	0	852	0	10	0
171	401	401	0	0	852	0	10	0
172	401	401	0	0	852	0	10	0
173	401	410	0	0	852	0	10	0
174	401	410	0	0	853	0	10	0
175	401	410	0	0	853	0	10	0
176	401	401	0	0	853	0	10	0
177	401	410	0	0	853	0	10	0
178	401	401	0	0	853	0	10	0
179	401	401	0	0	853	0	10	0
180	401	401	0	0	853	0	10	0
181	401	410	0	0	853	0	10	0
182	401	401	0	0	853	0	10	0
183	401	410	0	0	853	0	10	0
184	401	401	0	0	852	0	10	0
185	401	410	0	0	853	0	10	0
186	401	401	0	0	853	0	10	0
187	401	410	0	0	853	0	10	0
188	401	410	0	0	853	0	10	0
189	401	401	0	0	853	0	10	0
190	401	401	0	0	853	0	10	0
191	401	410	0	0	853	0	10	0
192	401	401	0	0	853	0	10	0
193	401	401	0	0	852	0	10	0
194	401	410	0	0	852	0	10	0
195	401	410	0	0	852	0	10	0
196	401	401	0	0	852	0	10	0
197	401	410	0	0	852	0	10	0
198	401	410	0	0	852	0	10	0
199	401	401	0	0	852	0	10	0
200	401	410	0	0	852	0	10	0
201	401	410	0	0	852	0	10	0
202	401	410	0	0	853	0	10	0
203	401	410	0	0	853	0	10	0
204	401	401	0	0	852	0	10	0
205	401	410	0	0	852	0	10	0
206	401	401	0	0	852	0	10	0
207	401	410	0	0	852	0	10	0
208	401	401	0	0	852	0	10	0
209	401	410	0	0	852	0	10	0
210	401	410	0	0	852	0	10	0
211	401	401	0	0	852	0	10	0
212	401	401	0	0	852	0	10	0
213	401	410	0	0	852	0	10	0
214	401	401	0	0	850	0	10	0
215	401	410	0	0	850	0	10	0
216	401	410	0	0	850	0	10	0
217	401	410	0	0	850	0	10	0
218	401	410	0	0	850	0	10	0
219	401	401	0	0	850	0	10	0
220	401	401	0	0	850	0	10	0
221	401	410	0	0	850	0	10	0
222	401	401	0	0	850	0	10	0
223	401	401	0	0	850	0	10	0
224	401	401	0	0	850	0	10	0

XX

225	401	410	0	0	850	0	10	0
226	401	401	0	0	850	0	10	0
227	401	410	0	0	850	0	10	0
228	401	401	0	0	850	0	10	0
229	401	410	0	0	850	0	10	0
230	401	410	0	0	850	0	10	0
231	459	410	0	0	850	0	10	0
232	587	410	0	0	849	0	10	0
233	782	410	0	0	849	0	10	0
234	958	401	10	0	849	0	10	0
235	1125	410	20	0	849	0	10	0
236	1350	401	30	0	849	0	10	0
237	1526	410	40	0	848	0	10	0
238	1673	410	50	0	848	0	10	0
239	1810	410	60	0	848	0	10	0
240	1976	410	70	0	848	0	11	0
241	2103	410	80	120	797	0	11	0
242	2211	401	90	118	804	0	11	0
243	2289	410	100	132	799	0	11	0
244	2328	410	110	134	802	0	11	0
245	2358	410	120	157	794	0	11	0
246	2397	401	130	138	804	0	11	0
247	2455	410	140	179	788	0	11	0
248	2534	410	150	170	792	0	11	0
249	2583	401	160	176	799	9	11	0
250	2592	401	166	182	793	9	11	0
251	2592	401	176	209	769	19	11	0
252	2583	410	182	188	799	19	11	0
253	2671	410	192	204	782	29	11	0
254	2749	401	198	237	774	39	11	0
255	2896	401	204	216	773	59	11	0
256	3101	410	205	208	771	69	11	0
257	3307	410	211	201	783	78	11	0
258	3493	410	217	209	776	98	11	0
259	3659	410	218	216	781	108	11	0
260	3786	401	224	217	775	128	11	0
261	3864	410	225	224	785	138	11	0
262	3913	410	231	227	758	167	11	0
263	3972	410	227	218	782	187	11	0
264	4060	410	228	234	789	207	11	0
265	4217	410	229	233	790	216	11	0
266	4393	410	235	229	781	246	11	0
267	4520	410	231	238	775	266	11	0
268	4530	410	232	226	774	285	11	0
269	4530	410	233	237	778	305	11	0
270	4530	401	234	230	775	325	11	0
271	4530	410	235	221	780	345	11	0
272	4530	410	236	239	773	364	11	0
273	4540	401	237	240	776	374	11	0
274	4628	410	243	228	771	404	11	0
275	4745	410	239	246	790	414	11	0
276	4833	410	245	227	773	433	11	0
277	4892	410	246	236	781	463	11	0
278	4951	410	242	245	775	483	11	0
279	4990	410	243	247	786	502	11	0
280	4990	410	244	240	784	522	11	0
281	4990	410	245	242	784	542	11	0
282	4990	410	246	246	780	561	11	0
283	5000	410	247	237	786	591	11	0
284	5019	410	243	243	786	601	11	0

285	5058	410	249	239	782	630	11	0
286	5078	410	245	246	781	650	11	0
287	5097	410	246	248	784	670	11	0
288	5097	410	247	249	778	690	11	0
289	5097	410	248	241	790	709	11	0
290	5107	410	249	248	783	739	11	0
291	5117	410	245	249	788	768	11	0
292	5117	410	241	245	780	778	11	0
293	5117	410	247	250	778	808	11	0
294	5117	410	243	241	775	828	11	0
295	5117	410	244	249	778	857	11	0
296	5107	410	240	237	783	867	11	0
297	5107	410	246	235	792	897	11	0
298	5107	410	242	240	788	916	11	0
299	5107	410	243	249	777	946	11	0
300	5107	410	239	238	781	956	11	0
301	5107	410	245	239	791	975	11	0
302	5107	401	246	244	778	1005	11	0
303	5107	410	242	249	782	1025	11	0
304	5117	410	243	241	788	1044	11	0
305	5136	410	244	244	788	1064	11	0
306	5176	401	245	237	778	1094	11	0
307	5215	410	241	238	778	1113	11	0
308	5234	401	242	236	784	1133	11	0
309	5234	410	243	235	786	1153	11	0
310	5234	410	244	236	793	1182	11	0
311	5234	410	240	260	768	1202	11	0
312	5225	410	241	239	777	1222	11	0
313	5225	410	242	242	782	1242	11	0
314	5215	401	243	235	782	1271	11	0
315	5215	410	239	237	778	1291	11	0
316	5205	401	240	236	776	1320	11	0
317	5185	410	236	242	769	1330	11	0
318	5166	410	242	233	783	1360	11	0
319	5166	410	238	245	776	1380	11	0
320	5156	410	239	234	782	1399	11	0
321	5166	410	240	233	775	1429	11	0
322	5156	410	236	231	775	1449	11	0
323	5166	410	237	240	771	1468	11	0
324	5156	401	238	236	780	1488	11	0
325	5156	410	239	243	771	1508	11	0
326	5156	401	240	246	758	1527	11	0
327	5156	410	241	238	769	1547	11	0
328	5156	401	242	236	767	1567	11	0
329	5166	410	243	246	776	1587	11	0
330	5156	410	244	238	759	1616	11	0
331	5156	410	240	242	780	1636	11	0
332	5156	410	241	229	770	1656	11	0
333	5156	410	242	242	778	1685	11	0
334	5156	401	238	228	775	1705	11	0
335	5156	410	239	235	777	1725	11	0
336	5156	410	240	235	766	1744	11	0
337	5156	401	241	244	763	1774	11	0
338	5156	401	237	233	773	1794	11	0
339	5176	410	238	232	766	1813	11	0
340	5195	410	239	237	759	1833	11	0
341	5195	410	240	236	762	1843	11	0
342	5195	410	246	231	762	1873	11	0
343	5195	410	242	251	758	1892	11	0
344	5195	401	243	239	761	1912	11	0

