

UNIVERSITATEA TEHNICA TIMISOARA
FACULTATEA DE MECANICĂ

Inginer: VIOREL SIMUȚ

CONTRIBUTII LA COMANDA ȘI REGLAREA
AUTOMATA A VEHICOLELOR FERUVIARE MOTOARE IN
REGIM DE FRANARE ELECTRICA RECUPERATIVA

- TEZA DE DOCTORAT -

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

CONDUCATOR ȘTIINȚIFIC
Prof.Dr.Ing., VASILE HOANĂ

- 1995 -

CUPRINS

	pag.
Introducere	4
Cap.I. Funcționarea motorului asincron în ansamblul frânei de rețea	8
1.1. Avantajele motorului asincron trifazat cu rotorul în scurtcircuit	8
1.2. Frâna electrică de rețea	10
1.3. Stadiul actual și necesitatea dezvoltării cercetărilor privind aplicarea frânei de rețea	15
1.3.1. Realizări în domeniul frânei de rețea	15
1.3.2. Necesitatea dezvoltării cercetărilor privind funcționarea frânei de rețea la vehiculele feroviare ...	20
1.4. Determinarea parametrilor de funcționare ai motorului asincron trifazat în regim de generator	21
1.5. Generator asincron în regim dinamic autoexcitat	29
1.6. Program de determinare pe calculator a parametrilor generatorului asincron trifazat	42
Cap.II. Determinarea caracteristicilor de frânare a locomotivelor electrice cu motoare asincrone trifazate ..	49
2.1. Determinarea forței de frânare	49
2.2. Program de simulare grafică pe calculator a influenței parametrilor de exploatare asupra forței de frânare F_f	52
2.3. Determinarea tensiunii statorice date la convertorul de frecvență și cea redată la linia de contact în funcție de condițiile de exploatare feroviară	65
2.4. Program de simulare grafică pe calculator a influenței parametrilor de exploatare asupra tensiunii recuperate la rețea Ur	68
Cap.III. Sisteme de reglare și comandă automată în regim de frână recuperativă	87
3.1. Sisteme de reglare automată a motorului asincron trifazat	87

3.1.1.	Necesitatea reglării automate a motorului asincron trifazat	87
3.1.2.	Metode de reglare a vitezei motorului asincron	88
3.1.2.1.	Regimul dinamic și matricea de transfer	90
3.1.3.	Comanda convertizorului static de frecvență	97
3.1.3.1.	Elemente de comandă ale C.S.F.	97
3.1.3.2.	Dimensionarea principalelor elemente ale C.S.F.	104
3.1.3.3.	Program de calcul în limbaj Turbo Pascal pentru dimensionarea convertorului static de frecvență	110

Cap.IV. Cercetări experimentale privind frânarea recuperativă în tracțiunea trifazată

4.1.	Cercetări experimentale privind funcționarea motorului asincron trifazat cu rotorul în scurtcircuit în regim de generator	116
4.1.1.	Condiții de experimentare	116
4.1.2.	Metoda de captare și înregistrare a semnalelor de pe ștandul experimental	117
4.1.3.	Analiza regimurilor și a semnalelor înregistrate la încercări pe ștand	117
4.1.4.	Considerații asupra rezultatelor măsurărilor pe ștandul de probă din Depoul de locomotive Dej-Triaș	122
4.2.	Măsurători în exploatarea a ramei de metrou nr.023 cu tracțiune trifazată	127
4.2.1.	Condiții de experimentare	127
4.2.2.	Vehicule de tracțiune supuse experimentării	128
4.2.3.	Metoda de captare și înmagazinare a semnalelor pe vehicol	129
4.2.4.	Metode de analiză a semnalelor înregistrate	136
4.2.5.	Considerații asupra rezultatelor măsurărilor	138

Cap.V. Eficiența economică a frânei de rețea

Cap.VI. Concluzii finale

Bibliografie

I N T R O D U C E R E

Interesul purtat recuperării energiei de frânare datează practic de la începuturile tracțiunii electrice feroviare.

În prezent, importanța sa a crescut, în special datorită mării prețului la energia electrică, a condițiilor impuse de Reglementările Comunității Europene privind protecția mediului, a condițiilor impuse de Siguranța Circulației la transportul feroviar pe Magistralele Europene [12], [20].

Frâna recuperativă este un criteriu hotărâtor în concurența dintre marile firme constructoare de locomotive și trenuri electrice (SNCF, ABB Henschel, GEC Alsthom, Siemens, AEG, Raytheon, General Motors, etc.) [3], [6].

O dată cu introducerea tehnicii de antrenare în curent trifazat, pentru vehiculele feroviare motoare s-au creat noi condiții pentru frânarea recuperativă.

Principiul de bază al frânei electrice recuperative este că la frânarea trenului, energia cinetică să se transforme în energie electrică care să fie trimisă prin firul de contact spre alți consumatori.

Pe lângă realizarea unor cupluri de frânare mari, care reduc viteza vehiculelor până la oprire și recuperarea unei părți din energia utilizată la tracțiune, frâna electrică recuperativă prezintă și alte avantaje:

- creșterea siguranței circulației datorită existenței pe locomotivă a două sisteme de frânare independente (electric și pneumatic);
- creșterea vitezei de coborâre a pantelor, frâna electrică permițând menținerea unei viteze constante la coborâre;
- reducerea uzurii bandajelor de la roțile locomotivelor și vagoanelor, a uzurii saboților și pieselor care servesc pentru transmiterea eforturilor de frânare;
- ameliorarea condițiilor de lucru a echipamentului electric datorită reducerii cantității de praf metalic, provenit de la saboți și bandaje (se micșorează și gradul de murdărire a locomotivelor și vagoanelor de călători);

- sporirea eficacității frânelor pneumatice, care, fiind utilizate mai puțin, lucrează la temperaturi mai reduse, și deci, cu coeficient de frecare ridicat;

- asigurarea reglării fine a forței de frânare, ceea ce contribuie la creșterea confortului călătorilor, permite automatizarea procesului de conducere a locomotivei sau trenului electric și ușurează simțitor munca mecanicilor;

- reducerea uzurii șinelor în curbe, întrucât, la frânarea pneumatică, roțile nu se pot deplasa liber în plan orizontal (așa cum permite frânarea electrică);

- reducerea la frânare a consumului de aer comprimat, ceea ce contribuie la micșorarea uzurii compresoarelor și a echipamentului pneumatic;

- permiterea automatizării și reglării automate a principalelor parametri de frânare, având ca urmare utilizarea la maximum a aderenței roată-șină, evitarea ruperilor de trenuri (cu toate urmările lor); încadrarea în timpii de frânare, respectându-se trasele din graficele de circulație [13];

- elimină rezistențele de frânare de pe locomotivă, care după transformatorul principal sunt de ordinul 2 ca mărime și nu mai condiționează realizarea unor forțe de frânare funcție de capacitatea de disipare a acestora pe elementele rezistive.

Dezvoltarea tehnicii de antrenare cu motoare asincrone trifazate conjugată cu dezvoltarea electronicii de putere a făcut ca în ultimul timp administrații de cale ferată din Germania [2], [3], [5], Franța [4], [21], Italia [9], Spania [12] și în alte țări să-și reînnoiască parcul de locomotive.

Acest fapt a fost necesar datorită noilor cerințe impuse de exploatarea feroviară în concurență cu celelalte sisteme de transport, avantajele decisive ale motorului asincron trifazat față de motorul de curent continuu.

Prezenta lucrare are ca obiect studiul utilizării frânei recuperative la locomotivele electrice echipate cu motoare asincrone trifazate cu rotorul în scurtcircuit, determinarea sistemelor de reglare și comandă automată a acestora - funcție de condițiile reale impuse de exploatarea feroviară.

În acest scop, autorul a elaborat metodologia proprie de

determinare a caracteristicilor de frânare a locomotivelor electrice cu motoare asincrone trifazate.

De asemenea, a elaborat metodologia de determinare a parametrilor de funcționare a motorului asincron trifazat cu rotorul în scurtcircuit în regim de generator (rulare suprasincronă).

S-a elaborat o metodologie proprie de determinare a sistemelor de reglare și comandă automată în regim de frână recuperativă, de dimensionare a convertorului static de frecvență.

Fiecare metodologie propusă a fost verificată prin simulare pe calculator. În acest scop s-au elaborat programe în sistem Turbo Pascal.

Rezultatele obținute atestă veridicitatea metodologiilor propuse.

Verificările metodologiilor propuse s-au efectuat și experimental pe un stand construit de autor în Depoul de locomotive Dej-Triaj. Sunt prezentate rezultatele comportării ramei de metrou 023 în regim de frânare cu recuperare, probleme apărute în exploatare.

Eficiența economică a frânării de rețea a fost exemplificată în capitolul V. S-a determinat energia recuperată pe un sistem real (secția Dej Călători - Cluj Napoca = 59 km).

Autorul consideră că metodologia propusă și rezultatele experimentale obținute aduc o contribuție deosebită la rezolvarea problemei folosirii frânei de rețea la locomotivele cu motor asincron trifazat la Căile Ferate Române.

De asemenea, metodologia propusă și rezultatele experimentale obținute privind generatorul asincron trifazat cu rotorul în scurtcircuit, pot fi folosite la proiectarea locomotivelor și trenurilor electrice, funcție de condițiile impuse de beneficiar.

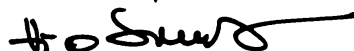
Lucrarea a fost realizată sub îndrumarea neobosită, permanentă, de înaltă ținută științifică a Domnului Prof.Dr.Ing. Vasile Hoancă, conducător științific al lucrării. căruia îi exprimă sincere mulțumiri pentru activitatea depusă și în special pentru modul cum a știut să mă încurajeze în momente dificile.

De asemenea, autorul mulțumește D-lui Dr.Ing.Mihăilescu Dumitru pentru îndrumările prețioase acordate în finalizarea

lucrării.

Pentru încrederea acordată, începând cu înscrierea la examen de admitere la doctorat, până la susținerea lucrării, autorul aduce sincere mulțumiri colectivului de salariați din Depoul SN-CFR Dej-Triaj, în cadrul căruia își desfășoară activitatea.

ing.Simuț Viorel



CAPITOLUL I. FUNCTIONAREA MOTORULUI ASINCRON IN ANSAMBLUL FRANEI DE RETEA.

1.1. Avantajele motorului asincron trifazat cu rotorul în scurtcircuit.

Odată cu dezvoltarea tehnologiei de fabricație a semiconductoarelor comandate, precum și perfecționarea circuitelor de protecție și comandă ale acestora, s-a permis realizarea de surse de alimentare și reglare continuă de tensiune și frecvență.

Existența unor asemenea surse de alimentare face posibilă folosirea în acționările reglabile a motoarelor asincrone, cu următoarele avantaje importante față de motorul cu colector:

- întreținerea redusă: nu este necesară înlocuirea periilor, nu este necesar controlul colectorului și al ansamblului portperii, punte perii;

- putere crescută la volum egal sau o reducere de greutate la aceeași putere, dat fiind că motorul asincron admite turații mai mari. În consecință, nu există limitarea de turație impusă motorului de curent continuu pe de o parte de viteza periferică a colectorului și pe de altă parte de tensiunea de comutație, valoare care este direct proporțională cu turația,

- raportul excelent greutate/putere al motorului asincron conduce la utilizarea unor puteri mai mari decât până acum pe boghiurile vehiculelor de tracțiune;

- putere mare la viteze ridicate. Cel mai adesea, motoarele cu colector deja solicitate la turația nominală, nu pot să furnizeze puterea nominală până la viteza maximă, din cauza creșterii excesive a tensiunii de comutație. Motorul asincron nu este afectat de această limitare;

- tendința de patinare este practic redusă, deoarece mașina asincronă are o caracteristică șunt, adică la o creștere a turației în timpul patinării, cuplul mașinii scade foarte mult, iar reglarea permite variația continuă, fără salturi, a cuplului motor;

- este posibilă realizarea de dispozitive de reglare, astfel că motorul se poate accelera de la repaus, la viteza maximă, pentru orice cuplu între zero și cuplul maxim și păstrarea acestuia pe tot intervalul de viteză. Datorită limitării diferenței de viteză

dintre rotor și câmpul învârtitor al statorului, nu este posibilă depășirea curentului și cuplului maxim în timpul accelerării sau al suprasarcinilor.

În tabelul nr. 1 se arată proporțional comportarea motoarelor de tracțiune de curent continuu și curent alternativ trifazat.

- Tabelul nr. 1 -

Nr. crt	Parametrii comparați	Tip c.c.	motor 3 ~
1.	Viteza periferică a rotorului (m/s)		
2.	Masa motorului		
3.	Dimensiunile motorului		
4.	Posibilități de alegere a acționării osiilor		
5.	Costul motorului		
6.	Costul echipamentului electric al motorului		
7.	Complexitatea motorului		
8.	Complexitatea echipamentului electric		
9.	Întreținerea motorului electric		
10.	Folosirea aderenței		
11.	Distribuția forței de tracțiune pe motoare		
12.	Puterea specifică (kg/km)		
13.	Cuplul specific (nM/kg)		
14.	Puterea rotorică specifică (kg/cm ²)		
15.	Pierderi		

- negativ; utilizare redusă, cheltuieli mari, etc.

- pozitiv; utilizare bună, cheltuieli mici.

Din analiza comparativă, conform tabelului nr. 1 reiese clar superioritatea motorului asincron trifazat față de motorul de curent continuu.

Din aceste considerente, multe administrații de cale ferată îl preferă pentru echiparea noilor vehicule feroviare [5], [10], [12].

Avantajele sunt covârșitoare în aceea ce privește frâna recuperativă. Motorul asincron trifazat realizează cupluri de frânare până la oprirea vehicolului (cap.2.1.).

1.2. Frâna electrică de rețea

Folosirea frânei electrice recuperative, pe mijloacele motoare feroviare, este dependentă de sistemul de curent ce alimentează linia de contact.

La liniile de curent continuu redarea la rețea a energiei de frânare nu ridică probleme deosebite. Este necesar ca tensiunea la motorul de tracțiune și, implicit, cea ajunsă la rețea, să fie mai mare decât tensiunea de la firul de contact.

La liniile de curent alternativ, redarea energiei recuperate este mult mai complexă. Nu mai ajunge o simplă ridicare a tensiunii, ci tensiunea produsă de motoarele de tracțiune trebuie să fie modelată, încât să coincidă cu frecvența și poziția fazei din firul de contact. De asemenea, se impune ca factorul de putere să fie aproape de 1, astfel încât să se poată recupera cât mai multă energie electrică.

Motorul de tracțiune asincron trifazat a impus înlocuirea noțiunii de frână recuperativă cu cea de frână de rețea [1], [2], [15]. Acest fapt a fost posibil deoarece motorul asincron trece automat în stare de frânare, în momentul când ajunge la rularea suprasincronă.

Tehnica de antrenare trifazată se dovedește avantajoasă pentru frânarea de rețea, dat fiind că tot echipamentul de redare a energiei este inclus în sistemul de tracțiune.

După cum se știe din literatura de specialitate [7], [17], motorul asincron trifazat are o caracteristică mecanică rigidă (figura 1), deoarece turația rotorică variază relativ puțin cu cuplul rezistent aplicat la axul mașinii.

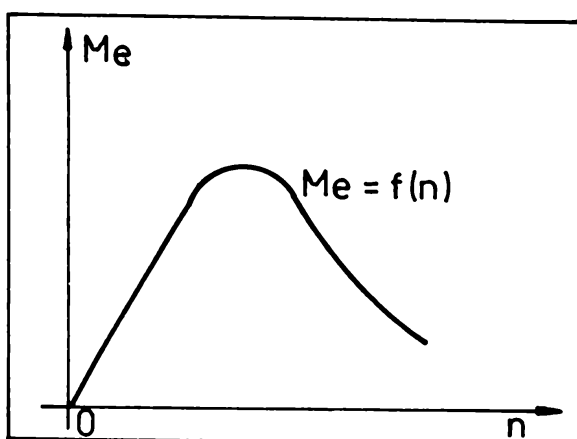


Figura 1.
Caracteristica mecanică a motorului asincron trifazat.

Pentru realizarea unor caracteristici de tracțiune și respectiv frânare, comanda motorului asincron de tracțiune se face prin convertorul static de frecvență (CSF), conform schemei structurale din figura 2.

Energia electrică de frecvență și tensiunea variabilă a generatorului asincron este transformată în energie de curent continuu cu ajutorul inverterului I_v și apoi filtrată în circuitul intermediar F.

Energia de curent continuu din circuitul intermediar prin convertorul monofazat C este transformată în energie de curent alternativ de fază și frecvență impusă.

Transformatorul principal T_p , conform coeficientului de transformare k_t , amplifică tensiunea în înfășurarea primară și prin circuitul de înaltă tensiune (inclusiv întrerupătorul ultrarapid I_u și pantograful p) redă liniei de contact energia recuperată. În același timp, cuplul electromagnetic C_g acționează asupra rotorului motorului asincron, în sens invers sensului de rotație.

rotire.

Filtrul din circuitul intermediar de curent continuu determină caracterul sursei invertorului care poate fi de tensiune sau de curent (figura 3).

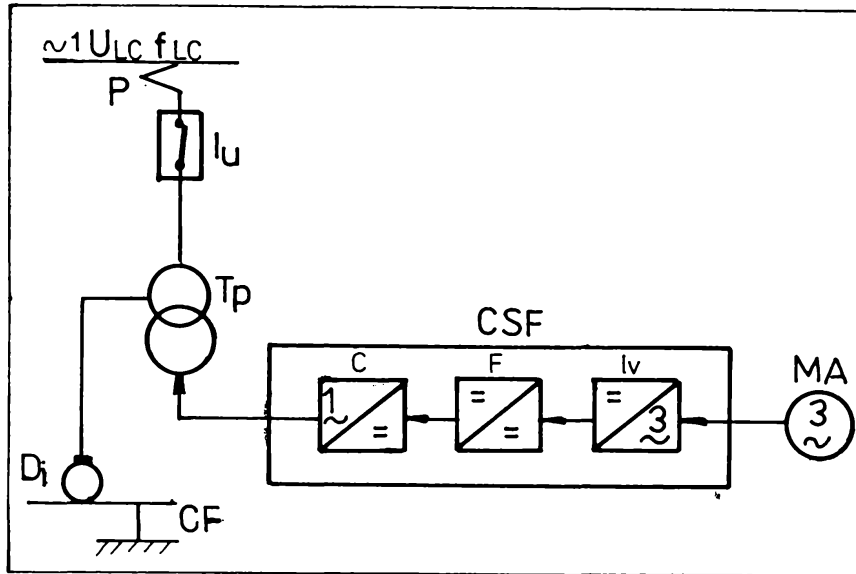
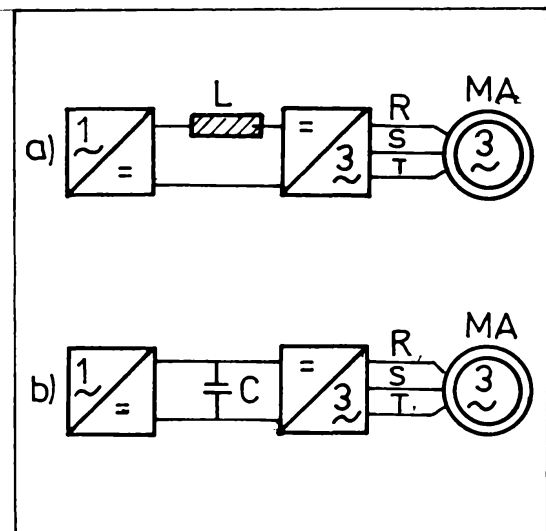


Figura 2. Sistem energetic al unei locomotive cu motoare asincrone alimentată de la rețeaua de curent alternativ.

MA-motor asincron, CSF-converter static de frecvență, I_v -invertor, F-filtru, C-converter, T_p -transformator principal, I_u -întrerupător ultrarapid, p-pantograf, U_{LC} , f_{LC} -tensiunea și frecvența liniei de contact, D_i -dispozitiv de întoarcere, CF-șină de cale ferată.

Figura 3.

- a) circuit intermediar având caracter de sursă de curent;
 b) circuit intermediar având caracter de sursă de tensiune;
 MA-motor asincron,
 R,S,T-fazele sistemului trifazat,
 L-bobină, C-condensator.



Astfel, pentru ca circuitul intermediar să dețină caracter de sursă de curent, filtrul trebuie să fie o bobină L (figura 3a) iar ca circuitul să dețină caracter de sursă de tensiune este necesar ca filtrul să fie realizat dintr-un condensator de capacitate mare C (figura 3b).

În acest ultim caz, regimul de recuperare nu poate avea loc prin redresorul de tracțiune, deoarece viteza unghiulară a motorului de tracțiune fiind în același sens, tensiunea din circuitul intermediar nu se inversează.

Pentru schimbarea sensului de transfer al energiei trebuie inversat curentul continuu. Datorită conducției unidirecționale a tiristoarelor din redresor (figura 4), inversarea curentului nu poate fi realizată decât cu ajutorul unui alt convertor (cu comutație de la rețea, legat în antiparalel cu primul care va funcționa în regim de inversor).

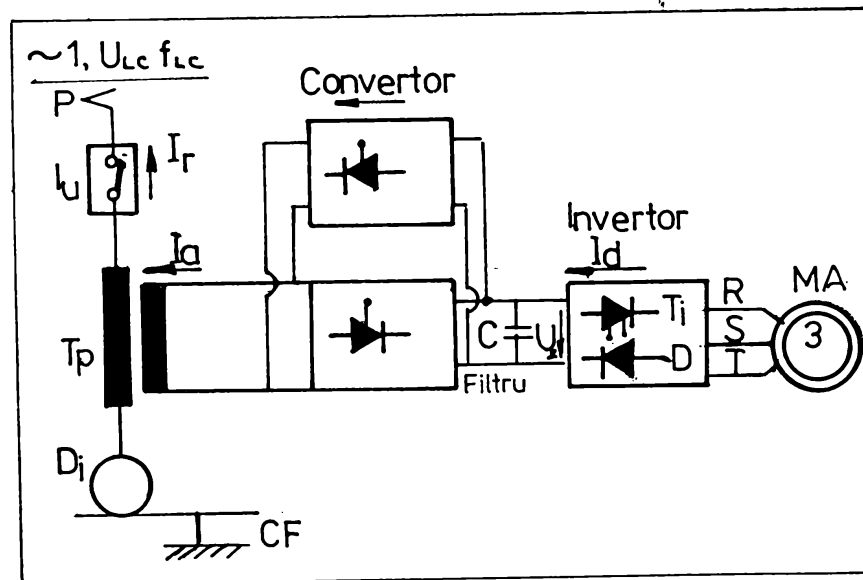


Figura 4. Locomotiva electrică cu invertor de tensiune.

MA-motor asincron; RST-fazele sistemului trifazat;
 U_0 -tensiune debitată după invertor; I_0 -curent debitat;
 C -condensator; T_p -transformator principal; I_a -curent debitat la T_p ; I_r -curent debitat în rețea;
 I_u -întrerupător ultrarapid; p -pantograf; f_{Lc} , U_{Lc} -
 frecvența și tensiunea rețelei; D_i -dispozitiv de

întoarcere; CF-șina de cale ferată.

În cazul circuitului intermediar cu bobină L de șoc, cu inductivitate mare, invertorul nu va avea nevoie de diode de curenți inverși, fiind astfel un invertor de curent.

Convertorul de comutație de la rețea va putea realiza atât regimul de motor (regim de redresor), cât și regimul de recuperare al energiei (regim de invertor), deoarece în schimbarea sensului de transfer al energiei, curentul din circuitul intermediar nu se va inversa, ci numai polaritatea tensiunii, tensiune care este liber formată de sarcină.

Între cele două variante sunt avantaje și dezavantaje [2], [13], [16]. În CSF cu circuit intermediar de curent sunt necesare mai multe filtre, existând armonici superioare care conduc la producerea de pierderi suplimentare și de cupluri pendulare la motoarele de tracțiune.

Contrar regimului de tracțiune, la frânarea electrică se pretinde cuplul maxim al motorului de tracțiune (uneori depășind cuplul dezvoltat la pornire). În consecință, lipsește pe caracteristica de frânare electrică a domeniului de slăbire a fluxului magnetic și de limitare a tensiunii la bornele mașinii.

Aceasta conduce însă la o funcționare instabilă în regim de frânare recuperativă a motorului și la curenți inadmisibili de mari, prin înfașurarea ei statorică. Pentru înlăturarea acestui neajuns, se înserează pe durata frânării electrice recuperative a unui rezistor trifazat adițional R pe partea de curent alternativ (figura 5).

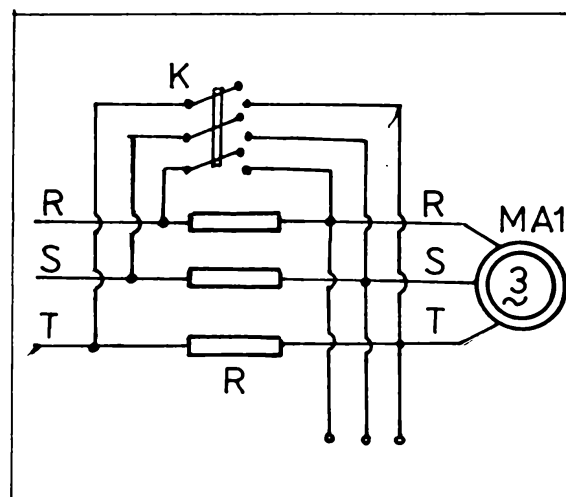
Figura 5. Protecția înfașurării statorice în regim de frânare recuperativă.

MA-motor asincron;

R -rezistor trifazat;

K -convertor trifazat;

R,S,T-fazele sistemului



trifazat.

1.3. Stadiul actual și necesitatea dezvoltării cercetărilor privind aplicarea frânei de rețea.

1.3.1. Realizări în domeniul frânei de rețea.

În anul 1979, Căile Ferate Vest-Germane au introdus în circulație, experimental, locomotiva E-120. Acest tip de locomotivă are un caracter universal, ea fiind destinată atât remorcării trenurilor de călători, cât și a trenurilor de marfă.

Aceasta poate remorca, pe linii cu declivități de până la 5 mm/m, trenuri de călători de 700 tf, cu 160 km/h, trenuri de marfă de 2700 tf cu 80 km/h și trenuri de mesagerie de 1500 tf cu 100 km/h.

Locomotiva E-120 are patru motoare electrice de tracțiune, de tip trifazat, de 1400 kW, o greutate în serviciu de 84 tf, o viteză maximă de 160 km/h și o putere de 5600 kW (7616 CP).

Viteza maximă de construcție este de 250 km/h (începând cu seria 120:137), iar tensiunea de alimentare de rețea este de 15 kV, 16.2/3 Hz.

În figura 6 este redată, simplificat, circuitul de înaltă tensiune și forță a locomotivei E-120. În regim de tracțiune, motoarele asincrone FM1...FM4 sunt alimentate la o frecvență (statorică) mai mare decât frecvența rotorului (frecvența mecanică de rotire).

Cele patru motoare de tracțiune cu care este înzestrată locomotiva sunt de tipul BQ 4843 a, au tensiunea de alimentare variabilă 0...220 V, curentul 0...600 A, frecvența statorică 0...200 Hz și clasa de izolație I.

Prin scăderea frecvenței statorice, sub frecvența mecanică de rotire se trece pe sistemul "acționare pe generator", curentul debitat fiind redresat de inverter și cedat circuitului intermediar.

Convertorul 4 g-S menține tensiunea în circuitul intermediar la o valoare constantă de 2800 V. Energia recuperată este redată rețelei prin: convertorul 4 g-S, înfășurările T1...T5 ale transformatorului principal, filtrul de curent SF, întrerupătorul principal NS și pantografele P.

Circuitul intermediar conține condensatoarele C1...C4, care sunt utilizate ca acumulateoare de energie necesară în timpul comutațiilor.

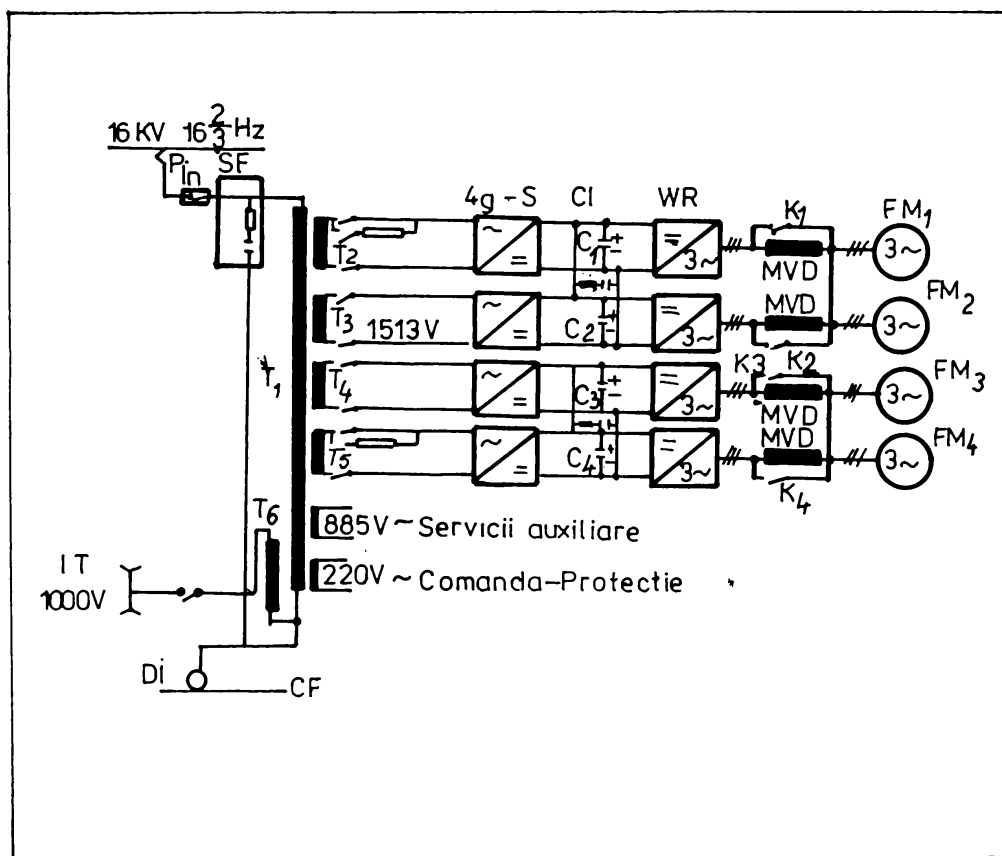


Figura 6. Circuitele principale ale locomotivei electrice E-120. SF-filtru de curent; T1-înfășurarea primară a transformatorului principal; T2...T5-înfășurări secundare ale transformatorului principal; T6-reactanță inductivă pentru încălzire tren; IT-circuit încălzire tren; FM1...FM4-motoare asincrone trifazate; MVD-bobine de filtrare; K1...K4-contactorii de reglaj frânare; WR-inverter; CI-circuit intermediar; C1...C4-condensatori; 4 g-S-converter (redresor+inverter); Di-dispozitiv de întoarcere; CF-șina de cale ferată.

Bobinele de filtrare au rolul atenuării armonicilor superioare de frecvență și a supracurenților. În regim de frânare contactorii K1...K4 sunt declenși.

Întreg procesul de frânare-tracțiune este controlat de un

sistem automatizat AFB. Comenzile acestora sunt optimizate în funcție de tensiunea rețelei, de defazaj, de factorul de putere și de limita de aderență.

Frâna electrică de rețea poate fi conectată prin:

- regulatorul de frânare;
- semnalul de alarmă, DW;
- ZDS (frânare de urgență).

La acționarea comenzii de frânare electrică, comenzile pentru tracțiune se anulează și se blochează.

Regulatorul de frânare de tip "Poti" are șapte poziții de comandă EB.1...EB.7, prin care se pot comanda forțe de frânare până la valoarea maximă de 125 kN (figura 7).

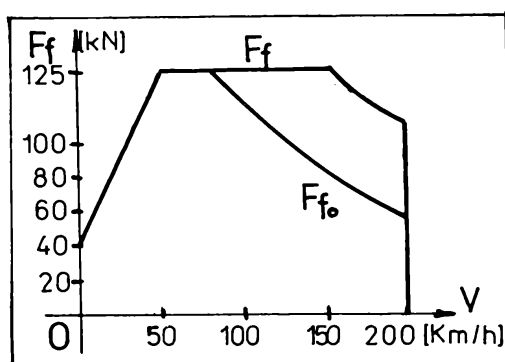


Figura 7.

Diagrama forței de frânare electrică de rețea la E.120 seria 137.

F_f -forța de frânare;

F_{fr} -forța de frânare rapidă;

V -viteza locomotivei.

Puterea maximă cedată rețelei prin frâna electrică este de 4000 kW (atât la frânarea ordinară F_f , cât și în cazul frânării rapide F_{fu}).

La viteza maximă de 200 km/h, forța de frânare este de 78 kN iar între 78 km/h și 10 km/h, acesta este 125 kN.

La o acționare a frânei electrice, de minimum 50 kN, prin blocul de comanda AFB se activează ventilele magnetice ale frânei pneumatice de la cele două boghiuri ale locomotivei.

La o nefuncționare a frânei electrice (cădere), devine activă frâna pneumatică, pregătită anterior.

La frânări rapide (între 200 km/h și 98 km/h), forța de frânare electrică lucrează conjugat cu frâna pneumatică.

Analizele anterioare [3] au indicat avantajele utilizării motorului asincron ca motor de tracțiune pe locomotivele de putere medie, capabile să funcționeze universal (alimentate atât de la rețeaua de curent alternativ, cât și de la cea de curent

continuu). Cerința actuală, de exploatare feroviară la viteze mari (200-300 km/h), a impus perfecționarea sistemelor de frânare. Datorită acestui fapt, multe administrații de cale ferată, printre care Germania [2], [3], Spania [5], Italia [9], Franța [4], [21], Japonia [12], și-au îndreptat atenția spre realizarea unor locomotive electrice cu motoare asincrone trifazate, având ca frână de bază frâna electrică (de rețea și rezistivă), frâna pneumatică fiind auxiliară.

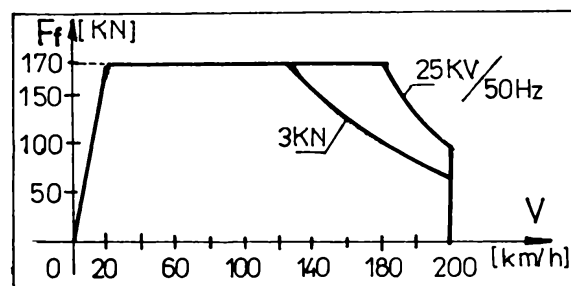
Remarcabile, din acest punct de vedere, sunt rezultatele consorțiului ABB - Kraus Maffei - Thyssen Henschel, care a realizat locomotiva universală S 252 pentru căile ferate spaniole (RENFE). În aprilie 1994, a fost predată beneficiarului prima locomotivă S 252 din cele 75 comandate.

Locomotiva S 252 este de tip Bo-Bo, cântărește 88 tone, atinge viteza maximă de 220 km/h și poate funcționa atât la 25 kV/50 Hz, cât și la 3 kV curent continuu.

Frâna electrică acționează în rețeaua de 25 kV/50 Hz, recuperativ, cu o putere de 5600 kW. Forța de frânare maximă este de aproximativ 170 kN (figura 8) și se realizează la viteze cuprinse între 10 și 120 km/h.