345	5195	410	244	239	758	1932	11	0
346	5195	410	245	239	762	1961	11	0
347	5195	410	241	244	747	1971	11	0
348	5195	410	247	238	762	2001	11	0
349	5195	410	243	245	763	2030	11	0
350	5185	410	239	237	744	2040	11	0
351	5185	410	245	240	746	2070	11	0
352	5185	401	241	248	742	2089	11	0
353	5185	401	242	240	758	2109	11	0
354	5185	401	243	239	743	2129	11	0
355	5185	401	244	250	743	2158	11	0
356	5185	410	240	249	758	2168	11	0
357	5185	410	246	240	750	2208	11	0
358	5185	410	237	246	747	2218	11	0
359	5185	401	243	243	746	2237	11	0
360	5185	410	244	238	749	2267	11	0
361	5185	401	240	252	738	2287	11	0
362	5185	410	241	251	734	2316	11	0
363	5185	410	237	250	737	2326	11	0
364	5185	401	243	239	737	2356	11	0
365	5185	401	239	240	743	2375	11	0
366	5185	410	240	240	745	2405	11	0
367	5185	401	236	251	751	2415	11	0
368	5185	401	242	241	738	2444	11	0
369	5185	410	238	242	744	2454	11	0
370	5185	410	244	237	744	2484	11	0
371	5195	410	240	249	733	2503	11	0
372	5185	401	241	244	737	2523	11	0
373	5185	410	242	243	733	2553	11	0
374	5185	410	238	238	744	2572	11	0
375	5185	410	239	237	746	2592	11	0
376	5195	410	240	240	742	2602	11	0
377	5185	410	246	243	742	2632	11	0
378	5195	410	242	237	743	2651	11	0
379	5195	410	243	242	743	2681	11	0
380	5185	410	239	239	742	2701	11	0
381	5185	410	240	243	752	2730	11	0
382	5185	410	236	235	739	2740	11	0
383	5185	401	242	233	739	2760	11	0
384	5185	410	243	239	741	2779	11	0
385	5185	410	244	244	734	2809	11	0
386	5185	410	240	239	735	2839	11	0
387	5185	410	236	237	745	2858	11	0
388	5185	410	237	232	746	2878	11	0
389	5185	410	238	238	742	2898	11	0
390	5185	410	239	234	738	2908	11	0
391	5185	410	245	236	744	2927	11	0
392	5185	410	246	233	746	2957	11	0
393	5185	410	242	216	765	2977	11	0
394	5185	401	243	241	745	2996	11	0
395	5185	401	244	220	745	3016	11	0
396	5185	410	245	219	752	3026	11	0
397	5185	410	251	220	751	3046	11	0
398	5185	401	252	217	749	3065	11	0
399	5185	410	253	217	751	3085	11	0
400	5185	410	254	208	751	3115	11	0
401	5185	401	250	211	752	3124	11	0
402	5185	410	256	208	751	3144	11	0
403	5185	401	257	208	752	3154	11	0
404	5185	410	263	206	753	3174	11	0

405	5185	401	284	208	753	3193	11	0
406	5185	401	281	200	753	3213	11	0
407	5195	410	257	202	757	3223	11	0
408	5205	410	260	196	753	3243	11	0
409	5205	410	252	197	757	3262	11	0
410	5205	410	253	227	746	3262	15	0
411	5215	410	283	255	739	3292	15	0
412	5215	410	259	265	737	3302	15	0
413	5215	410	265	263	743	3322	15	0
414	5225	401	266	284	744	3341	15	0
415	5225	410	267	273	733	3351	15	0
416	5225	401	273	267	737	3371	15	0
417	5225	410	274	276	744	3401	15	0
418	5225	401	270	274	744	3410	15	0
419	5225	401	276	271	739	3430	15	0
420	5225	410	277	270	734	3460	15	0
421	5225	410	273	275	744	3470	15	0
422	5225	401	279	276	737	3489	15	0
423	5215	401	280	277	742	3519	15	0
424	5215	410	276	282	747	3529	15	0
425	5215	410	282	272	744	3548	15	0
426	5215	401	283	278	738	3568	15	0
427	5205	410	284	278	741	3578	15	0
428	5205	401	290	280	742	3608	15	0
429	5205	410	286	270	742	3617	15	0
430	5205	410	292	269	745	3637	15	0
431	5205	410	293	270	744	3657	15	0
432	5205	410	294	270	744	3677	15	0
433	5205	410	295	264	742	3686	15	0
434	5205	401	301	266	745	3716	15	0
435	5205	401	297	265	744	3726	15	0
436	5205	410	303	258	747	3746	15	0
437	5205	410	304	261	746	3765	15	0
438	5205	410	305	258	747	3775	15	0
439	5205	410	311	259	747	3795	15	0
440	5205	410	308	254	749	3815	15	0
441	5205	410	308	252	749	3834	15	0
442	5205	410	308	256	749	3854	15	0
443	5205	410	308	253	749	3874	15	0
444	5205	401	308	251	749	3884	15	0
445	5205	410	313	249	749	3903	15	0
446	5205	410	308	247	747	3923	15	0
447	5205	410	308	249	749	3933	15	0
448	5205	401	313	241	749	3953	15	0
449	5205	410	308	245	750	3972	15	0
450	5205	401	308	242	750	3982	15	0
451	5205	401	313	241	752	3992	15	0
452	5205	410	313	240	751	4002	15	0
453	5205	410	313	240	752	4022	15	0
454	5205	401	308	238	751	4031	15	0
455	5205	410	313	234	752	4051	15	0
456	5205	410	308	226	751	4061	15	0
457	5205	401	313	243	753	4081	15	0
458	5205	401	308	233	749	4091	15	0
459	5205	401	313	232	750	4100	15	0
460	5215	401	313	231	749	4120	15	0
461	5215	410	308	234	751	4130	15	0
462	5225	410	313	233	749	4150	15	0
463	5225	410	308	218	751	4160	15	0
464	5225	410	313	238	751	4179	15	0

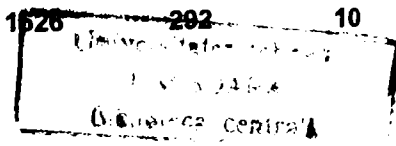
465	5225	410	308	236	752	4189	15	0
466	5225	401	313	216	751	4199	15	0
467	5225	410	313	214	752	4209	15	0
468	5215	401	313	220	754	4229	15	0
469	5215	410	308	222	750	4238	15	0
470	5215	410	313	215	751	4248	15	0
471	5215	410	313	220	747	4258	15	0
472	5215	410	313	219	751	4268	15	0
473	5215	401	313	217	752	4278	15	0
474	5215	410	313	222	752	4288	15	0
475	5215	410	313	221	753	4298	15	0
476	5215	401	313	220	752	4317	15	0
477	5215	410	308	220	754	4327	15	0
478	5215	410	313	213	753	4337	15	0
479	5215	410	313	218	755	4347	15	0
480	5215	410	313	215	752	4357	15	0
481	5205	401	313	216	754	4376	15	0
482	5195	410	308	213	753	4386	15	0
483	5205	410	313	214	757	4396	15	0
484	5195	401	313	214	757	4406	15	0
485	5205	410	313	216	755	4416	15	0
486	5205	410	313	214	755	4416	15	0
487	5205	410	317	210	757	4426	15	0
488	5205	410	313	209	754	4436	15	0
489	5205	410	313	209	757	4455	15	0
490	5205	410	308	205	757	4455	15	0
491	5205	410	317	205	758	4465	15	0
492	5205	410	313	204	755	4485	15	0
493	5205	410	308	207	758	4495	15	0
494	5215	410	313	202	754	4505	15	0
495	5215	410	313	202	754	4514	15	0
496	5215	410	313	200	754	4534	15	0
497	5215	410	308	202	754	4544	15	0
498	5215	401	313	202	752	4554	15	0
499	5215	401	313	199	755	4554	15	0
500	5215	410	317	200	755	4574	15	0
501	5215	410	308	199	750	4583	15	0
502	5215	401	313	194	751	4583	15	0
503	5215	410	317	197	752	4593	15	0
504	5215	410	313	195	749	4603	15	0
505	5215	410	313	194	752	4613	15	0
506	5215	410	313	195	750	4623	15	0
507	5215	410	313	196	751	4633	15	0
508	5215	410	313	192	752	4643	15	0
509	5215	410	313	188	746	4662	15	0
510	5215	410	308	189	746	4662	15	0
511	5215	410	317	190	746	4672	15	0
512	5215	410	313	187	745	4682	15	0
513	5215	410	313	191	747	4692	15	0
514	5215	410	313	189	744	4702	15	0
515	5215	410	313	189	746	4712	15	0
516	5215	410	312	187	744	4712	15	0
517	5215	410	316	189	745	4721	15	0
518	5205	401	311	185	747	4731	15	0
519	5215	401	310	190	745	4731	15	0
520	5215	410	314	186	749	4751	15	0
521	5215	410	303	192	749	4751	15	0
522	5205	401	312	189	749	4761	15	0
523	5205	410	307	188	751	4771	15	0
524	5205	401	306	187	749	4771	15	0

525	5205	401	310	188	750	4781	15	0
526	5205	401	305	187	749	4790	15	0
527	5215	401	304	185	753	4800	15	0
528	5205	401	303	188	750	4800	15	0
529	5215	410	307	187	755	4820	15	0
530	5215	401	296	184	752	4820	15	0
531	5215	401	305	170	761	4830	15	0
532	5205	410	300	182	753	4840	15	0
533	5215	401	299	185	755	4850	15	0
534	5205	410	298	184	753	4859	15	0
535	5205	401	297	187	754	4869	15	0
536	5185	401	296	187	755	4869	15	0
537	5185	401	300	186	755	4879	15	0
538	5185	410	295	185	754	4889	15	0
539	5195	410	294	192	757	4889	15	0
540	5195	410	298	188	757	4899	15	0
541	5195	410	293	198	760	4899	15	0
542	5195	401	297	189	757	4899	15	0
543	5205	410	297	186	757	4899	15	0
544	5205	410	297	176	758	4909	15	0
545	5215	401	292	175	759	4919	15	0
546	5215	401	291	175	760	4929	15	0
547	5215	401	290	182	760	4929	15	0
548	5205	410	294	172	758	4938	15	0
549	5215	410	289	181	761	4938	15	0
550	5215	410	293	172	758	4948	15	0
551	5215	401	288	177	761	4968	15	0
552	5215	401	281	175	759	4978	15	0
553	5215	410	285	179	760	4988	15	0
554	5205	410	284	167	755	4998	15	0
555	5215	410	283	182	760	4998	15	0
556	5205	401	287	176	755	5007	15	0
557	5215	410	283	175	755	5017	15	0
558	5205	401	282	173	754	5017	15	0
559	5205	401	286	174	753	5027	15	0
560	5205	401	282	175	753	5027	15	0
561	5215	410	286	173	752	5037	15	0
562	5205	410	281	173	753	5037	15	0
563	5215	410	285	175	752	5037	15	0
564	5205	410	285	172	754	5047	15	0
565	5205	410	281	173	753	5057	15	0
566	5215	401	280	167	752	5057	15	0
567	5205	410	284	169	753	5067	15	0
568	5215	410	280	174	751	5076	15	0
569	5215	410	279	172	755	5086	15	0
570	5205	401	279	170	752	5096	15	0
571	5215	401	278	175	754	5096	15	0
572	5215	410	282	168	753	5106	15	0
573	5205	410	278	171	753	5116	15	0
574	5205	410	277	166	753	5116	15	0
575	5215	401	281	170	754	5126	15	0
576	5205	410	277	171	753	5136	15	0
577	5215	410	276	169	757	5136	15	0
578	5205	410	280	170	752	5145	15	0
579	5205	410	275	170	755	5145	15	0
580	5205	401	279	167	754	5155	15	0
581	4970	401	274	168	754	5155	15	0
582	2201	410	157	166	754	5165	15	0
583	401	410	0	128	754	5175	14	0
584	401	410	0	0	927	5175	10	0