Figura 8. Diagrama forței de frânare electrică la locomotiva S 252.

F_f - forța de frânare;
V - viteza locomotivei.



În cazul în care rețeaua nu poate prelua parțial sau total puterea de frânare produsă, frâna electrică rezistivă va fi activată automat.

În rețeaua de curent continuu de 3 kV, frâna electrică rezistivă acționează cu o putere de 3000 kW.

Elementele de acționare și reglare sunt ordonate de un bloc central cu comandă automată ZSG.

Comanda frânării se face ca la locomotiva E.120 (prin regulator, semnal de alarmă sau instalații de control punctual al vitezei). În vederea optimizării operațiilor de frânare și pentru evitarea patinărilor, s-a introdus sistemul K-MICRO care

prelucrează semnalele în microprocesoare și transmite comenzi diferențiale de acționare la ventilele magnetice duble de la comanda frânei.

O diagnoză în sistem integrat suplimentează puterea de acționare a ansamblului. Această instalație preia mișcările roților de la 0 (zero) km/h, transmite prin senzorii K-MICRO, și asigură protecția osiilor împotriva blocării până la viteza de 2 km/h.

Fiecărui motor asincron trifazat M1...M4 (tip 1 TB 2824, puterea de durată de 1400 kW, răcire exterioară forțată) îi corespunde sistemul de redare a energiei, compus din: transformatorul alternativ de tensiune și frecvență PWR, format din module de diode și tiristoare GTO. Contactorii de reglaj A1...A7 permit alimentarea de la sistemul de 25 kV/50 Hz până la sistemul de curent continuu de 3 kV.

În figura 9 este redată schema de principiu a circuitelor de forță pentru electromotoarele de tracțiune.

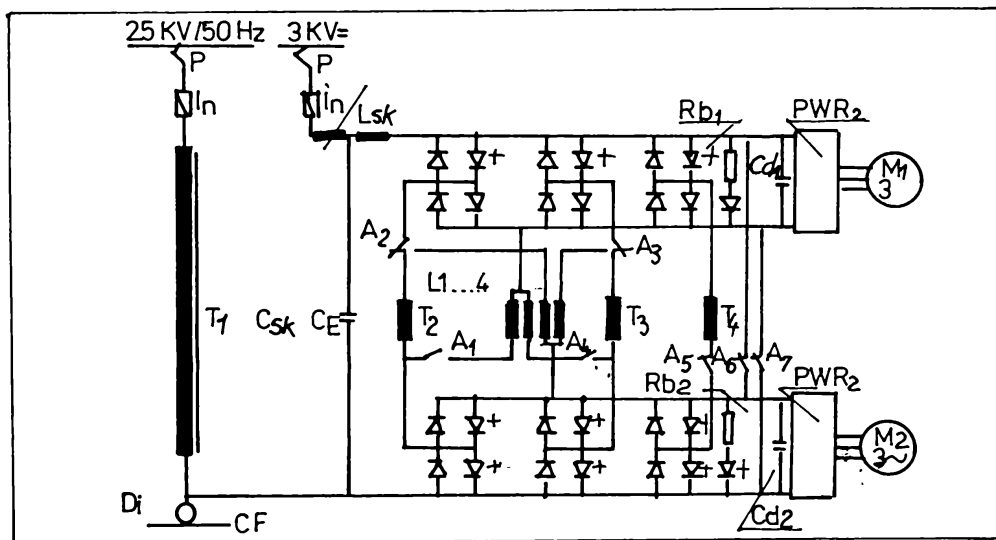


Figura 9. Circuitele principale ale locomotivei electrice S.252.

$L_{sk}+C_{sk}$ -filtre de protecție (bobină + condensator);
 A1...A7-contactori de reglaj; PWR1-2-transformator de tensiune și frecvență; R_{b1-2} -rezistențe de limitare;
 T2...T4-bobine de stingere; L1...L4-bobine de aplatizare;
 C_{d1-2} -circuit intermediar; M1-2-motor asincron trifazat;
 T1-transformator principal; I_n -întrerupător

ultrarapid; p-pantografe; Di-dispozitiv de întoarcere; CF-șina de cale ferată.

1.3.2. Necesitatea dezvoltării cercetărilor privind funcționarea frânei de rețea la vehiculele feroviare

Variantele diferitelor tipuri de locomotive și instabilitatea constructivă (inclusiv la S.252), demonstrează că frâna electrică nu este încă atât de perfecționată încât să i se exploateze în totalitate avantajele, printre care cele mai importante ar fi:

- creșterea forței de frânare, utilizând la maximum aderența combinată cu uzura minimă a sistemului roată-șină;
- stabilitatea electrică în timpul proceselor tranzitorii, influența acestora asupra sistemului generator-filtru-convertor;
- frânarea până la oprire și circulația în sens invers;
- perfecționarea metodelor de reglare și comandă la viteze mari funcție de diferite programe de mers.

La rândul său, motorul asincron trifazat conferă o serie de avantaje care, de asemenea, nu sunt exploatare în întregime [22], [23].

Mai rămân de rezolvat o serie de probleme auxiliare ale procesului de frânare recuperativ, ca de exemplu:

- siguranța în cedarea energiei firului de contact;
- alimentarea în sistemul național, peste substația de tracțiune;
- siguranța rețelei (căderea alimentării din rețea);
- protecția echipamentului de forță și comandă;
- influența frânei de rețea asupra circuitelor de cale;
- analiza și protecția la armonicile superioare;
- acționarea comună frână de rețea / frână rezistivă.

Prezenta lucrare tratează majoritatea din aceste probleme.

Prin contribuțiile aduse la sistemele de comandă și reglare automată-personalului de locomotivă i se reduce obligațiile privind supravegherea comenzilor, ceea ce îi permite să se concentreze asupra circulației.

Evoluția în continuare a electronicii de putere și a noilor

tipuri de mașini electrice lasă loc pentru noi performanțe ale frânei electrice recuperative.

Dacă realizarea magistralelor feroviare europene pentru viteze de 200–300 km/h a devenit o realitate, firmele ABB Henshel, Krauss-Maffei și Siemens se gândesc, deja, la un vehicul feroviar care să circule cu 1200 km/h și care, de exemplu, ar putea lega Marsilia cu Moscova [3].

Această tendință generală de creștere a vitezelor de circulație trebuie dublată de cercetări privind sistemele de frânare.

La noi în țară, cercetările în domeniu se preocupă atât de necesitatea perfecționării frânei electrice recuperative, cât și de lămurirea problemelor tehnice legate de aceasta, probleme care nu sunt suficient reflectate în literatura de specialitate.

Aceste studii sunt necesare atât administrației de cale ferată, cât și industriei constructoare de vehicule feroviare, astfel încât cerințele transporturilor feroviare europene să poată fi rezolvate favorabil și de către SNCFR.

1.4. Determinarea parametrilor de funcționare ai motorului asincron trifazat în regim de generator

Din literatura de specialitate [7], [14], [22], se cunoaște că modificarea turației motorului asincron se face conform relației:

$$n = f_1 \frac{(1-s)}{p_1} \quad (1)$$

în care:

n - turația rotorului;

p_1 - numărul perechilor de poli statorici;

f_1 - frecvența de alimentare statorică;

s - alunecarea.

Alunecarea s este definită ca fiind diferența dintre turația câmpului învârtitor n_1 și turația rotorică n :

$$s = \frac{n_1 - n}{n} < 0 \quad (2)$$

care în regim de generator este negativă ($n > n_1$; $s < 0$).

Punând condiția (2) relației (1), se obține:

$$s = 1 - n \frac{p_1}{f_1} < 0 \quad \text{sau} \quad n \frac{p_1}{f_1} > 1 \quad (3)$$

Din relația (3) rezultă că alunecarea s se poate controla prin:

- modificarea numărului de poli statorici;
- modificarea frecvenței de alimentare;
- modificarea turației rotorice.

În afară de aceste metode de reglare care sunt puse în evidență prin relația (3) se mai cunosc și altele bazate pe studiul caracteristicilor mecanice și ale regimurilor de funcționare ale motoarelor asincrone. Aceste metode se referă la modificarea tensiunii de alimentare a motorului asincron sau la alimentarea motorului asincron trifazat cu tensiune asimetrică.

Alte metode de reglare a turației motorului asincron se referă la funcționarea acestuia în regim de dublă alimentare sau în cascadă. De asemenea, se cunosc posibilitățile de reglare prin construcții speciale ale motorului asincron sau prin comanda lor prin impulsuri.

Modificarea numărului de perechi de poli ai statorului unui motor asincron se poate face numai dacă motorul asincron este construit special în acest scop. Construcția specială constă în dispunerea pe fiecare fază a înfășurării statorice a câte două semibobine care pot fi legate fie în serie, fie în paralel (figura 10).

Legarea semibobinelor în serie se poate face fie în montajul în stea (figura 10.a), fie în montaj în triunghi (figura 10.b).

La legarea semibobinelor în paralel, montajul se face în stea dublă.

Trecerea de la montajul în stea sau în triunghi la montajul în stea dublă, se realizează așa cum indică schemele interme-

diare din figura 10.a și 10.b.

Modul cum se realizează trecerea de la $2p$ perechi de poli la p perechi de poli se poate urmări din figura 11.

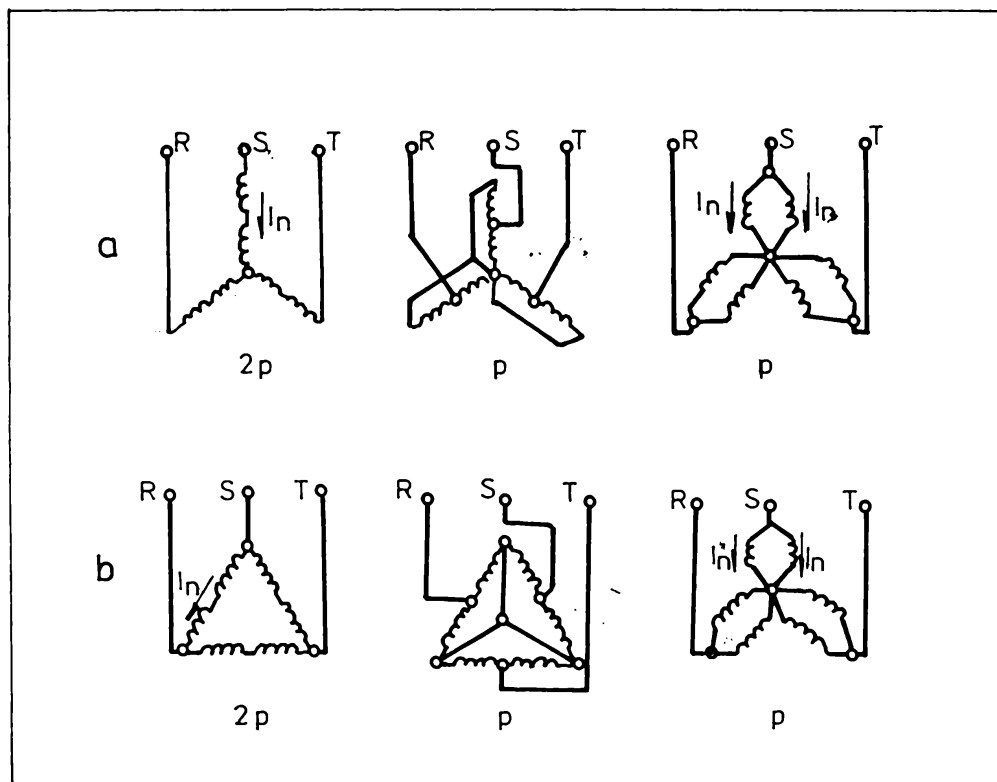


Figura 10. Construcția bobinajului statoric la un motor asincron pentru schimbarea numărului de poli.

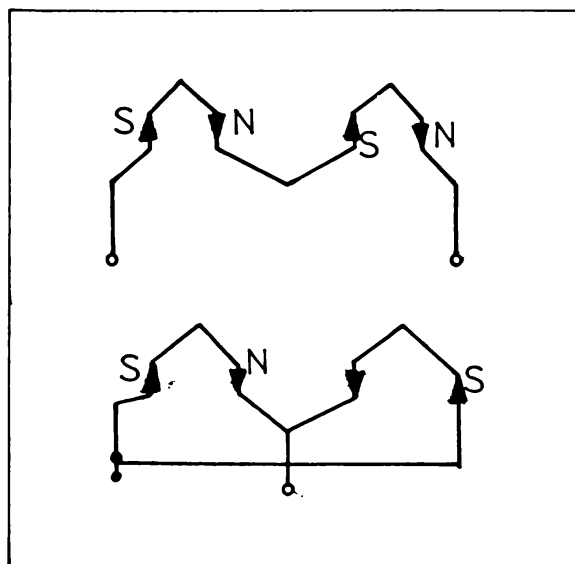


Figura 11.
Trecerea de la $2p$ perechi la p perechi de poli.

Reglarea vitezei la trecerea de la montajul în stea simplu la montajul în stea dublă se face cu cuplu constant ($C_Y=C_{YY}$). În figura 12 sunt prezentate caracteristicile de reglare ce se obțin în acest caz.

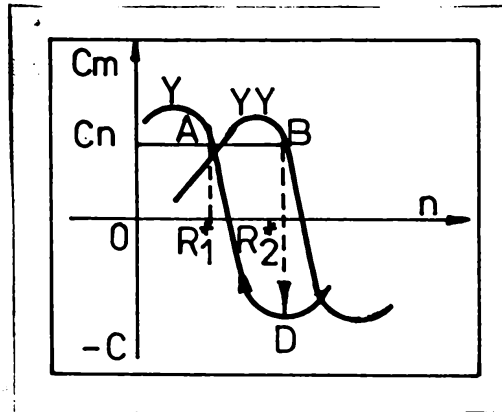


Figura 12.

Caracteristicile de reglare obținute prin comutarea numărului de poli prin trecerea de la montajul de stea simplă în stea dublă.

Trecerea de la viteza n_2^* la n_1^* se face plecând de la punctul de funcționare B, de pe caracteristica de reglare YY, în punctul D de pe caracteristica dereglare Y, la aceeași viteză n_2^* ca și punctul B, de unde apoi punctul de funcționare se deplasează spre A, punct în care funcționarea motorului se stabilizează la viteza unghiulară n_1^* .

După cum se observă aceasta trecere se face prin funcționarea motorului în regim de frânare cu recuperare de energie, cuplul de frânare contribuind la scăderea vitezei unghiulare de la n_2^* la n_1^* .

Cuplul electromagnetic al motorului asincron trifazat, în regim de generator este dat de relația:

$$C_g = - \frac{m_s p_1 U_1^2 \frac{I_2}{s}}{2\pi f_1 \left[(r_1 + a \frac{\sqrt{2}}{s})^2 + (X_1 + a X_2)^2 \right]} \quad (4)$$

în care:

C_g - cuplul electromagnetic al generatorului;

m_s - numărul de faze ale statorului;

p_1 - numărul de perechi de poli ai statorului;

U_1 - tensiunea statorică pe fază;

- r_1 - rezistența activă a fazelor statorului;
 r_2 - rezistența activă a fazelor rotorului;
 s - alunecarea;
 f_1 - frecvența rețelei de alimentare;
 X_1 - rezistența reactivă a statorului;
 X_2 - rezistența reactivă a rotorului;
 a - constanta statorului (care la puteri ridicate se poate considera a ~ 1).

Dacă se notează cu X_d - reactanța de dispersie totală ($X_d = X_1 + aX_2$) și se ține cont că $m_s = 3$, relația (4) devine:

$$C_g = -0,478 \frac{p I_2 U_1^2}{f_1 s \left[\left(r_1 + \frac{2}{s} \right)^2 + X_d^2 \right]} \quad (5)$$

Cuplul maxim, corespunzător regimului de generator corespunde alunecării determinate de relația:

$$\frac{dC_g}{ds} = 0 \quad (6)$$

Aplicând relația (6) pentru relația (5) reiese alunecarea maximă s_m :

$$s_m = - \frac{I_2}{\sqrt{I_1^2 + X_d^2}} \quad (7)$$

Înlocuind în relația (5), alunecarea s cu s_m , dată de relația precedentă, la funcționarea în regim de generator rezultă cuplul maxim:

$$C_{mg} = -0,239 \frac{p U_1^2}{f_1 (\sqrt{I_1^2 + X_d^2} - I_1)} \quad (8)$$

C_{mg} , în valoare absolută este cu puțin mai mare decât la funcționarea în regim de motor. Se pot realiza astfel forțe de frânare de 125...250 kN, funcție de tipul și numărul de motoare

de tracțiune.

Frecările din mecanisme și rezistențele de natură mecanică, acționează în sensul frânării, astfel că puterea de frânare este în general mai mare decât cea de acționare (locomotivă electrică poate frâna recuperativ, la o viteză și pe o anumită pantă un tren de tonaj mai mare decât cel pe care îl remorcă, cu aceeași viteză, pe o rampă cu aceeași declivitate și fără supraîncălzirea motoarelor) [10], [11].

Relațiile de raportare la stator a mărimilor r_2 și X_2 sunt:

$$r_2 = r_{2a} \frac{m_s}{m_r} \left(\frac{w_s k_{ws}}{w_r k_{wr}} \right)^2; X_2 = X_{2r} \frac{m_s}{m_r} \left(\frac{w_s k_{ws}}{w_r k_{wr}} \right)^2$$

Pentru rotorul în scurtcircuit, ținând cont că $m_r = Z_r$, $w_r = 1/2$ și $k_{wr} = 1$, se obține:

$$r_2 = \frac{r_{2a}}{Z_r} 4m_s (w_s \cdot k_{ws})^2$$

și

$$X_2 = \frac{X_{2r}}{Z_r} 4m_s (w_s \cdot k_{ws})^2 \quad (12)$$

în care:

r_{2a} - rezistența activă a rotorului;

X_{2r} - rezistența reactivă a rotorului;

m_s - numărul de înfășurări pe fază la stator ($m_s = 3$);

w_s - numărul de spire, pe fază ale statorului;

k_{ws} - factorul de înfășurare al statorului;

Z_r - numărul de creștături la rotor.