585	401	410	0	0	922	5175	10	0
586	401	410	0	0	919	5175	10	0
587	401	410	0	0	916	5175	10	0
588	401	410	0	0	912	5165	10	0
589	401	978	7	0	908	5175	10	0
590	401	1761	13	0	904	5165	10	0
591	401	2093	20	0	901	5165	10	0
592	401	2093	30	0	897	5155	10	0
593	401	2093	37	0	894	5145	10	0
594	401	2093	44	0	890	5145	10	0
595	401	2113	54	0	887	5136	10	0
596	401	2123	52	4	809	5136	10	10
597	401	2123	55	10	822	5136	10	10
598	401	2123	55	17	826	5136	10	10
599	401	2133	55	48	824	5116	10	10
600	401	2152	57	58	808	5116	10	10
601	401	2152	67	62	829	5106	10	10
602	401	2152	74	74	814	5106	10	10
603	401	2152	84	78	820	5106	10	10
604	401	2152	94	89	816	5096	10	10
605	401	2181	101	100	824	5086	10	10
606	401	2318	108	106	818	5086	10	10
607	401	2534	118	115	826	5067	10	10
608	401	2573	120	120	821	5067	10	10
609	401	2573	130	119	829	5057	10	10
610	401	2573	137	133	820	5047	10	10
611	401	2563	144	139	828	5047	10	10
612	401	2563	154	141	820	5027	10	10
613	401	2563	156	154	826	5007	10	10
614	401	2563	158	156	818	5007	10	10
615	401	2563	168	154	828	4998	10	10
616	401	2563	175	173	817	4978	10	10
617	401	2573	177	172	822	4978	10	10
618	401	2563	187	180	818	4958	10	10
619	401	2563	189	187	824	4948	10	10
620	401	2563	196	189	816	4938	10	10
621	401	2573	202	198	823	4919	10	10
622	401	2563	197	200	814	4909	10	10
623	401	2573	203	199	823	4899	10	10
624	401	2573	203	204	815	4879	10	10
625	401	2573	198	209	823	4859	10	10
626	401	2583	200	199	820	4840	10	10
627	401	2583	200	201	826	4820	10	10
628	401	2583	200	201	820	4800	10	10
629	401	2583	201	202	825	4790	10	10
630	401	2583	206	202	817	4771	10	10
631	401	2583	202	205	825	4751	10	10
632	401	2583	202	202	818	4741	10	10
633	401	2681	209	200	824	4721	10	10
634	401	2788	210	209	817	4702	10	10
635	401	2788	211	212	825	4692	10	10
636	401	2788	216	210	821	4682	10	10
637	401	2788	216	211	826	4662	10	10
638	401	2788	212	216	816	4652	10	10
639	401	2788	217	205	825	4633	10	10
640	401	2788	212	220	816	4613	10	10
641	401	2788	213	221	825	4593	10	10
642	401	2788	213	214	818	4574	10	10
643	401	2788	214	211	830	4554	10	10
644	401	2788	215	216	823	4534	10	10

645	401	2788	215	216	820	4514	10	10
646	401	2788	216	218	810	4495	10	10
647	401	2788	216	213	820	4485	10	10
648	401	2788	221	220	810	4455	10	10
649	401	2788	212	212	820	4436	10	10
650	401	2788	214	219	812	4416	10	10
651	401	2788	216	209	825	4396	10	10
652	401	2788	218	213	814	4376	10	10
653	401	2788	219	213	825	4357	10	10
654	401	2788	220	220	813	4337	10	10
655	401	2788	221	224	815	4317	10	10
656	401	2788	221	226	810	4288	10	10
657	401	2788	217	217	813	4268	10	10
658	401	2788	219	218	807	4248	10	10
659	401	2788	221	216	813	4219	10	10
660	401	2788	218	227	806	4189	10	10
661	401	2788	215	234	812	4169	10	10
662	401	2788	217	219	801	4150	10	10
663	401	2788	219	211	818	4120	10	10
664	401	2788	216	221	812	4100	10	10
665	401	2788	218	220	817	4081	10	10
666	401	2788	220	213	817	4061	10	10
667	401	2788	222	215	821	4031	10	10
668	401	2788	219	230	804	4012	10	10
669	401	2788	221	225	816	3992	10	10
670	401	2788	223	219	813	3972	10	10
671	401	2788	225	215	822	3953	16	10
672	401	2788	227	215	814	3923	16	10
673	401	2788	224	234	822	3903	16	10
674	401	2788	226	223	807	3874	16	10
675	401	2788	223	243	820	3844	16	10
676	401	2788	220	219	817	3815	16	10
677	401	2788	217	220	817	3785	16	10
678	401	2788	214	218	813	3755	16	10
679	401	2788	211	214	826	3736	16	10
680	401	2788	213	210	821	3706	16	10
681	401	2788	210	210	826	3677	16	10
682	401	2788	207	209	821	3647	16	10
683	401	2788	204	207	828	3627	16	10
684	401	2788	206	204	817	3608	16	10
685	401	2788	208	203	829	3578	16	10
686	401	2788	205	208	821	3558	16	10
687	401	2788	207	203	825	3539	16	10
688	401	2788	209	205	823	3509	16	10
689	401	2788	206	208	823	3489	16	10
690	401	2788	208	208	818	3470	16	10
691	401	2788	210	206	826	3450	16	10
692	401	2788	212	209	821	3420	16	10
693	401	2788	209	210	824	3391	16	10
694	401	2788	206	208	821	3361	16	10
695	401	2788	203	203	825	3341	16	10
696	401	2788	205	200	821	3312	16	10
697	401	2788	202	205	822	3282	16	10
698	401	2788	199	201	814	3262	16	10
699	401	2788	201	197	818	3233	16	10
700	401	2788	198	201	816	3213	16	10
701	401	2788	200	198	816	3184	16	10
702	401	2788	197	198	814	3164	16	10
703	401	2788	199	197	820	3144	16	10
704	401	2788	201	199	810	3124	16	10

705	401	2788	203	196	814	3095	16	10
706	401	2788	200	202	807	3075	16	10
707	401	2788	202	199	813	3055	16	10
708	401	2788	204	200	807	3036	16	10
709	401	2788	206	200	813	3006	16	10
710	401	2788	203	207	807	2977	16	10
711	401	2788	200	203	810	2957	16	10
712	401	2788	202	200	809	2937	16	10
713	401	2788	204	200	813	2908	16	10
714	401	2837	201	203	808	2878	16	10
715	401	2866	198	199	813	2858	16	10
716	401	2866	200	195	807	2829	16	10
717	401	2866	197	195	812	2809	216	10
718	401	2866	131	197	806	2779	216	10
719	401	2866	129	139	818	2760	216	10
720	401	2866	198	128	815	2740	296	10
721	401	2876	200	210	834	2710	296	10
722	401	2866	197	189	823	2681	296	10
723	401	2866	194	202	821	2661	296	10
724	401	2866	196	187	815	2641	296	10
725	401	2866	198	200	824	2622	296	10
726	401	2866	200	196	816	2602	296	10
727	401	2876	202	200	822	2572	296	10
728	401	2866	199	199	818	2553	296	10
729	401	2866	201	197	822	2523	296	10
730	401	2866	198	200	815	2503	296	10
731	401	2866	200	197	822	2484	296	10
732	401	2866	202	197	816	2464	296	10
733	401	2866	204	201	820	2434	296	10
734	401	2866	201	200	814	2405	296	10
735	401	2866	198	201	817	2385	296	10
736	401	2866	200	197	813	2356	296	10
737	401	2866	197	201	821	2336	296	10
738	401	2866	199	195	814	2306	296	10
739	401	2876	196	201	818	2296	296	10
740	401	2866	203	185	812	2257	296	10
741	401	2866	195	207	814	2237	292	10
742	401	2866	197	203	821	2208	292	10
743	401	2866	194	198	826	2188	292	10
744	401	2866	196	201	820	2168	292	10
745	401	2866	198	200	823	2129	292	10
746	401	2866	190	199	815	2109	292	10
747	401	2866	192	192	825	2080	292	10
748	401	2866	189	188	812	2060	292	10
749	401	2866	191	189	826	2020	292	10
750	401	2866	183	187	817	2001	292	10
751	401	2866	185	186	816	1961	292	10
752	401	2866	177	184	815	1932	292	10
753	401	2857	174	174	816	1902	292	10
754	401	2837	171	164	809	1873	292	10
755	401	2837	168	172	810	1853	292	10
756	401	2827	170	165	802	1823	292	10
757	401	2729	167	165	816	1794	292	10
758	401	2602	164	172	804	1764	292	10
759	401	2514	161	164	810	1744	292	10
760	401	2446	163	160	802	1715	292	10
761	401	2426	160	164	810	1695	292	10
762	401	2426	162	156	802	1675	292	10
763	401	2426	164	155	807	1646	292	10
764	401	2426	161	164	800	1626	292	10



765	401	2426	163	159	808	1598	292	10
766	401	2426	160	158	804	1577	292	10
767	401	2426	162	156	807	1557	292	10
768	401	2416	164	156	797	1537	292	10
769	401	2309	166	164	801	1518	292	10
770	401	1252	125	166	797	1498	292	10
771	401	410	0	122	799	1478	90	10
772	401	401	0	0	808	1458	10	0
773	401	410	0	0	831	1449	10	0
774	401	410	0	0	836	1439	10	0
775	401	401	0	0	840	1429	10	0
776	401	401	0	0	841	1419	10	0
777	401	410	0	0	842	1399	10	0
778	401	401	0	0	842	1389	10	0
779	401	410	0	0	842	1380	10	0
780	401	410	0	0	842	1380	10	0
781	401	410	0	0	842	1389	10	0
782	401	401	0	0	839	1380	0	0
783	401	410	0	0	837	1380	0	0
784	401	401	0	0	840	1370	10	0
785	401	401	0	0	844	1370	10	0
786	401	401	0	0	845	1370	10	0
787	401	401	0	0	845	1370	10	0
788	401	410	0	0	845	1360	10	0
789	401	410	0	0	845	1360	10	0
790	401	410	0	0	845	1360	10	0
791	401	401	0	0	845	1350	10	0
792	401	410	0	0	845	1350	10	0
793	401	401	0	0	845	1350	10	0
794	401	401	0	0	845	1340	10	0
795	401	401	0	0	845	1340	10	0
796	401	410	0	0	845	1330	10	0
797	401	401	0	0	845	1330	10	0
798	401	401	0	0	845	1340	10	0
799	401	401	0	0	844	1340	10	0
800	0	0	0	0	0	0	0	0

XXX

ANEXA V

Calculul energetic

V.1. Calculul energetic al acționării cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei reostatică

V.1.1 Calculul energetic la demaraj

a). Date inițiale și relații de calcul

Compusă din două vagoane și patru boghiuri, rama electrică de metrou conține patru motoare de tracțiune conectate tot timpul două câte două în paralel. La pornire cele două grupe de motoare sunt conectate în serie împreună cu reostatele R_{xA} și R_{xB} (vezi figura 2.9).

Caracteristicile tehnice pentru care se fac calculele energetice sunt:

Puterea, $P = 4 \times 185 \text{ kW}$;

Tensiunea nominală, $U_n = 750 \text{ V}$;

Turația nominală, $n_n = 1350 \text{ rot/min}$;

Greutatea unui vagon gol, $G = 36 \text{ t}$;

Sarcina utilă la 5 călători/m² (200 călători), 13 t;

Raportul de transmitere, $i_{tr} = \frac{43}{8}$;

Randamentul transmisiei, $\eta_{tr} = 0,95$;

Diametrul roții motoare, $D = 910 \text{ mm}$.

Viteza vehiculului în funcție de turație se poate determina cu relația:

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot 3,6}{60 \cdot i_{tr}} \cdot n. \quad (8.1)$$

Făcând înlocuirile parametrilor cunoscuți, rezultă :

$$V = 0,0319127 \cdot n. \quad (8.2)$$

Forța de tracțiune la un motor rezultă din egalarea puterii la obadă și a puterii motorului de tracțiune:

$$M_0 \cdot \Omega_0 = M_{um} \cdot \Omega_m \cdot \eta_{tr}, \quad (8.3)$$

$$M_0 = F_0 \cdot \frac{D}{2}, \quad (8.4)$$

$$F_0 = \frac{2}{D} \cdot i_{tr} \cdot \eta_{tr} \cdot M_{um}. \quad (8.5)$$

După înlocuirile parametrilor cunoscuți rezultă:

$$F_0 = 11 \cdot M_{um}. \quad (8.6)$$

Accelerația și decelerația unui vagon în timpul demarajului se determină cu relația [87], [93]:

$$a = \frac{F - R}{1000 \cdot G \cdot (1 + \gamma)}, \quad (8.7)$$

$$d = \frac{F + R}{1000 \cdot G \cdot (1 + \gamma)}. \quad (8.8)$$

unde s-au făcut notațiile:

F – forța de tracțiune a unui vagon;

R – rezistența de rulare;

$1 + \gamma$ - coeficientul maselor în mișcare de rotație ($1 + \gamma = 1,1$ pentru o încărcare medie a vagonului).