Numărul de creștături la stator se calculează cu relația:

$$Z_s = 2p \cdot m_s \cdot q_s$$

Valorile lui q_s în funcție de numărul de poli, se pot adapta din tabelul 2 [17], [22].

Tabelul nr.2

Valorile coeficientului q_s ($2p$)

$2p$	4	6	8	12
q_s	4-6	3-5	3-4	2-3

Intre numărul de creștături din stator și din rotor trebuie respectate anumite condiții. Rezultatele satisfăcătoare se obțin când Z_r diferă cu 15-30 % față de Z_s .

Factorul de înfășurare al înfășurării trifazate în două straturi cu pas diametral se pot adapta din tabelul nr.3.

Tabelul nr.3

Valorile factorului k_{ws} (q_s)

q_s	2	3	4	5	6	7	8	9
k_{ws}	0,966	0,960	0,958	0,957	0,957	0,957	0,956	0,955

Atât Z_s , cât și Z_r trebuie să fie un număr întreg.

Pentru o tensiune constantă a curentului de alimentare, curba $C_e(s)$ se reprezintă ca în figura 13. Când $-1 < s < 0$, funcționarea corespunde regimului de generator, când $0 < s < 1$, funcționarea corespunde regimului de motor.

Prin urmare, mașina asincronă funcționează în regim de generator pentru alunecări cuprinse între 0 și -1.

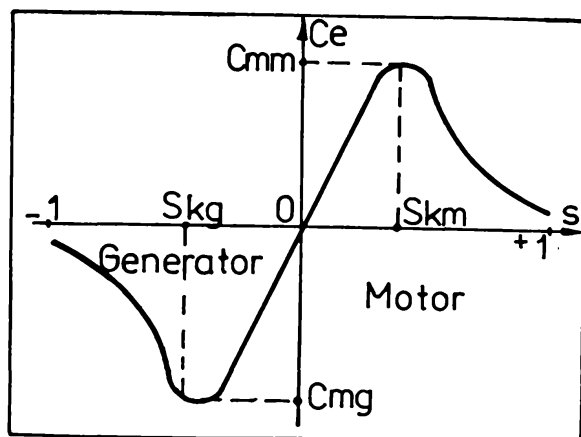


Figura 13.
Caracteristica $C_e(s)$.

Atunci când puterea motoarelor asincrone este de ordinul a sute de kW, se pot admite aproximațiile [1], [8]:

- rezistența înfășurării statorice r_1 este foarte mică în raport cu rezistența înfășurării rotorice r_2 ;
- rezistența r_2 are și ea valori relativ mici;
- valoarea expresiei $(r_1 + ar_2/s)$ este foarte mică în raport cu pătratul expresiei $(X_1 + aX_2)$ și poate fi neglijată;
- expresia sumei pătratice de reactanță se poate exprima:

$$(X_1 + aX_2)^2 = 4\pi^2 (L_1 + aL_2)^2$$

- în zona liniară a caracteristicii de magnetizare a motorului, suma $(L_1 + aL_2)$ are valori aproape constante.

Luând în considerare aceste simplificări, expresia cuplului din (4) are forma:

$$C_g = - \frac{m_p D_1 I_2}{(2\pi)^3 (L_1 + aL_2)^2} \cdot \frac{U_1^2}{sf_1^3} \quad (14)$$

în care:

L_1 - inductanța statorică;

L_2 - inductanța rotorică raportată la stator.

În ipoteza neglijării reactanței de dispersie și a rezistenței statorului, tensiunea pe fază redată de generator va fi:

$$U_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f_1 w_s K_{ws} \Phi_s \quad (15)$$

în care:

U_1 - tensiunea statorică pe fază;

f_1 - frecvența statorică;

w_s - numărul de spire pe fază la stator;

K_{ws} - factorul de înfășurare;

Φ_s - valoarea maximă a fluxului fascicular.

În acest caz, puterea debitată la convertorul static de frecvență va fi:

$$P = 3U_1 I_1 \cos \varphi \quad (16)$$

în care:

I_1 - curent statoric;

$\cos \varphi$ - factorul de putere.

Puterea reactivă absorbită de la rețea va fi:

$$Q = 3U_1 I_1 \sin \varphi \quad (17)$$

iar randamentul generatorului asincron este dat de relația:

$$\eta_g = \frac{3U_1 I_1 \cos \varphi}{C_g \cdot \Omega} \quad (18)$$

în care:

η_g - randamentul generatorului asincron;

Ω - viteza unghiulară de rotație.

În subcapitolul 1.5. este redat un program de determinare a parametrilor de funcționare pentru generatorul asincron trifazat, executat în limbaj Turbo Pascal 6.0.

Tipul motorului de tracțiune, respectiv parametrii de funcționare sunt impuși de condițiile beneficiarului asupra vehiculului de tracțiune (călători-marfă, viteză maximă, puterea instalată, tonaj necesar pentru frânare).

Analiza detaliată separată se pot extinde și pentru motorul asincron trifazat cu bare înalte sau cu dublă colivie.

1.4.2. Generator asincron în regim dinamic autoexcitat

În cazul în care rețeaua nu primește, respectiv când nu există alte vehicule în stare de pornire sau mers, CSF este decuplat de la circuitul de înaltă tensiune.

Fenomenul de neacceptare a energiei recuperate este sesizat de la divizor de tensiune prin creșterea tensiunii în linia de contact. Autoexcitația este asigurată de la bateria de condensatoare din grupul de stingere al invertorului prin aprinderea succesivă a tiristoarelor acestui grup cu o frecvență de trei ori mai mare decât frecvența invertorului, asigurând, în felul acesta energia reactivă a mașinii.

În momentul începerii frânării, la bornele de intrare ale invertorului se cuplează o rezistență pentru disiparea puterii

active (figura 14).

Pornirea autoexcitației se face de la o sursă auxiliară prin cuplarea întrerupătorului K. Acest întrerupător rămâne cuplat până când tensiunea dată de mașina de inducție funcționând ca generator depășește pe cea a sursei auxiliare. Fiecare vehicol dispune de o baterie de acumulatori pentru asigurarea iluminatului în cazul căderii rețelei de curent continuu.

În continuare, excitația este asigurată prin mecanismul comutației inverterului [9], [16], [33].

Inverterul fiind decuplat de la rețea, mașina preia energia reactivă necesară magnetizării sale de la condensatorul C prin mecanismul comutației inverterului, iar energia electrică activă de care dispune o debitează rezistenței R_f , care o disipă sub formă de căldură.

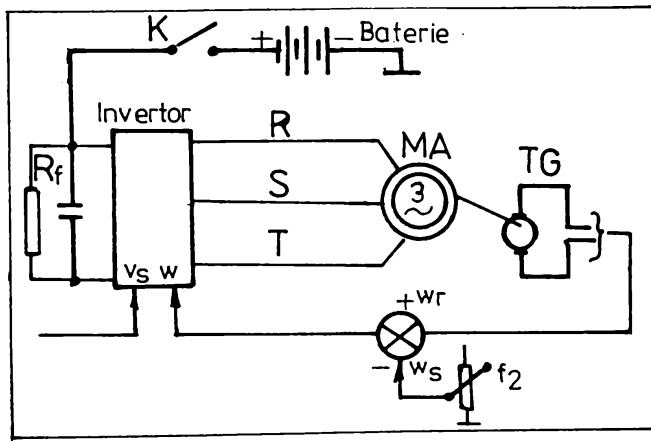


Figura 14.
Schema electrică principală a generatorului de inducție autoexcitat.

Pentru studierea acestui regim de funcționare a generatorului asincron, se înlocuiește o schemă electrică echivalentă în care rezistența R_f și capacitatea C din grupul de stingere sunt distribuite pe fazele mașinii, rezultând rezistența R_{fe} și C_e pe fiecare fază.

Schema electrică echivalentă pentru o fază este prezentată în figura 15.

Valoarea rezistenței R_{fe} în funcție de R_f se deduce din egalitatea puterilor active disipate în cele două situații:

$$R_f I_d^2 = 3 R_{fe} (I_s \cos \varphi)^2 \quad (19)$$

Stim că $U_s = 2U_d / \pi$. Din egalitatea puterii în curent continuu cu puterea activă din mașină:

$$U_d \cdot I_d = 3 U_s \cdot \cos \varphi \quad (20)$$

Rezultă că:

$$I_s \cdot \cos \varphi = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} I_d \quad (21)$$

iar

$$R_{fe} = \frac{6}{\pi^2} R_f \quad (22)$$

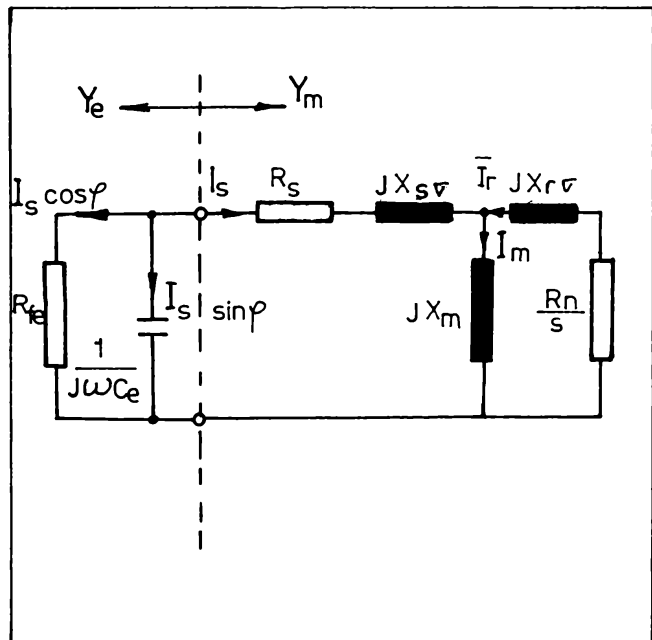


Figura 15.
Schema electrică echivalentă
monofilară a generatorului
de inducție autoexcitat.

Capacitatea C_e se determină din egalitatea puterilor reactive ținând cont că frecvența ω_c a grupului de stingere din inverter este de trei ori mai mare decât frecvența ω_1 de ieșire a

invertorului:

$$W_c \cdot C \cdot U_d^2 = 3W_1 \cdot C_e \cdot U_s^2$$

și $W_c = 3W_1$, de unde rezultă:

$$C_e = \frac{\pi^2}{2} C \quad (23)$$

Curentul reactiv din mașină se determină în funcție de frecvența statorică și tensiunea la intrare în invertor U_0 .

$$W_c C U_d^2 = 3U_s (I_s \cdot \sin\varphi) \quad (24)$$

cum $W_c = 3W_1$, rezultă:

$$3W_1 C U_d^2 = 3U_s (I_s \cdot \sin\varphi) \quad (25)$$

Tinând cont că: $U_s = \sqrt{2} U_d / \pi$, obținem:

$$\frac{\pi\sqrt{2}}{2} W_1 C U_d = I_s \sin\varphi \quad (26)$$

Sau în funcție de capacitatea C_e

$$\frac{\sqrt{2}}{\pi} W_1 C_e U_d = I_s \sin\varphi \quad (27)$$

Pentru mașina cu parametrii conform schemei din figura 15 se scriu ecuațiile în sistemul de axe (d,q) care se rotește sincron cu câmpul învârtitor, considerând alunecarea negativă:

U_{sd}	=	$R_s + pL_s$	$-W_1 L_s$	pL_m	$-W_1 L_m$.	I_{sd}
U_{sq}		$W_1 L_s$	$R_s + pL_s$	$-W_1 L_m$	pL_m		I_{sq}
0		pL_m	$-sW_1 L_m$	$R_r + pL_r$	$-sW_1 L_r$		I_{rd}
0		$sW_1 L_m$	pL_m	$sW_1 L_r$	$R_r + pL_r$		I_{rq}

(28)

Saturația circuitului magnetic este un factor important în

$$m_g = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2} L_m (i_{sd} i_{rq} - i_{sq} i_{rd}) \quad (29)$$

analiza regimului de generator autoexcitat.

Inductivitatea de magnetizare L_g a mașinii este variabilă, depinzând de flux și de turația câmpului.

În sistemul rotitor cu turația câmpului, în regim staționar, curenții și tensiunile sunt mărimi continue; rezistențele, inductivitățile de dispersie și cea utilă sunt cele ale mașinii reale.

Ecuațiile mașinii în regim de generator autoexcitat scrise în sistemul clasic:

$$\overline{U}_s = \overline{E} - \overline{I}_s (R_s + jX_{sq})$$

$$0 = \overline{E} - \overline{I}_r (R_r / s + jX_{rq}) \quad (30)$$

$$\overline{E} = jX_m \overline{I}_r$$

$$\overline{I}_r = \overline{I}_s + \overline{I}_m$$

Caracteristica de magnetizare și variația inductivității de magnetizare cu saturația este prezentată în figura 16.

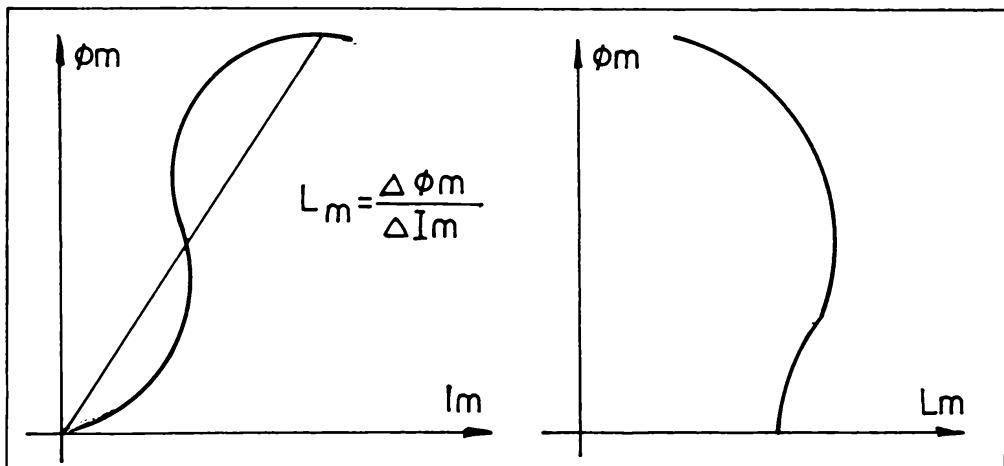


Figura 16. Caracteristica de magnetizare și variația lui L_g cu fluxul.

Condiția de autoexcitație a schemei din figura 15 este:

$$Y_e + Y_m = 0 \quad (31)$$

unde Y_e este admitanța rezistenței R_e în paralel cu capacitatea C_e

$$Y_e = \frac{1}{R_{ef}} + j\omega C_e \quad (32)$$

iar Y_m este admitanța de intrare a mașinii de inducție:

$$\frac{1}{R_{ef}} + j\omega C_e + Y_m = 0 \quad (33)$$

Y_m este inversa impedanței formată de impedanța statorică a mașinii în serie cu impedanța rotorică în paralel cu cea de magnetizare.

$$\overline{Z} = \overline{Z}_s + \frac{\overline{Z}_m \cdot \overline{Z}_r}{\overline{Z}_m + \overline{Z}_r} \quad (34)$$

$$\overline{Y}_m = \frac{1}{\overline{Z}} = \frac{\overline{Z}_m + \overline{Z}_r}{(\overline{Z}_s + \overline{Z}_r) \overline{Z}_m + \overline{Z}_s \cdot \overline{Z}_r} \quad (35)$$

unde:

$$\overline{Z}_s = R_s + jX_{s0}$$

$$\overline{Z}_r = \frac{R_r}{s} + jX_{r0}$$

$$\overline{Z}_m = jX_m$$

Înlocuind impedanțele cu valorile de mai sus și efectuând calculele se obține:

$$Y_m = \frac{\frac{R_r}{S} + j(X_m + X_{r0})}{\left[\left(R_s + \frac{R_r}{S} \right) + j(X_{s0} + X_{r0}) \right] jX_m + (R_s + jX_{s0}) \left(\frac{R_r}{S} + jX_r \right)} \quad (36)$$

$$Y_m = \frac{\frac{R_r}{S} + jX_r}{\left(\frac{R_s R_r}{S} - X_{s0} X_r - X_{r0} X_m \right) + j \left(R_s X_r + \frac{R_r}{S} X_{s0} + \frac{R_r}{S} X_m \right)}$$

unde: X_{s0} - reactanța de dispersie statorică;

X_{r0} - reactanța de dispersie rotorică;

X_m - reactanța de magnetizare;

$X_s = X_m + X_{s0}$ - reactanța statorică totală;

$X_r = X_m + X_{r0}$ - reactanța rotorică totală.

Se notează cu:

$$A = \frac{R_s R_r}{S} - X_{s0} X_r - X_{r0} X_m$$

și

$$B = R_s X_r + \frac{R_r}{S} X_s$$

Cu aceasta, relațiile (36) și (37) devin:

$$Y_m = \frac{\frac{R_r}{S} + jX_r}{A + jB} = \frac{\left(\frac{R_r}{S} + jX_r \right) (A - jB)}{A^2 + B^2} \quad (38)$$

$$Y_m = \frac{\frac{R_r}{S} A + B X_r}{A^2 + B^2} + j \frac{A X_r - \frac{R_r}{S} B}{A^2 + B^2} \quad (39)$$

Înlocuind relația (39) în (33) se obține:

Se egalează atât partea reală, cât și cea imaginară cu zero.

$$\frac{1}{R_{fe}} + jW_1 C_e + \frac{\left(\frac{R_r}{s}\right) A + BX_r}{A^2 + B^2} + j \frac{AX_r - \frac{R_r}{s} B}{A^2 + B^2} = 0 \quad (40)$$

$$\frac{1}{R_{ef}} + \frac{\left(\frac{R_r}{s}\right) A + BX_r}{A^2 + B^2} = 0 \quad (41)$$

$$W_1 C_e + \frac{AX_r - \frac{R_r}{s} B}{A^2 + B^2} = 0$$

În această fază, problema determinării inductivității de magnetizare în perioada de frânare funcție de parametrii mașinii, suportă două direcții de discuții:

- în cazul când nu există rezistență cuplată la intrarea inverterului (în acest caz $R_{r2} = \infty$); energia mecanică este transformată în căldură în rezistența statorică și rotorică a mașinii.