Forța de tracțiune a unui vagon va fi:

$$F = 2 \cdot F_0 = 2 \cdot 11 \cdot M_{um} = 22 \cdot M_{um} \text{ [N]} \quad (8.9)$$

Rezistența la înaintare este:

$$R = 9,81 \cdot G \cdot r_0 \text{ [N]} \quad (8.10)$$

unde:

r_0 [daN/t] – rezistența specifică la rulare;

G [t] – greutatea totală a vagonului;

$G = 36 + 13 = 49$ t (sarcină mare).

Pentru determinarea lui r_0 în literatura de specialitate se dau mai multe relații [93]. Una dintre acestea pentru care valorile calculate s-au considerat acoperitoare este dată în continuare:

$$r_0 = \frac{2,5 \cdot G_t + \sigma \cdot c_1 \cdot S_f \cdot \left(\frac{V}{10}\right)}{G_t} \quad (8.11)$$

unde: G_t [t] – greutatea ramei,

$\sigma = 1,5$ – factor de tunel;

$c_1 = 0,45$ – coeficient de rezistență a aerului;

$S_f = 10,8 \text{ m}^2$ – suprafața frontală a vehiculului;

V [km/h] – viteza vehiculului.

Pentru diferite viteze, făcând calculele cu relația 8.11, rezultă valorile din tabelul V.1, [93]:

Tabelul V.1.

V km/h	10	20	30	40	50	60	70	80
r_0 [daN/t]	2,58	2,81	3,19	3,72	4,41	5,25	6,25	7,38

Timpul de reținere pe treaptă pe perioada demarajului cronometric până la primul control de curent este de $\Delta t = 0,2$ s.

Timpul de staționare pe fiecare treaptă în continuare, se determină cu relația:

$$\Delta t = \frac{\Delta V}{a} = \frac{\pi \cdot D \cdot \Delta n}{60 \cdot i_{tr} \cdot a} \quad (8.12)$$

După înlocuiri, relația anterioară devine:

$$\Delta t = 0,008845 \cdot \Delta n \quad (8.13)$$

Pentru sarcină mică controlul curentului se face la $I_{prag} = 360$ A, iar pentru sarcină mare la $I_{prag} = 440$ A.

Din diagrama vitezei unghiulare Ω (I), figura 2.10 (și anexa 1), se obțin vitezele la care se face trecerea de pe o treaptă pe alta, rezultând curentul mediu pe motor pentru fiecare treaptă în parte. Aceste valori sunt trecute în tabelul V.2.

Din aceeași diagramă rezultă și turațiile corespunzătoare începutului intrării punctului de funcționare a motorului de tracțiune pe o caracteristică, și a trecerii pe caracteristica următoare:

$$n_{1,2} = \frac{30}{\pi} \cdot \Omega \quad (8.14)$$

Corespunzător curentului mediu pe fiecare treaptă rezultă cuplul mediu util din diagrama 2.12 (și anexa 1), trecut și el în tabelul V.2.

Cu relațiile determinate anterior, se fac calculele corespunzătoare și se completează tabelul V.2. Acestea sunt:

Turația cu relația (8.14).

Viteza cu relația (8.2).

Forța de tracțiune cu relația (8.9).

Rezistența specifică la rulare cu relația (8.11) sau tabelul V.1.

Rezistența la înaintare cu relația (8.10).

Timpul de staționare pe fiecare treaptă, cu relația (8.13).

Tabelul V.2.

Nr. crt.	I_{med} [A]	M_{med} [Nm]	F [N]	a [m/s^2]	R [N]	r_0 [daN/t]	Δt [s]	Δn [rot/min]	n_1 [rot/min]	n_2 [rot/min]	V [km/h]
1	48	80	1760	0,01	1200	2,5	0,2	0,6	0	0,6	0,02
2	75	180	3960	0,05	1200	2,5	0,2	2,4	0,6	3	0,09
3	105	280	6160	0,09	1200	2,5	0,2	3	3	6	0,19
4	168	680	14960	0,25	1200	2,5	0,2	8	6	14	0,45
5	235	1080	23760	0,42	1200	2,5	0,2	14	14	28	0,9
6	300	1380	30360	0,54	1200	2,5	0,2	28	28	56	1,85
7	350	1800	39600	0,71	1200	2,5	0,2	24	56	80	2,5
8	360	1870	41140	0,74	1200	2,5	0,2	30	80	110	3,5
9	380	2000	44000	0,8	1200	2,5	0,2	32	110	142	4,5
10	450	2420	53240	0,96	1200	2,5	0,2	20	142	162	5,2
11	465	2550	56100	1,01	1200	2,5	0,6	67	162	229	7,3
12	480	2620	57640	1,05	1200	2,5	0,6	67	229	296	9,4
13	480	2620	57640	1,04	1298	2,7	0,5	57	296	353	11,3

14	490	2700	59400	1,07	1322	2,75	0,15	86	353	439	14	
15	480	2620	57640	1,04	1332	2,77	0,35	38	439	477	15,2	
16	480	2620	57640	1,04	1336	2,78	0,35	35	477	512	16,3	
T1	440	2380	52360	0,94	1341	2,79	0,2	35	512	547	17,5	
T2	400	2120	46640	0,84	1346	2,8	0,2	35	547	582	18,5	
17	360	1870	41140	0,74	1350	2,81	0,2	10	582	592	18,9	
18	385	2005	44110	0,79	1350	2,81	0,45	38	592	630	20	
19	450	2420	53240	0,96	1394	2,9	0,5	48	630	678	21,6	
20	490	2700	59400	1,07	1466	3,05	1,15	133	678	811	25,8	
21	490	2700	59400	1,07	1533	3,19	1,05	124	811	935	30	
22	470	2560	56320	1,01	1538	3,2	0,5	58	935	993	31,7	
23	460	2500	55000	0,99	1620	3,37	0,5	47	993	1040	33,2	
24	490	2700	59400	1,07	1658	3,45	0,25	77	1040	1117	35,6	
25	460	2500	55000	0,98	1697	3,53	0,45	48	1117	1165	37,2	
26	500	2770	60940	1,09	1788	3,72	0,8	86	1165	1250	40	
27	500	2770	60940	1,09	1875	3,9	0,8	96	1250	1346	43	
28	500	2770	60940	1,09	1970	4,1	1	124	1346	1470	47	
Tot.								13,77				
Car.	330	1680	36960	0,62	3412	7,1	44,23	898	1470	2368	75,6	

Pentru:

$L = 1250$ m – distanța reală dintre două stații;

$V = 80$ km/h – viteza maximă;

$a = 1,2$ m/s² – accelerația maximă;

$t_0 = 35$ s – timpul de staționare;

din diagramele parametrice figura 5.4 sau tabelul 5.6 rezultă viteza comercială:

$$V_c = 40,3 \text{ km/h.}$$

Acceptând ca viteza să nu depășească 75,6 km/h (pentru această viteză intră în acțiune sistemul de protecție de pe vehicul), atunci viteza medie tehnică $V_{\text{med teh}} = 75,6/2 = 37,8$ km/h.

Cu aceste condiții impuse, timpul de parcurgere dintre două stații va fi:

$$t_{\text{tot}} = \frac{L}{V_{\text{med teh}}} = \frac{1250}{37,8} \cdot 3,6 = 120 \text{ s} \quad (8.15)$$

b). Calculul curentului echivalent

Curentul echivalent se determină cu relația:

$$I_c = \sqrt{\frac{\sum I_{di \text{ med}}^2 \cdot \Delta t_{di} + I_{c \text{ med}}^2 \cdot t_c + I_f^2 \cdot t_f}{T}} \quad (8.16)$$

unde:

$T = 155$ s – timpul total de parcurgere între două stații;

$I_{di \text{ med}}$ – curentul mediu în perioada demarajului până la caracteristica de câmp slăbit minim (treapta 28);

$I_{c \text{ med}}$ – curentul mediu în perioada deplasării punctului de funcționare pe caracteristica de câmp slăbit minim;

$I_f = 440 \text{ A}$ – curentul de frânare.

Din diagramele prezentate în documentația tehnică [93] rezultă:

$$t_{\text{total demaraj}} = 58 \text{ s};$$

$$t_{\text{lansat}} = 47 \text{ s};$$

$$t_f = 15 \text{ s};$$

$$t_{\text{total}} = 58 + 47 + 15 = 120 \text{ s};$$

$$t_s = 35 \text{ s};$$

$$\Rightarrow T = 120 + 35 = 155 \text{ s}.$$

Din tabelul V.2 rezultă pentru sarcină mare:

$$t_c = 58 - 13,77 = 44,23 \text{ s};$$

Din diagrama 2.10 rezultă $I_{c \text{ mediu}} = 330 \text{ A}$.

Făcând înlocuirile și calculele corespunzătoare rezultă:

$$I_c = \sqrt{\frac{\sum I_{di \text{ med}}^2 \cdot \Delta t_{di} + 330^2 \cdot 44,23 + 440^2 \cdot 15}{155}}$$

$$I_c = 254 \text{ A} < I_n = 270 \text{ A}$$

c). Calculul curentului mediu absorbit din rețea

Pentru o ramă de metrou la conexiunea serie – paralel, două motoare de tracțiune sunt tot timpul conectate în paralel astfel încât curentul mediu pentru această conexiune se majorează cu 2 iar la conexiunea paralel se majorează cu 4.

$$I_{\text{med rama}} = \frac{2 \cdot (\sum I_{si \text{ med}} \cdot t_{si}) + 4 \cdot (\sum I_{pi \text{ med}} \cdot t_{pi})}{T} \quad (8.17)$$

unde:

$I_{si \text{ med}}$ – curentul mediu de funcționare serie;

t_{si} – timpul la funcționarea serie;

$I_{pi \text{ med}}$ – curentul mediu de funcționare în paralel;

t_{pi} – timpul la funcționarea paralel;

$$T = t_{si} + t_{pi} + t_c = 5,55 + 8,22 + 44,23 = 58 \text{ s}.$$

Înlocuind curenții din tabelul V.2 precum și valorile obținute din figura 2.10 se poate calcula curentul mediu pe o ramă de metrou.

$$I_{\text{med rama}} = \frac{2 \cdot 2172 + 4 \cdot (3642 + 14596)}{155} = \frac{77296}{155} = 499 \text{ A}$$

Consumul de energie pe ramă este:

$$W = \frac{U \cdot I_{\text{med}}}{3600} \cdot T, \quad (8.18)$$

$$W = \frac{750 \cdot 499}{3600} \cdot 155 = 16113 \text{ Wh.}$$

Consumul specific de energie pe ramă este:

$$W_{\text{p}} = \frac{W}{Q \cdot L}, \quad (8.19)$$

unde: $L = 1250 \text{ m}$ – distanța reală dintre două stații;

$Q = 98 \text{ t}$ – greutatea încărcată a ramei cu 200 călători/vag;

$$W_{\text{p}} = \frac{16113}{98 \cdot 1,25} = 132 \text{ Wh/t} \cdot \text{km}$$

d). Calculul pierderilor pe reostatul de demaraj

Energia electrică pierdută pe reostatul de demaraj se poate determina cu relația:

$$W_{\text{reostat}} = \frac{\sum R_{si} I_{si \text{ med}}^2 \cdot \Delta t_{si} + 2 \cdot \sum I_{pi \text{ med}}^2 \cdot \Delta t_{pi}}{3600} \quad (8.20)$$

unde:

$R_{si} [\Omega]$ – rezistența de demaraj la funcționarea serie (tabelul 2.3);

$R_{pi} [\Omega]$ – rezistența de demaraj la funcționarea în paralel;

$I_{si \text{ med}}$ – curentul mediu la funcționarea serie (tabelul V2 multiplicat cu 2);

$I_{pi \text{ med}}$ – curentul mediu la funcționarea în paralel (tabelul V2 multiplicat cu 2).

Făcând înlocuirile și calculele rezultă:

$$W_{\text{reostat}} = \frac{1760431 + 2 \cdot 2301866}{3600} = 1768 \text{ W} \cdot \text{h}$$

$$W_{\text{sp reostat}} = \frac{W_{\text{reostat}}}{Q \cdot L} = \frac{1768}{98 \cdot 1,25} = 14 \text{ W} \cdot \text{h/t} \cdot \text{km}$$

Făcând raportul dintre consumul specific de energie pe reostat și consumul specific total de energie în timpul funcționării vehiculului rezultă:

$$\alpha_{\text{reostat}} = \frac{W_{\text{sp reostat}}}{W_{\text{sp demaraj}}} = \frac{14}{32} = 0,106$$

$$\alpha_{\text{reostat}} = 10,6 \%$$

V.1.2. Calculul energetic la frânare

Curentul de frânare este de 550 A pentru un interval de 15 s.

Consumul de energie va fi:

$$W = 2 \cdot \frac{U \cdot I_{\text{med}} \cdot T}{3600} = 2 \cdot \frac{1150 \cdot 550 \cdot 15}{3600} = 5271 \text{ W} \cdot \text{h}.$$

Pentru o ramă cu unde $Q = 98 \text{ t}$ iar $L = 1250 \text{ m}$ rezultă:

$$W_{\text{sp}} = \frac{W}{Q \cdot L} = \frac{5271}{98 \cdot 1,25} = 43 \text{ W} \cdot \text{h} / \text{t} \cdot \text{km}.$$

Această energie ar putea fi reintrodusă în rețea cu prilejul frânării recuperative.