Această situație nu o analizăm, nu e cazul în tracțiunea feroviară (tensiunile pe faze ating 400, ..., 1200 V, iar curentul până la 300, ..., 500 A).

- la intrarea în inverter se cuplează o rezistență finită R_{fe} .

Această situație este obligatorie în tracțiunea feroviară datorită motivațiilor arătate la începutul subcapitolului 1.4.2. Condițiile impuse de U.E.C.F. [35], [41], [42] prevăd existența obligatorie la locomotivele și trenurile electrice a R_{fe} .

În acest caz, relațiile (41) pentru R_{fe} având valoare finită devin:

$$\frac{1}{R_{fe}} + \frac{\frac{R_r}{s} A + BX_r}{A^2 + B^2} = 0 \quad (42)$$

$$A^2 + B^2 + R_{fe} \frac{R_r}{s} A + R_{fe} BX_r = 0 \quad (43)$$

Inlocuind pe A și B cu valorile:

$$A = \frac{R_s R_r}{S} - X_{s\sigma} X_r - X_{r\sigma} X_m \quad (44)$$

și

$$B = R_s X_r + \frac{R_r}{S} X_s$$

avem:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{R_s R_r}{S} - X_{s\sigma} X_r - X_{r\sigma} X_m \right)^2 + \left(R_s X_r + \frac{R_r}{S} X_s \right)^2 + \\ & + R_{fe} \frac{R_s}{S} \left(\frac{R_s R_r}{S} - X_{s\sigma} X_r - X_{r\sigma} X_m \right) + R_{fe} X_r \left(R_s X_r + \frac{R_r}{S} X_s \right) = 0 \quad (45) \end{aligned}$$

Efectuând calculele se obține o ecuație de gradul doi în L_m de forma:

$$DL_m^2 + FL_m + G = 0 \quad (46)$$

unde:

$$\begin{aligned} D &= W_1^2 \left[SR_r + S^2 R_s + \frac{(R_r^2 + R_s R_r S + (X_{s\sigma} + X_{r\sigma})^2 S^2)}{R_s + R_{fe}} \right] \\ F &= W_1 \left[2R_s X_{r\sigma} S^2 + \frac{2(X_{s\sigma} X_{r\sigma}^2 + X_{s\sigma}^2 X_{r\sigma}) S^2 + 2X_{s\sigma} R_r^2}{R_s + R_{fe}} \right] \\ G &= (R_s R_r^2 + S^2 R_s X_{s\sigma}^2 + \frac{R_r^2 X_{s\sigma}^2 + S^2 X_{s\sigma}^2 X_{r\sigma}^2}{R_s + R_{fe}}) \end{aligned}$$

Neglijând termenii care conțin produsele la pătrat a reactanțelor de dispersie cu alunecarea, din cauza valorilor foarte mici, se obțin pentru coeficienții D, F și G valorile:

$$D = W_1^2 \left(sR_r + s^2 R_s + \frac{R_r^2}{R_r + R_{fe}} \right) \quad (47)$$

$$F = 2W_1 \left(s^2 R_s X_{rs} + \frac{R_r^2 X_{ss}}{R_s + R_{fe}} \right) \quad (48)$$

$$G = R_s \cdot R_r^2 \quad (49)$$

Cu aceasta, soluția ecuației (46) este:

$$L_m = - \frac{s^2 R_s L_{rs} + \frac{R_r^2 L_{ss}}{R_s R_{fe}}}{s^2 R_s + sR_r + \frac{R_r^2}{R_s + R_{fe}}} +$$

$$+ \sqrt{\frac{s^2 R_s L_{rs} + \frac{R_r^2 L_{ss}}{R_s + R_{fe}}}{s^2 R_s + sR_r + \frac{R_r^2}{R_s + R_{fe}}} - \frac{R_s}{W_1^2} \frac{R_r^2}{s^2 R_s + sR_r + \frac{R_r^2}{R_s + R_{fe}}}} \quad (50)$$

Domeniul de existență al inductivității L_m funcție de alunecare este între rădăcinile ecuației.

$$s^2 R_s + sR_r + \frac{R_r^2}{R_{fe} + R_s} = 0 \quad (51)$$

cu soluțiile:

$$s_{1,2} = \frac{-R_r \pm \sqrt{R_r^2 - \frac{4R_r^2 R_s}{R_s + R_{fe}}}}{2R_s} \quad (52)$$

Efectuând calculele, rezultă:

$$s_1 = -\frac{R_r}{2R_s} \left(1 + \sqrt{\frac{R_{fe} - 3R_s}{R_s + R_{fe}}} \right) \quad (53)$$

$$s_2 = -\frac{R_r}{2R_s} \left(1 - \sqrt{\frac{R_{fe} - 3R_s}{R_s + R_{fe}}} \right)$$

Ca soluțiile să fie reale, trebuie ca:

$$R_{fe} - 3R_s \geq 0, \quad \text{deci} \quad R_{fe} \geq 3R_s \quad (54)$$

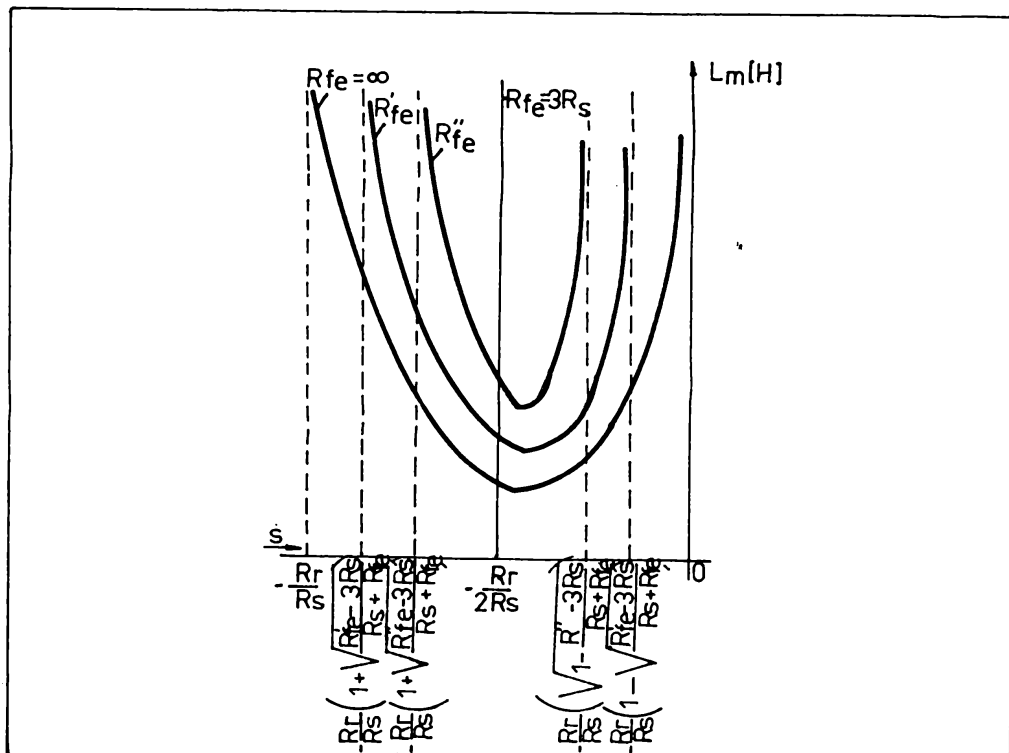


Figura 17. Restrângerea domeniului de variație $L_m = f(s)$ cu modificarea lui R_{fe} .

Cu cât R_{fe} este mai mare, domeniul de variație $L_m = f(s)$ este mai mare.

La $R_{fe} = \infty$ se ajunge la soluția ecuației:

$$s^2 R_s + s R_r \leq 0,$$

cu rădăcinile $s_1 = 0$ și $s_2 = -R_r / R_s$.

Când $R_{fe} = 3R_s$, domeniul de variație $L_m = f(s)$ se reduce la zero.

Tot în figura 17 se observă că prin micșorarea lui R_r începerea frânării la alunecări mai mari în valoarea absolută iar pierderea autoexcitației se face la alunecări mai mici în valoare absolută.

Dacă la alunecări mici în relația (50) se neglijează termenii în s^2 , expresia inductivității mașinii devine:

$$L_m = -\frac{\frac{R_r L_{s0}}{R_s + R_{fe}}}{s + \frac{R_r}{R_{fe} + R_s}} + \sqrt{-\frac{R_s R_r}{W_1^2 \left(s + \frac{R_r}{R_s + R_{fe}}\right)}} \quad (55)$$

Dacă în această expresie valoarea lui L_m se înlocuiește cu inductivitatea utilă a mașinii nesaturată (aceasta fiind inductivitatea maximă) se obține alunecarea de la care nu se mai asigură autoexcitația.

Rezolvând relația (55) în raport cu s și înlocuind L_m cu inductivitatea utilă nesaturată a mașinii, iar termenul care conține inductivitatea de dispersie statorică la pătrat înmulțit cu raportul $(R_r / R_s + R_{fe})^2$ îl neglijăm, se obține:

$$L_{mg}^2 \left(s_0 + \frac{R_r}{R_s + R_{fe}}\right)^2 + \left(s_0 + \frac{R_r}{R_s + R_{fe}}\right) \left(2L_{mg} \frac{L_r L_{s0}}{R_s + R_{fe}} + \frac{R_r R_s}{W_1}\right) = 0 \quad (56)$$

Din relația (56) rezultă soluțiile:

$$s_{01} = -\frac{R_r}{R_s + R_{fe}} \quad (57)$$

$$s_{02} = -\frac{R_r R_s}{W_1 L_{mg}} - \frac{R_r}{R_s + R_{fe}} \left(1 + \frac{2L_{s0}}{L_{mg}}\right)$$

Valoarea alunecării s_{01} corespunde începerii procesului de autoexcitație, iar s_{02} de pierderea autoexcitației.

În funcție de parametrii motorului asincron de tracțiune se poate determina caracteristica $L_m = f(s)$, R_r .

recuperată $P_{ins} = U_d^2 / R_f$.

Caracteristica $L_p = f(s)$ trebuie cunoscută obligatoriu pentru determinarea sistemelor de reglare și comandă (V, cap.III). Domeniul de frânare ar putea fi extins dacă R_{fe} ar avea valori diferite de la valoarea maximă spre situația cu rezistență deconectată.

Se mai cunosc și alte regimuri de frânare ale motorului asincron trifazat: frânarea contracurent (schimbarea conexiunii la rețea a două faze ale statorului), frânare subsincronă monofazică (introducerea în circuitul rotoric a mașinii asincrone cu inele a unei rezistențe variabile); frânarea prin inversarea alimentării unei faze, frânarea prin alimentarea simultană cu două feluri de curenți (prin înfășurarea statorică trec simultan curenți alternativi peste care se suprapune o componentă continuă); frânarea în regim de generator autoexcitat (mașina asincronă se deconectează de la rețea și rămâne conectată la o baterie de condensatoare).

Pentru tracțiunea electrică feroviară, motorul asincron trifazat prezintă interes doar în două regimuri de frânare: frânarea cu recuperare la rularea suprasincronă și frânarea în regim dinamic cu R_f în circuit (frânare reostatică).

1.6. Program de determinare pe calculator a parametrilor generatorului asincron trifazat

SIV 02 - Determinarea parametrilor motorului asincron la rulare suprasincrona

```

uses crt,printer;
var
n1,n,p1,u1,ms,r1,r2,a,x1,x2,cos,sin,s,f1,Cg,Cmg,eta,P,Q,I1,r8,r9,
r10:real;
begin
clrscr;
n1:=520*2*3.14/60;
n:=1072*2*3.14/60;
p1:=12;
u1:=230;
ms:=3;
r1:=0.326;
r2:=0.384;
a:=1;
x1:=4.177;
x2:=4.126;
cos:=0.82;
sin:=0.571;
s:=(n1-n)/n;
f1:=n*p1/(1-s);
r8:=r1+a*r2/s;
r9:=x1+a*x2;
r10:=r1+r2/s;
Cg:=-(ms*p1*u1*u1*sqrt(2)/s)/(2*3.14*f1*sqr(r8)+sqr(r9));
Cmg:=-0.239*(p1*U1*U1)/(f1*sqrt(r1*r1+sqr(r9))-r1);
I1:=U1/(sqrt(r10*r10+r9*r9));
P:=3*U1*I1*cos;
eta:=3*U1*I1*cos*100/(Cg*2*3.14*(n/60));
Q:=3*U1*I1*sin;
writeln('');
writeln('');
writeln('');
writeln('');

```

```

writeln('Parametrii motorului asincron la rulare suprasincrona');
writeln('-----');
writeln('');
writeln('=====');
writeln('  Parametrul      Simbol  Valoare    Unit.mas');
writeln('=====');
writeln('  Alunecarea      s      ',s:5:2,'    -');
writeln('  Frecventa       f1     ',f1:5:2,'    Hz');
writeln('  Cuplul          Cg     ',Cg:5:2,'    N.m');
writeln('  Cuplul          Cmg    ',Cmg:5:2,'    N.m');
writeln('  Curentul        I1     ',I1:5:2,'    A');
writeln('  Puterea activa  P      ',P:5:2,'    W ');
writeln('  Randamentul     ',eta:5:2,'    %');
writeln('  Puterea reactiva Q    ',Q:5:2,'    VAR ');
writeln('=====');
readln;
writeln(LST,'');
writeln(LST,'');
writeln(LST,'');
writeln(LST,'');
writeln(LST,'Parametrii motorului asincron la rulare
s u p r a s i n c r o n a ');
writeln(LST,'-----');
writeln(LST,'');
writeln(LST,'=====');
writeln(LST,'  Parametrul      Simbol  Valoare    Unit.mas');
writeln(LST,'=====');
writeln(LST,'  Alunecarea      s      ',s:5:2,'    -');
writeln(LST,'  Frecventa       f1     ',f1:5:2,'    Hz');
writeln(LST,'  Cuplul          Cg     ',Cg:5:2,'    N.m');
writeln(LST,'  Cuplul          Cmg    ',Cmg:5:2,'    N.m');
writeln(LST,'  Curentul        I1     ',I1:5:2,'    A');
writeln(LST,'  Puterea activa  P      ',P:5:2,'    W ');
writeln(LST,'  Randamentul     ',eta:5:2,'    %');
writeln(LST,'  Puterea reactiva Q    ',Q:5:2,'    VAR ');
writeln(LST,'=====');
end.

```

{SIV 21 - Simulare grafica a variatiei cuplului generator functie de n}

```

uses crt,graph;
const n1=1100*2*3.14/60;
      p1=16;
      u1=220;
      ms=3;
      r1=2.4;
      r2=2.4;
      a=1;
      x1=11.6;
      x2=4.8;
      cos=0.972;
      sin=0.234;
var s,n,n2,f1,Cg,Cmg,eta,P,Q,I1,r8,r9,r10:real;
      z,z1,q1,q2,gd,gm,cg1,cg2:integer;
label s1;
begin
  clrscr;
  gd:=detect;
  initgraph(gd,gm,'');
  if graphresult<>gok then halt(1);
  line(10,250,630,250);
  line(625,245,630,250);
  line(625,255,630,250);
  line(10,10,10,300);
  line(5,15,10,10);
  line(15,15,10,10);
  line(50,245,50,255);
  line(90,245,90,255);
  line(130,245,130,255);
  line(170,245,170,255);
  line(210,245,210,255);
  line(250,245,250,255);
  line(290,245,290,255);
  line(330,245,330,255);
  line(370,245,370,255);

```

```
line(410,245,410,255);
line(450,245,450,255);
line(490,245,490,255);
line(530,245,530,255);
line(570,245,570,255);
outtextxy(620,260,'n');
outtextxy(580,280,'rot/min');
outtextxy(10,260,'150');
outtextxy(40,260,'250');
outtextxy(90,260,'350');
outtextxy(130,260,'450');
outtextxy(170,260,'550');
outtextxy(210,260,'650');
outtextxy(250,260,'750');
outtextxy(290,260,'850');
outtextxy(330,260,'950');
outtextxy(370,260,'1050');
outtextxy(410,260,'1150');
outtextxy(450,260,'1250');
outtextxy(490,260,'1350');
outtextxy(530,260,'1450');
outtextxy(570,260,'1550');
line(8,260,12,260);
line(8,270,12,270);
line(8,240,12,240);
line(8,230,12,230);
line(8,220,12,220);
line(8,210,12,210);
line(8,200,12,200);
line(8,190,12,190);
line(8,180,12,180);
line(8,170,12,170);
line(8,160,12,160);
line(8,150,12,150);
line(8,140,12,140);
line(8,130,12,130);
line(8,120,12,120);
```

```

line(8,110,12,110);
line(8,100,12,100);
line(8,90,12,90);
line(8,80,12,80);
line(8,70,12,70);
line(8,60,12,60);
line(8,50,12,50);
line(8,40,12,40);
line(8,30,12,30);
line(8,20,12,20);
outtextxy(1,250,'0');
outtextxy(10,150,'100');
outtextxy(10,50,'200');
outtextxy(15,15,'Cg');
outtextxy(15,30,'[N.m]');
z:=155;
z1:=0;
q1:=10;
n2:=z+z1;
n:=(z+z1)*2*3.14/60;
s:=(n1-n)/n;
f1:=n*p1/(1-s);
r8:=r1+a*r2/s;
r9:=x1+a*x2;
r10:=r1+r2/s;
Cg:=- (ms*p1*u1*sqrt(2)/s)/(2*3.14*f1*sqr(r8)+sqr(r9));
Cg1:=round(Cg);
Cg2:=250-Cg1;
putpixel(q1,Cg2,2);
q2:=q1+4;
s1:z1:=z1+10;
n2:=z+z1;
n:=(z+z1)*2*3.14/60;
s:=(n1-n)/n;
f1:=n*p1/(1-s);
r8:=r1+a*r2/s;
r9:=x1+a*x2;

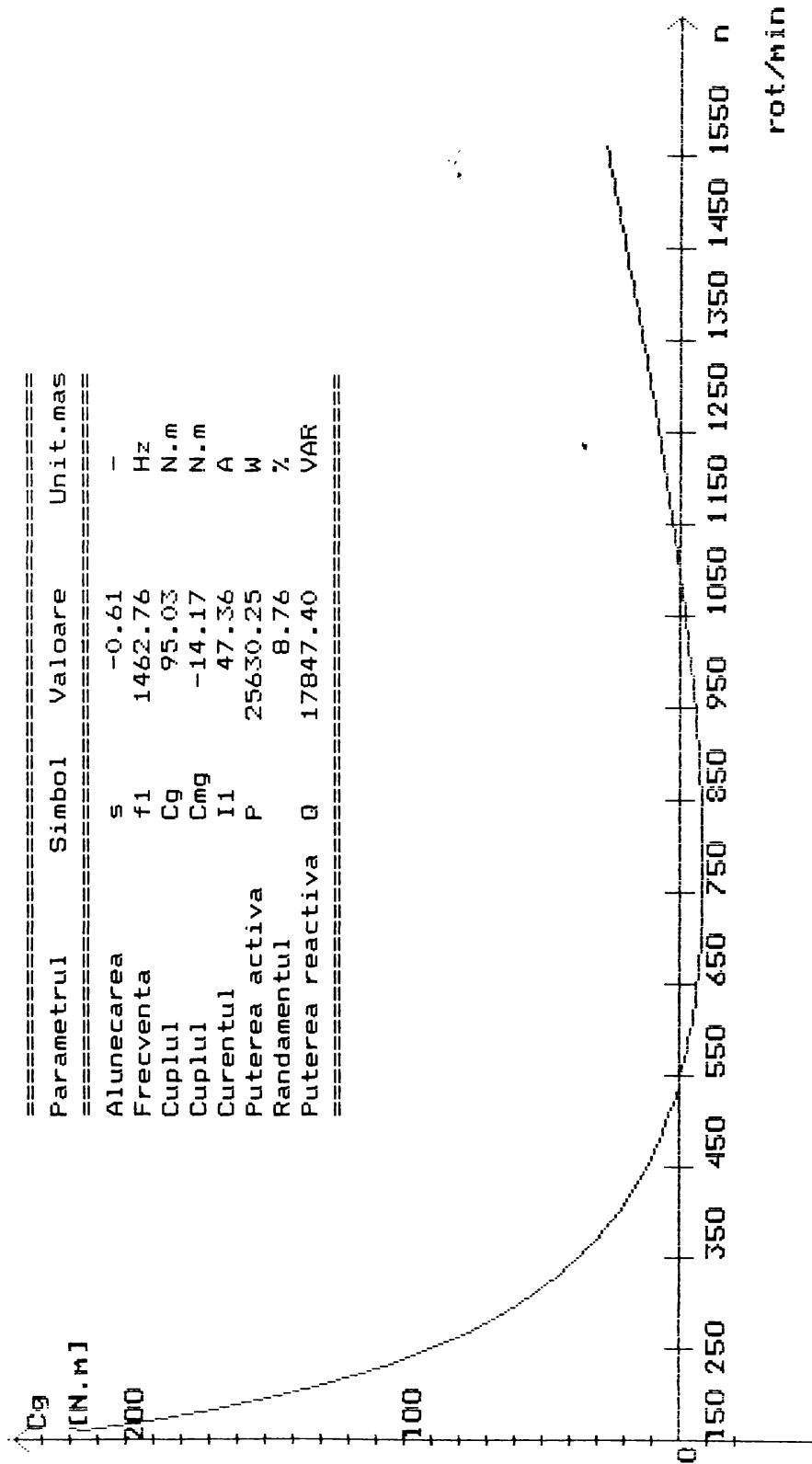
```

```
r10:=r1+r2/s;  
Cg:=- (ms*pi*u1*u1*sqrt(2)/s)/(2*3.14*f1*sqr(r8)+sqr(r9));  
Cg1:=round(Cg);  
Cg2:=250-Cg1;  
lineto(q2,Cg2);  
q2:=q2+4;  
if z1<=1400 then goto s1;  
readln;  
end.
```

Parametrii motorului asincron la rulare suprasincrona

```

=====
Parametrul      Simbol      Valoare      Unit.mas
=====
Allunecarea     s          -0.61        -
Frecventa       f1         1462.76      Hz
Cuplul          Cg          95.03        N.m
Cuplul          Cmg         -14.17       N.m
Curentul        I1          47.36        A
Puterea activa  P           25630.25     W
Randamentul     R            8.76        %
Puterea reactiva Q  17847.40    VAR
=====
    
```



CAPITOLUL II. DETERMINAREA CARACTERISTICILOR DE FRANARE A
LOCOMOTIVELOR ELECTRICE CU MOTOARE ASINCRONE
TRIFAZATE

2.1. Determinarea forței de frânare

Forța de frânare a locomotivei se poate determina în funcție de cuplul generatoarelor asincrone trifazate, cu relația:

$$F_f = \frac{2 \cdot m}{D} C_g \eta_m \eta_a i_a \quad (58)$$

în care:

- F_f - forța de frânare a locomotivei;
- m - numărul de motoare electrice de tracțiune;
- C_g - cuplul electromagnetic al generatorului asincron;
- η_m - randamentul motorului;
- η_a - randamentul atacului de osie;
- i_a - raportul de transmitere a atacului de osie;
- D - diametrul roții motoare.

Înlocuind în relația (58) pe C_g dat de (14) se obține:

$$F_f = \frac{2 \cdot m}{D} \eta_m \eta_a i_a \frac{m_1 p_1 r_2}{(2\pi)^3 (L_1 + aL_2)^2} \frac{U_1^2}{s f_1^3} \quad (59)$$

Dacă se notează:

$$k_f = \frac{2 \cdot m}{D} \eta_m \eta_a i_a m_1 p_1 r_2 \frac{1}{(2\pi)^3} \quad (60)$$

și cu:

$$K_m = \frac{k_f}{(L_1 + aL_2)^2} \quad (61)$$

relația (58) devine:

$$F_f = -K_m \frac{U_1^2}{s f_1^3} \quad (62)$$

Tinând cont că $k_f =$ constantă de construcție, iar k_m este o constantă analitică, rezultă că forța de frânare F_f este o funcție directă

$$F_f = f(U_1, s, f_1).$$

În exploatarea feroviară însă, forța de frânare trebuie să se mențină constantă de la valori mari ale vitezei până la aproape de zero. Punând condiții $F_f = \text{constant} = C_0$ și notând $C/k_m = C^*$, vom avea:

$$s f_1^3 C^* + U_1^2 = 0 \quad (63)$$

Din ecuația (63) pentru diferite valori ale alunecării s , va rezulta caracteristicile $f_1 * U_1$. În funcție de alunecare, regulatorul automat va comanda parametrii motoarelor după aceste caracteristici.

Prin simulare grafică în Turbo Pascal, s-a stabilit un program pe calculator numit SIV 03 privind determinarea influenței parametrilor de exploatare a forței de frânare F_f (v. cap. 2.3).

În figurile 18, 19, 20 sunt redată influența parametrilor f_1 , U_1 , s asupra forței de frânare F_f .

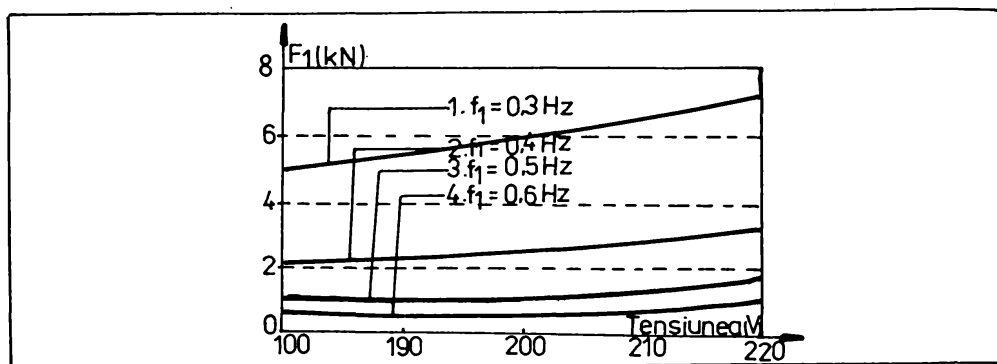


Figura 18. Variația forței de frânare în raport cu tensiunea pe fază la aceeași alunecare și valori diferite ale frecvenței.

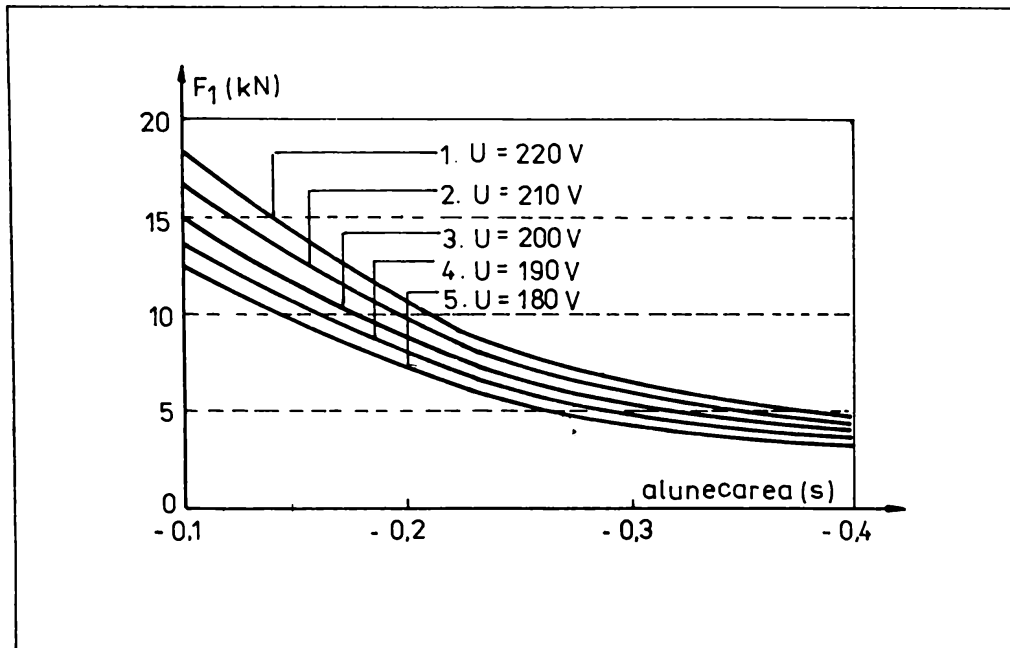


Figura 19. Variația forței de frânare în raport cu alunecarea la aceeași frecvență și diferite valori ale tensiunii statorice pe fază.

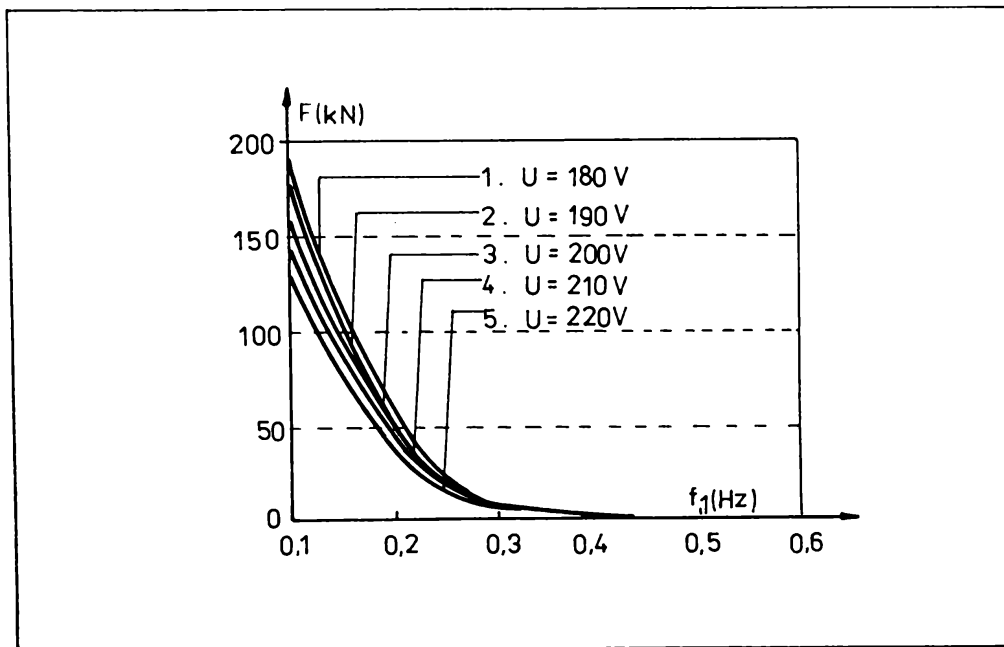


Figura 20. Variația forței de frânare în raport cu frecvența statorică la aceeași alunecare și tensiuni diferite.

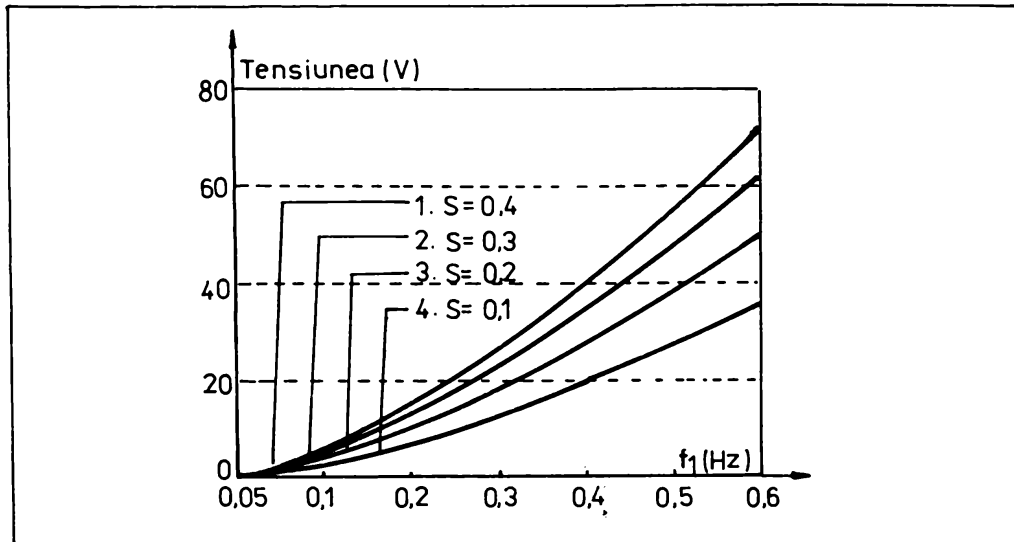


Figura 21. Variația tensiunii statorice în raport cu frecvența la diferite valori ale alunecării în condițiile impuse de $F_f = \text{constant}$.