V.2. Calculul energetic al acționării cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei cu VTC

V.2.1. Calculul energetic la demaraj

a). Energia consumată de către MT încercat

Pentru MT încercat pe standul modelului experimental, variația curentului $I(t)$ este prezentată în figura 6.17. Prin împărțirea convenabilă a intervalului de timp aferent funcționării în regimul de tracțiune rezultă următoarele valori ale curentului, trecute în tabelul V.3.

Tabelul V.3

I[A]	125	250	225	275	225	Total
Δt [s]	1,6	5,6	1,2	1,2	7,4	17

Cu aceste valori se poate calcula curentul mediu pe motorul de tracțiune experimentat, cu relația:

$$I_{\text{med exp}} = \frac{\sum I_i \cdot \Delta t_i}{T} \quad (8.21)$$

$$I_{\text{med exp}} = \frac{3865}{17} = 227 \text{ A}$$

Energia consumată de 4 MT va fi:

$$W_{\text{exp}} = \frac{4 \cdot U \cdot I_{\text{med}} \cdot T}{3600} = \frac{4 \cdot 750 \cdot 227 \cdot 17}{3600} = 3216 \text{ W} \cdot \text{h}$$

Consumul specific în condițiile încărcării acestui motor cu sarcina $Q_1 = 17,37 \text{ t}$, este:

$$W_{\text{sp exp}} = \frac{W_{\text{exp}}}{Q \cdot L} \quad (8.22)$$

unde: $Q = 4 \cdot Q_1 = 69,48 \text{ t}$, $L = 650 \text{ m}$, distanța dintre 2 stații.

$$W_{\text{sp}} = \frac{3216}{69,48 \cdot 0,65} = 71 \text{ W} \cdot \text{h} / \text{t} \cdot \text{km}$$

b). Energia consumată de MT propus

În situația reglării vitezei cu VTC, fiecare MT este alimentat de la un VTC propriu, situație în care consumul energetic pe o ramă de metrou va fi suma consumului celor 4 motoare.

Admițând că motorul de tracțiune este același cu cel de la sistemul de acționare cu reglarea reostatică a vitezei, caracteristica cuplului util este aceeași ($M_u = K\Phi I$), iar curentul se menține constant până la trecerea punctului de funcționare a MT pe caracteristica în câmp slăbit (vezi figura 6.17).

Prin extrapolarea valorilor din tabelul V.3, în concordanță cu MT propus, la un curent de prag de 440 A, se poate completa tabelul V.4.

Tabelul V.4.

I [A]	244	440	410	440	330	Total
Δt [s]	2,3	8,3	1,8	1,8	38	52,2

Curentul mediu pe motor calculat cu relația (8.20) va fi:

$$I_{\text{med propus}} = \frac{18290}{155} = 118 \text{ A}$$

Energia consumată pe o ramă de metrou potrivit relației (8.21) va fi:

$$W_{\text{propus}} = \frac{4 \cdot 750 \cdot 118 \cdot 155}{3600} = 15312 \text{ W}\cdot\text{h}$$

Consumul specific în condițiile încărcării unei rame va fi:

$$W_p = \frac{W}{Q \cdot L} \quad (8.23)$$

unde:

$$Q = 2 \cdot 49 = 98 \text{ t};$$

$$L = 1250 \text{ m, distanța dintre două stații.}$$

$$W_p = \frac{15312}{98 \cdot 1,25} = 125 \text{ W}\cdot\text{h}/\text{t}\cdot\text{km}$$

V.2.2. Calculul energetic la frânare

a). Energia recuperată de către motorul de tracțiune încercat

În timpul frânării electrice curentul de frânare recuperat este cel prezentat în figura 6.17. Prin împărțirea convenabilă a intervalului de timp aferent funcționării în regim de frânare, rezultă următoarele valori ale curentului, trecute în tabel V.5.

Tabelul V.5.

I [A]	100	220	190	95	Total
Δt [s]	1,5	2,5	3,2	1,5	8,7

Cu aceste valori se poate calcula curentul mediu pe un motor de tracțiune cu relația (8.21).

$$I_{medex} = \frac{1450}{8,7} = 167 \text{ A}$$

Energia recuperată de 4 motoare de tracțiune dată de relația (8.21) va fi:

$$W_{exp} = \frac{4 \cdot 750 \cdot 167 \cdot 8,7}{3600} = 1210 \text{ W}\cdot\text{h}$$

Consumul specific este:

$$W_{p\ exp} = \frac{1210}{4 \cdot 17,37 \cdot 0,65} = 26 \text{ W}\cdot\text{h/t}\cdot\text{km}$$

Făcând raportul între consumul specific al energiei recuperate și consumate rezultă:

$$\alpha_{ex} = \frac{W_{p\ exp\ r}}{W_{p\ exp\ c}} = \frac{26}{71} = 0,366, \text{ sau } \alpha_{ex} = 36,6 \%$$

b). Energia recuperată de către MT propus

Prin extrapolarea valorilor din tabelul V.5, la un curent de frânare maxim de $I_f = 440 \text{ A}$ rezultă valorile din tabelul V.6.

Tabelul V.6.

I [A]	200	440	380	180	Total
Δt [s]	2,6	4,3	5,5	2,6	15

Curentul mediu calculat cu relațiile anterioare pentru vehiculul nou proiectat va fi:

$$I_{medp} = \frac{4970}{15} = 331 \text{ A}$$

Energia recuperată pentru 4 MT va fi:

$$E_p = \frac{4 \cdot 750 \cdot 331 \cdot 15}{3600} = 4137 \text{ Wh}$$

Consumul specific este:

$$W_p = \frac{4137}{98 \cdot 1,25} = 34 \text{ Wh/t}\cdot\text{km}$$

Făcând raportul între consumul specific al energiei recuperate și consumate rezultă:

$$\alpha_p = \frac{W_{p\ r}}{W_{p\ c}} = \frac{34}{125} = 0,272, \text{ sau } \alpha_p = 27,2 \%$$

c). Rezumat

Sintetizând calculele făcute la subcapitolul V.2.2 în cazul acționării cu mașina de curent continuu și reglarea vitezei cu VTC, consumul specific de energie pentru MT experimentat W_{exp} și MT al vehiculului proiectat W_{propus} este dat în tabelul V.7.

Tabelul V.7.

	MT_{exp}	MT_{propus}
$W_{demaraj} [W \cdot h / t \cdot km]$	71	125
$W_{frânare} [W \cdot h / t \cdot km]$	26	34
$\alpha [\%]$	36,6	27,2

În concluzie consumul specific de energie se reduce substanțial de la 132 $W \cdot h / t \cdot km$ (în cazul reglării vitezei reostatice) la $125 - 34 = 91$ $W \cdot h / t \cdot km$ astfel că soluția tehnică pentru acest sistem de acționare merită să fie luată în considerare.

Această economie este remarcabilă ținând seama că pornirile și opririle sunt dese.