2.2. Program de simulare grafică pe calculator a influenței parametrilor de exploatare asupra forței de frânare F_f

```

uses crt,printer,graph;
{Calculul teoretic dupa valori date a Kf, Km si Ff}
procedure calcul;
var m,D,etal,eta2,ia,m1,p1,r2,L1,a,L2,s,u1,f1,Kf,Km,Ff:real;
const pi=3.14;
begin
clrscr;
m:=6;
D:=1.32;
etal:=0.92;
eta2:=0.91;
ia:=3.5;
m1:=3;
p1:=8;
r2:=2.8;
L1:=112;
a:=1;

```

```

L2:=118;
s:=-0.2;
U1:=280;
f1:=0.50;
{Calculul coeficientului Kf}
Kf:=(2*m*eta1*eta2*ia*m1*p1*r2)/(D*(2*pi)*(2*pi)*(2*pi));
{Calculul coeficientului Km}
Km:=Kf/((L1+a*L2)*(L1+a*L2));
{Calculul fortei de frinare Ff}
Ff:=-Km*sqr(U1)/(s*f1*f1*f1);
{Afisarea pe ecran a valorilor calculate}
writeln('');
writeln('');
writeln('');
writeln('-----');
writeln(' : Valoarea coeficientului Kf = ',Kf:1:5,' ');
writeln(' : Valoarea coeficientului Km = ',Km:1:5,' ');
writeln(' :-----');
writeln(' : Valoarea fortei de fr. Ff = ',Ff:5:2,' [N] ');
writeln('-----');
{Afisarea la imprimanta a valorilor calculate}
writeln(lst,'');
writeln(lst,'');
writeln(lst,'');
writeln(lst,'-----');
writeln(lst,' : Valoarea coeficientului Kf = ',Kf:1:5,' ');
writeln(lst,' : Valoarea coeficientului Km = ',Km:1:5,' ');
writeln(lst,' :-----');
writeln(lst,' : Valoarea fortei de fr. Ff = ',Ff:5:2,' [N] ');
writeln(lst,'-----');
end;
{Reprezentare grafica - Ff=f(U1) la f1=variabil si s=constant}
procedure grafic1;
var m,D,eta1,eta2,ia,m1,p1,r2,L1,a,L2,s,u1,f1,Kf,Km,Ff:real;
    gd,gm,q1,q2,Ff0,Ff1,Ff2,x2,y2:integer;
const pi=3.14;
label E1,E2,E3;

```

```
begin
  clrscr;
  gd:=detect;
  initgraph(gd,gm,'');
  if graphresult<>gok then halt(1);
  line(20,20,20,465);
  line(15,460,600,460);
  line(15,25,20,20);
  line(25,25,20,20);
  line(595,455,600,460);
  line(595,465,600,460);
  outtextxy(580,470,'U[V]');
  outtextxy(30,25,'Ff');
  outtextxy(25,45,'[N]');
  outtextxy(20,470,'200');
  x2:=20;
  repeat
  x2:=x2+60;
  line(x2,455,x2,465);
  until x2=500;
  outtextxy(80,470,'210');
  outtextxy(140,470,'220');
  outtextxy(200,470,'230');
  outtextxy(260,470,'240');
  outtextxy(320,470,'250');
  outtextxy(380,470,'260');
  outtextxy(440,470,'270');
  outtextxy(500,470,'280');
  outtextxy(5,450,'0');
  y2:=460;
  repeat
  y2:=y2-20;
  line(18,y2,22,y2);
  until y2=40;
  outtextxy(1,350,'100');
  outtextxy(1,250,'200');
  outtextxy(1,150,'300');
```

```

outtextxy(1,50,'400');
{Valori costante}
m:=6;
D:=1.32;
eta1:=0.92;
eta2:=0.91;
ia:=3.5;
m1:=3;
p1:=8;
r2:=2.8;
L1:=112;
a:=1;
L2:=118;
s:=-0.2;
{Valori variabile}
f1:=0.5;
q1:=20;
U1:=200;
Ff:=-Km*sqr(U1)/(s*f1*f1*f1);
Ff1:=round(Ff);
Ff2:=460-Ff1;
putpixel(q1,Ff2,15);
q2:=q1+6;
E1:U1:=U1+1;
Ff0:=Ff2;
Ff:=-Km*sqr(U1)/(s*f1*f1*f1);
Ff1:=round(Ff);
Ff2:=460-Ff1;
line(q1,Ff0,q2,Ff2);
q1:=q2;
q2:=q2+6;
if U1<280 then goto e1;
f1:=f1+0.1;
E3:q1:=20;
U1:=200;
Ff:=-Km*sqr(U1)/(s*f1*f1*f1);
Ff1:=round(Ff);

```

```

Ff2:=460-Ff1;
putpixel(q1,Ff2,15);
q2:=q1+6;
E2:U1:=U1+1;
Ff0:=Ff2;
Ff:=-Km*sqr(U1)/(s*f1*f1*f1);
Ff1:=round(Ff);
Ff2:=460-Ff1;
line(q1,Ff0,q2,Ff2);
q1:=q2;
q2:=q2+6;
if U1<280 then goto e2;
f1:=f1+0.1;
if f1<1.1 then goto e3;
outtextxy(510,30,'f1=0.5 Hz');
outtextxy(510,205,'f1=0.6 Hz');
outtextxy(510,300,'f1=0.7 Hz');
outtextxy(510,350,'f1=0.8 Hz');
outtextxy(510,380,'f1=0.9 Hz');
outtextxy(510,400,'f1=1.0 Hz');
end;
{Reprezentare grafica - Ff=f(s) la U1=variabil si f1=constant}
procedure grafic2;
var m,D,eta1,eta2,ia,m1,p1,r2,L1,a,L2,s,u1,f1,Kf,Km,Ff:real;
    gd,gm,q1,q2,Ff0,Ff1,Ff2,x2,y2:integer;
const pi=3.14;
label E1,E2,E3;
begin
    clrscr;
    gd:=detect;
    initgraph(gd,gm,'');
    if graphresult<>gok then halt(1);
    line(20,20,20,465);
    line(15,460,600,460);
    line(15,25,20,20);
    line(25,25,20,20);
    line(595,455,600,460);

```



```

line(595,465,600,460);
outtextxy(600,470,'s');
outtextxy(30,25,'Ff');
outtextxy(25,45,'[N]');
outtextxy(20,470,'-0.2');
x2:=20;
repeat
x2:=x2+90;
line(x2,455,x2,465);
until x2=560;
outtextxy(110,470,'-0.3');
outtextxy(200,470,'-0.4');
outtextxy(290,470,'-0.5');
outtextxy(380,470,'-0.6');
outtextxy(470,470,'-0.7');
outtextxy(560,470,'-0.8');
outtextxy(5,450,'0');
y2:=460;
repeat
y2:=y2-20;
line(18,y2,22,y2);
until y2=40;
outtextxy(1,350,'100');
outtextxy(1,250,'200');
outtextxy(1,150,'300');
outtextxy(1,50,'400');
{Valori costante}
m:=6;
D:=1.32;
eta1:=0.92;
eta2:=0.91;
ia:=3.5;
m1:=3;
p1:=8;
r2:=2.8;
L1:=112;
a:=1;

```

```

L2:=118;
f1:=0.5;
{Valori variabile}
s:=-0.2;
q1:=20;
U1:=200;
Ff:=-Km*sqr(U1)/(s*f1*f1*f1);
Ff1:=round(Ff);
Ff2:=460-Ff1;
putpixel(q1,Ff2,15);
q2:=q1+9;
E1:s:=s-0.01;
Ff0:=Ff2;
Ff:=-Km*sqr(U1)/(s*f1*f1*f1);
Ff1:=round(Ff);
Ff2:=460-Ff1;
line(q1,Ff0,q2,Ff2);
q1:=q2;
q2:=q2+9;
if s>-0.8 then goto e1;
U1:=U1+20;
E3:q1:=20;
s:=-0.2;
Ff:=-Km*sqr(U1)/(s*f1*f1*f1);
Ff1:=round(Ff);
Ff2:=460-Ff1;
putpixel(q1,Ff2,15);
q2:=q1+9;
E2:s:=s-0.01;
Ff0:=Ff2;
Ff:=-Km*sqr(U1)/(s*f1*f1*f1);
Ff1:=round(Ff);
Ff2:=460-Ff1;
line(q1,Ff0,q2,Ff2);
q1:=q2;
q2:=q2+9;
if s>-0.8 then goto e2;

```

```

U1:=U1+20;
if U1<290 then goto e3;
outtextxy(570,405,'U1=200 V');
outtextxy(570,390,'U1=220 V');
outtextxy(570,375,'U1=240 V');
outtextxy(570,360,'U1=260 V');
outtextxy(570,345,'U1=280 V');
end;
{Reprezentare grafica - Ff=f(f1) la U1=variabil si s=constant}
procedure grafic3;
var m,D,eta1,eta2,ia,m1,p1,r2,L1,a,L2,s,u1,f1,Kf,Km,Ff:real;
    gd,gm,q1,q2,Ff0,Ff1,Ff2,x2,y2:integer;
const pi=3.14;
label E1,E2,E3;
begin
    clrscr;
    gd:=detect;
    initgraph(gd,gm,'');
    if graphresult<>gok then halt(1);
    line(20,1,20,465);
    line(15,460,600,460);
    line(15,6,20,1);
    line(25,6,20,1);
    line(595,455,600,460);
    line(595,465,600,460);
    outtextxy(540,470,'f1[Hz]');
    outtextxy(35,8,'Ff[N]');
    outtextxy(20,470,'0.5');
    x2:=20;
    repeat
    x2:=x2+120;
    line(x2,455,x2,465);
    until x2=500;
    outtextxy(140,470,'0.2');
    outtextxy(260,470,'0.3');
    outtextxy(380,470,'0.4');
    outtextxy(500,470,'0.5');

```

```

outtextxy(5,450,'0');
y2:=460;
repeat
y2:=y2-20;
line(18,y2,22,y2);
until y2=40;
outtextxy(1,350,'100');
outtextxy(1,250,'200');
outtextxy(1,150,'300');
outtextxy(1,50,'400');
{Valori costante}
m:=6;
D:=1.32;
eta1:=0.92;
eta2:=0.91;
ia:=3.5;
m1:=3;
p1:=8;
r2:=2.8;
L1:=112;
a:=1;
L2:=118;
s:=-0.2;
{Valori variabile}
f1:=0.1;
q1:=20;
U1:=200;
Ff:=-Km*sqr(U1)/(s*f1*f1*f1*100);
Ff1:=round(Ff);
Ff2:=460-Ff1;
putpixel(q1,Ff2,15);
q2:=q1+12;
E1:f1:=f1+0.01;
Ff0:=Ff2;
Ff:=-Km*sqr(U1)/(s*f1*f1*f1*100);
Ff1:=round(Ff);
Ff2:=460-Ff1;

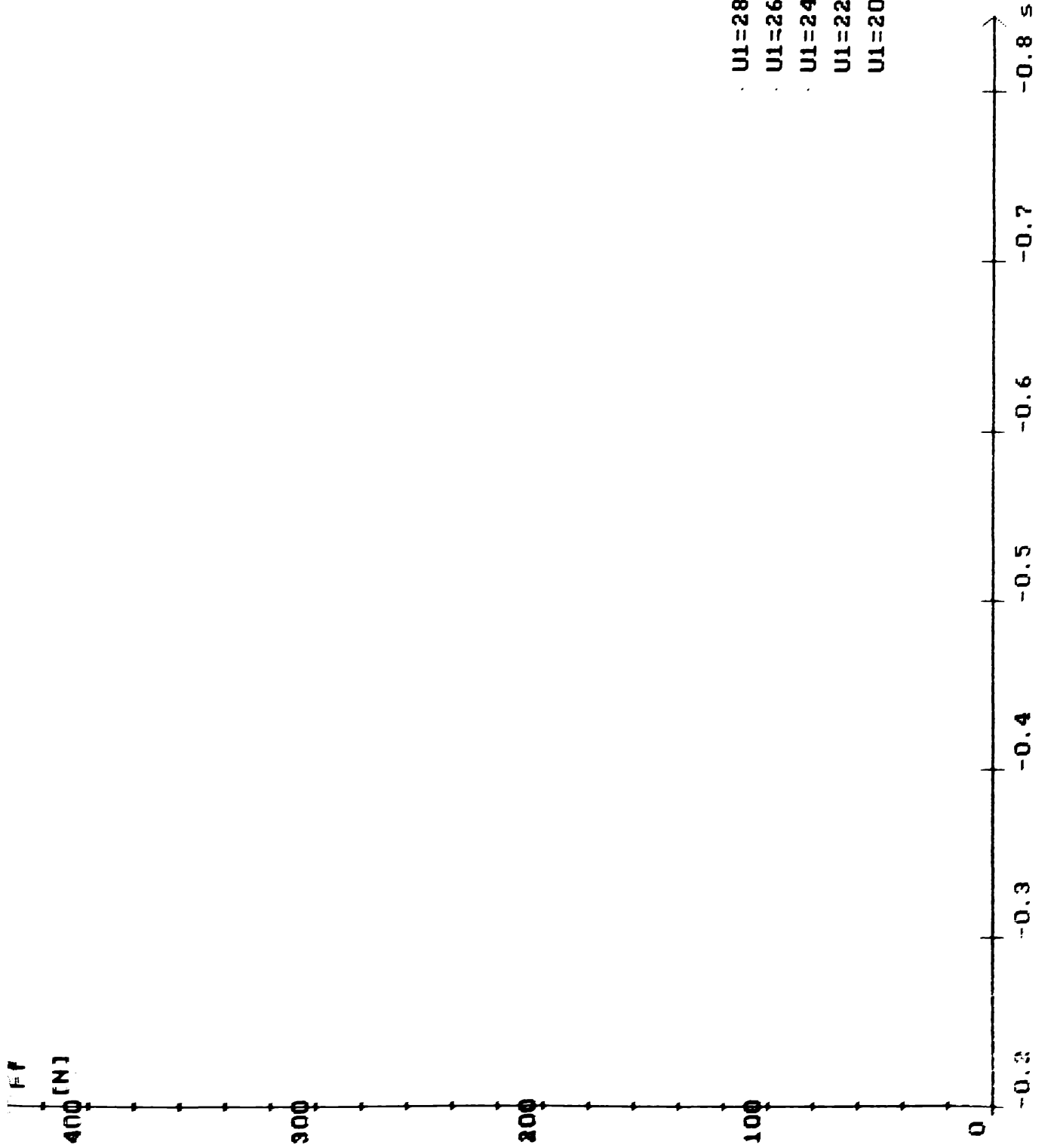
```

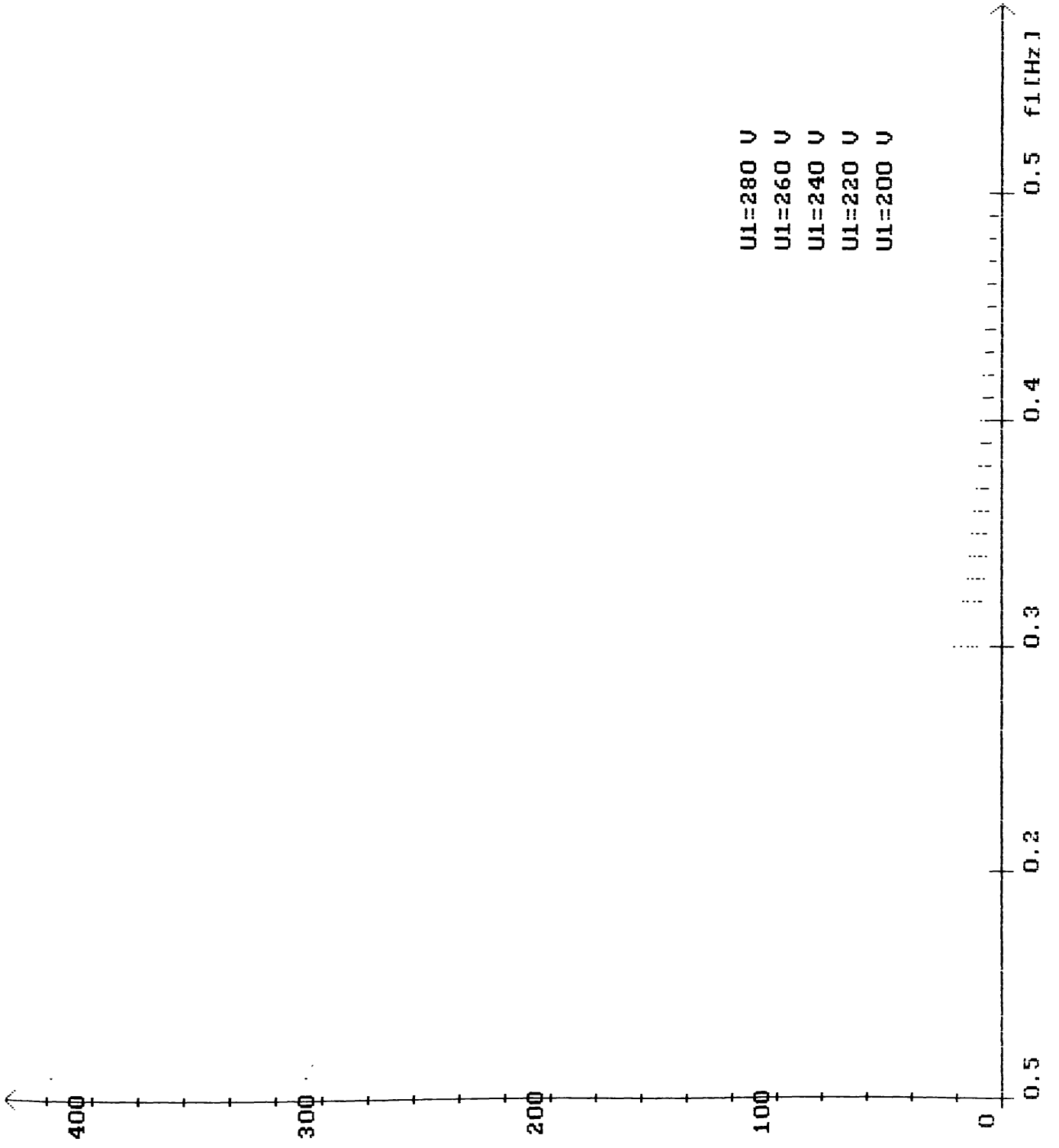
```

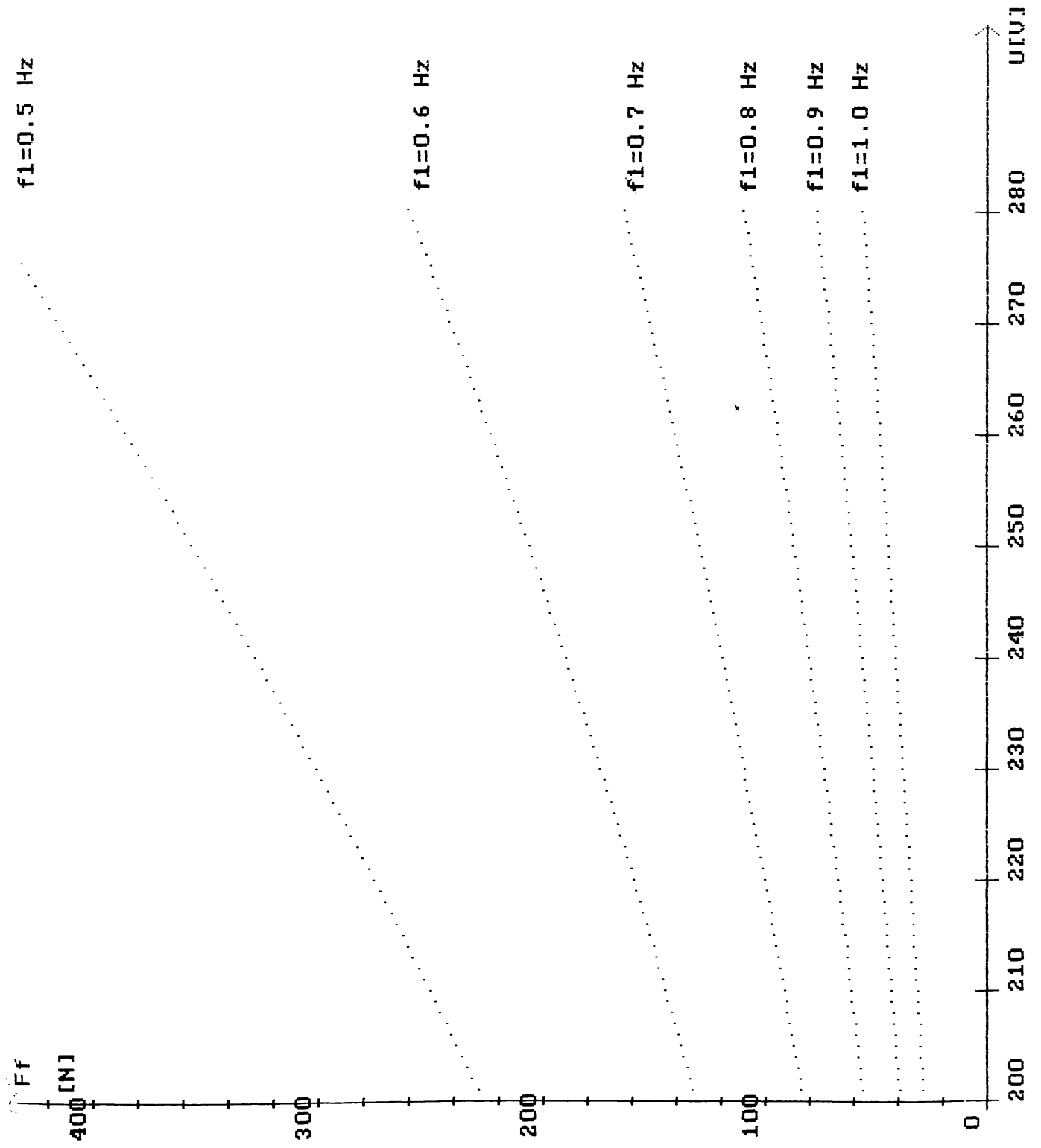
    line(q1,Ff0,q2,Ff2);
    q1:=q2;
    q2:=q2+12;
    if f1<0.5 then goto e1;
    U1:=U1+20;
E3:q1:=20;
    f1:=0.1;
    Ff:=-Km*sqr(U1)/(s*f1*f1*f1*100);
    Ff1:=round(Ff);
    Ff2:=460-Ff1;
    putpixel(q1,Ff2,15);
    q2:=q1+12;
E2:f1:=f1+0.01;
    Ff0:=Ff2;
    Ff:=-Km*sqr(U1)/(s*f1*f1*f1*100);
    Ff1:=round(Ff);
    Ff2:=460-Ff1;
    line(q1,Ff0,q2,Ff2);
    q1:=q2;
    q2:=q2+12;
    if f1<0.5 then goto e2;
    U1:=U1+20;
    if U1<290 then goto e3;
    outtextxy(470,405,'U1=200 V');
    outtextxy(470,390,'U1=220 V');
    outtextxy(470,375,'U1=240 V');
    outtextxy(470,360,'U1=260 V');
    outtextxy(470,345,'U1=280 V');
end;
begin
    calcul;
    grafic1;
    grafic2;
    grafic3;
    readln;
end.

```

· U1=280 V
· U1=260 V
· U1=240 V
· U1=220 V
· U1=200 V







2.3. Determinarea tensiunii satorice redată la convertorul de frecvență și cea redată la linia de contact în funcție de condițiile de exploatare feroviară.

Forța de frânare F_f se poate determina și din ecuația de mișcare a trenului în regim de frânare [1], [7]:

$$\frac{dv}{dt} = -\xi (f_f + r_t^*) \quad (64)$$

în care:

dv/dt - derivata vitezei trenului funcție de timp;

ξ - decelerația specifică imprimată trenului;

f_f - forța specifică de frânare;

r_t^* - rezistența specifică la deplasarea trenului pe un profil oarecare, în regim lansat.

Tinând cont că:

$$f_f = \frac{F_f}{G_L + G_V} \quad (65)$$

iar

$$r_t^* = \frac{R_T}{G_L + G_V} \quad (66)$$

în care:

G_L - greutatea locomotivei;

G_V - greutatea vagoanelor;

R_T - rezistența totală la înaintarea trenului pe un profil oarecare.

Relația (64) devine:

$$\frac{dv}{dt} = -\xi \left(\frac{F_f + R_T}{G_L + G_V} \right) \quad (67)$$

respectiv

$$F_T = - \left[\frac{1}{\xi} (G_L + G_V) \frac{dv}{dt} + R_T \right] \quad (68)$$

Egalizând relația (68) cu relația (62), avem:

$$K_m \frac{U_1^2}{s f_1^3} = \frac{1}{\xi} (G_L + G_V) \frac{dv}{dt} + R_T \quad (69)$$

Notând cu G_t (greutatea trenului) = $G_L + G_V$, tensiunea statorică pe fază va fi:

$$U_1 = \sqrt{\frac{s f_1^3}{k_m} \left(\frac{G_t}{\xi} \frac{dv}{dt} + R_t \right)} \quad (70)$$

Cu relația (70) se determină tensiunea statorică redată convertorului de frecvență de către generatorul asincron în condițiile impuse de exploatare (viteză, tonaj, rezistența de înaintare).

Tinând cont că în (70), k_m a fost determinat pentru $m = 1$ (un singur motor de tracțiune) prin egalarea lui (70) cu (15) vom avea:

$$\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \hat{f}_1 W_s K_{ws} \phi_s = \sqrt{\frac{s f_1^3}{K_m} \left(\frac{G_t}{\xi} \frac{dv}{dt} + R_t \right)} \quad (71)$$

respectiv

$$\hat{f}_1 = k_m \frac{(W_s k_{ws} \phi_s)^2}{s \left(\frac{G_t}{\xi} \frac{dv}{dt} + R_T \right)} \quad (72)$$

Relația (70) determină frecvența statorică în condiții de exploatare la diferite valori ale alunecării.

Notând cu:

$$k_p = \sqrt{\frac{s}{k_m} \left(\frac{G_t}{\xi} \frac{dv}{dt} + R_T \right)} \quad (73)$$

relația (70) devine:

$$U_1 = k_p \sqrt{f_1^3} \quad (74)$$

iar tensiunea redată liniei de contact U_r , va fi:

$$U_r = k_p k_m^* \eta_c \sqrt{f_1^3} \quad (75)$$

în care:

k_m^* - coeficientul de multiplicare a transformatorului principal;

η_c - randamentul convertorului de frecvență.

În figura 22 este redată influența frecvenței statorului f_1 asupra tensiunii recuperate la rețea. În analiză produsul $k_p \cdot \eta_c$ s-a considerat constant.

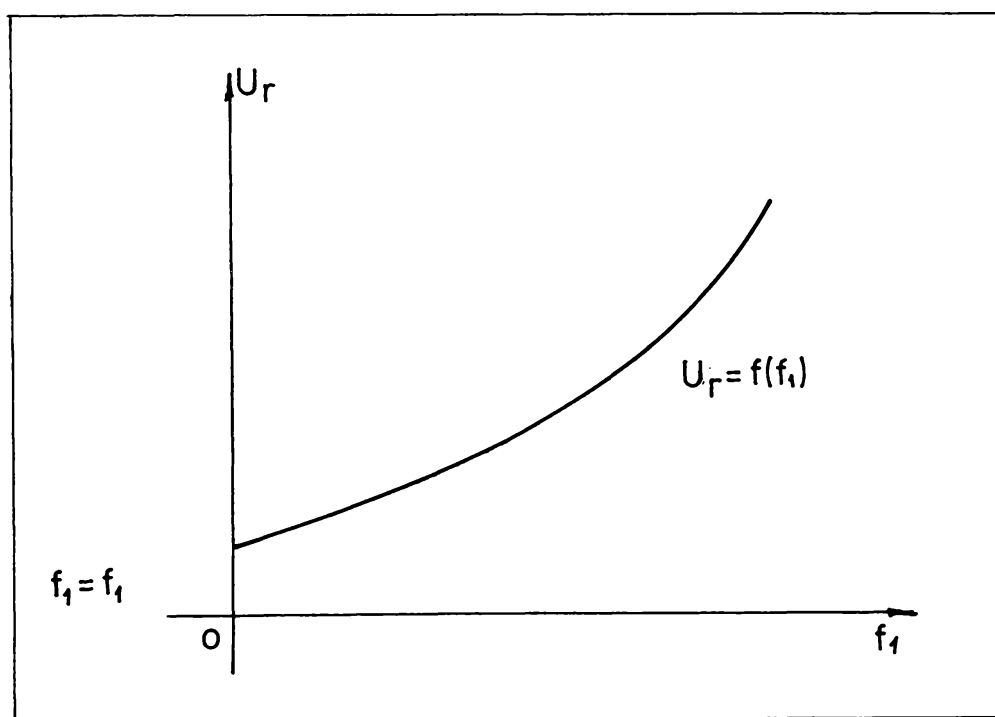


Figura 22. Influența frecvenței statorice f_1 asupra tensiunii recuperate la rețea U_r .

Pentru reglarea și comanda în regim de frânare F_f și U impun unele limitări. Forța de frânare F_f este limitată de aderență, adică:

$$F_f \leq f_a G_t \quad (76)$$

în care:

f_a - coeficientul de aderență;

G_t - greutatea trenului (se transmite și unei prin toate osiile motoare);

Tensiunea recuperată:

$$U_r > U_{LC} \quad (77)$$

în care U_{LC} este tensiunea în linia de contact.

Uneori se pune problema ca U_r , fiind de valori mari și în ideea că nu există consumatori prin substațiile de tracțiune să fie redată sistemului energetic național [36].

2.4. Program de simulare grafică pe calculator a influenței parametrilor de exploatare asupra tensiunii recuperate la rețea U_r

```
uses crt,printer,graph;
{Calculul teoretic dupa valori date a f1, U1, Kp si Ur}
procedure calcul;
var
Km,Ws,Kws,FIs,Gt,psi,V,Rt,s,Km1,eta1,t,dvdt,tt,f1,U1,Kp,Ur:real;
const pi=3.14;
begin
clrscr;
Km:=0.00015;
Ws:=4.5;
Kws:=1.2;
FIs:=112;
Gt:=1000*1000;
psi:=0.8;
Rt:=82*1000;
```

```

s:=-0.5;
Km1:=8;
eta1:=0.87;
dvdt:=-10;
tt:=Gt*dvdt/psi+Rt;
{Calculul frecventei f1}
f1:=Km*sqr(pi*Ws*Kws*FI5)/(s*tt);
{Calculul tensiunii U1}
U1:=sqr(s*f1*f1*f1*tt/Km);
{Calculul coeficientului Kp}
Kp:=sqr(s*tt/Km);
{Calculul tensiunii recuperate Ur}
Ur:=Kp*Km1*eta1*sqr(f1*f1*f1);
{Afisarea pe ecran a valorilor calculate}
writeln('');
writeln('');
writeln('');
writeln('-----');
writeln(' : Valoarea frecventei      f1 = ',f1:5:5,' [Hz]!');
writeln(' : Valoarea tensiunii        U1 = ',U1:5:5,' [V] !');
writeln(' : Valoarea coeficientului  Kp = ',Kp:5:3,'      ');
writeln(' : Valoarea tensiunii recup.Ur = ',Ur:5:5,' [V] !');
writeln('-----');
{Afisarea la imprimanta a valorilor calculate}
writeln(1st,'');
writeln(1st,'');
writeln(1st,'');
writeln(1st,'-----');
writeln(1st,' : Valoarea frecventei      f1 = ',f1:5:5,' [Hz]!');
writeln(1st,' : Valoarea tensiunii        U1 = ',U1:5:5,' [V] !');
writeln(1st,' : Valoarea coeficientului  Kp = ',Kp:5:3,'      ');
writeln(1st,' : Valoarea tensiunii rec. Ur = ',Ur:5:5,' [V] !');
writeln(1st,'-----');
end;
{Reprezentare grafica - f1=f(s) la dv/dt = variabil}
procedure grafici;
v                                     a                                     r

```

```

Km,Ws,Kws,FIs,Gt,psi,V,Rt,s,Km1,eta1,t,dvdt,tt,f1,U1,Kp,Ur:real;
gd,gm,x2,y2,q1,q2,f10,f11,f12:integer;
const pi=3.14;
label S1,S2,S3;
begin
clrscr;
gd:=detect;
initgraph(gd,gm,'');
if graphresult<>gok then halt(1);
{Valori constante}
Km:=0.00015;
Ws:=4.5;
Kws:=1.2;
FIs:=112;
Gt:=1000*1000;
psi:=0.8;
Rt:=82*1000;
Km1:=8;
eta1:=0.87;
{Valori variabile}
dvdt:=-5;
q1:=20;
s:=-0.2;
tt:=Gt*dvdt/psi+Rt;
{Calculul frecventei f1}
f1:=1000000*Km*sqr(pi*Ws*Kws*FIs)/(s*tt);
f11:=round(f1);
f12:=460-f11;
putpixel(q1,f12,15);
q2:=q1+10;
S1:s:=s-0.01;
f10:=f12;
f1:=1000000*Km*sqr(pi*Ws*Kws*FIs)/(s*tt);
f11:=round(f1);
f12:=460-f11;
{putpixel(q2,f12,15);}
line(q1,f10,q2,f12);

```

```

q1:=q2;
q2:=q2+10;
if s>-0.8 then goto S1;
dvdt:=dvdt-5;
S3:q1:=20;
s:=-0.2;
tt:=6t*dvdt/psi+Rt;
{Calculul frecventei f1}
f1:=1000000*Km*sqr(pi*Ws*Kws*FIs)/(s*tt);
f11:=round(f1);
f12:=460-f11;
putpixel(q1,f12,15);
q2:=q1+10;
S2:s:=s-0.01;
f10:=f12;
f1:=1000000*Km*sqr(pi*Ws*Kws*FIs)/(s*tt);
f11:=round(f1);
f12:=460-f11;
{putpixel(q2,f12,15);}
line(q1,f10,q2,f12);
q1:=q2;
q2:=q2+10;
if s>-0.8 then goto S2;
dvdt:=dvdt-5;
if dvdt>-30 then goto S3;
line(20,10,20,465);
line(15,460,640,460);
line(15,15,20,10);
line(25,15,20,10);
line(635,455,640,460);
line(635,465,640,460);
x2:=20;
repeat
x2:=x2+100;
line(x2,455,x2,465);
until x2=620;
outtextxy(1,470,'-0,2');

```

```

outtextxy(101,470,'-0,3');
outtextxy(201,470,'-0,4');
outtextxy(301,470,'-0,5');
outtextxy(401,470,'-0,6');
outtextxy(501,470,'-0,7');
outtextxy(585,470,'-0,8');
y2:=460;
repeat
y2:=y2-20;
line(18,y2,22,y2);
until y2=20;
outtextxy(1,450,'0');
outtextxy(1,350,'100');
outtextxy(1,250,'200');
outtextxy(1,150,'300');
outtextxy(1,50,'400');
outtextxy(31,20,'f1[Hz]');
outtextxy(630,470,'s');
outtextxy(400,100,'dv/dt=- 5 m/s');
outtextxy(400,120,'dv/dt=-10 m/s');
outtextxy(400,140,'dv/dt=-15 m/s');
outtextxy(400,160,'dv/dt=-20 m/s');
outtextxy(400,180,'dv/dt=-25 m/s');
outtextxy(505,95,'2');
outtextxy(505,115,'2');
outtextxy(505,135,'2');
outtextxy(505,155,'2');
outtextxy(505,175,'2');
end;
{Reprezentare grafica - Ur=f(f1)}
procedure grafic2;
var
Km,Ws,Kws,FIs,Gt,psi,V,Rt,s,Km1,eta1,t,dvdt,tt,f1,U1,Kp,Ur:real;
gd,gm,x2,y2,q1,q2,Ur1,Ur2,Ur0:integer;
const pi=3.14;
label S1;
begin

```



```

clrscr;
gd:=detect;
initgraph(gd,gm,'');
if graphresult<>gok then halt(1);
Km:=0.00015;
Ws:=4.5;
Kws:=1.2;
FIs:=112;
Gt:=1000*1000;
psi:=0.8;
Rt:=82*1000;
Km1:=8;
eta1:=0.87;
{Valori variabile}
dvdt:=-10;
q1:=20;
s:=-0.2;
f1:=0.1;
tt:=Gt*dvdt/psi+Rt;
{Calculul coeficientului Kp}
Kp:=sqrt(s*tt/Km);
{Calculul tensiunii recuperate Ur}
Ur:=Kp*Km1*eta1*sqrt(f1*f1*f1)/1000;
Ur1:=round(Ur);
Ur2:=460-Ur1;
putpixel(q1,Ur2,15);
q2:=q1+1;
S1:f1:=f1+0.001;
Ur0:=Ur2;
{Calculul coeficientului Kp}
Kp:=sqrt(s*tt/Km);
{Calculul tensiunii recuperate Ur}
Ur:=Kp*Km1*eta1*sqrt(f1*f1*f1)/1000;
Ur1:=round(Ur);
Ur2:=460-Ur1;
line(q1,Ur0,q2,Ur2);
q1:=q2;

```

```

q2:=q2+1;
if f1<0.61 then goto S1;
line(20,10,20,465);
line(15,460,640,460);
line(15,15,20,10);
line(25,15,20,10);
line(635,455,640,460);
line(635,465,640,460);
x2:=20;
repeat
x2:=x2+100;
line(x2,455,x2,465);
until x2=520;
outtextxy(1,470,'0,1');
outtextxy(101,470,'0,2');
outtextxy(201,470,'0,3');
outtextxy(301,470,'0,4');
outtextxy(401,470,'0,5');
outtextxy(501,470,'0,6');
y2:=460;
repeat
y2:=y2-20;
line(18,y2,22,y2);
until y2=20;
outtextxy(1,450,'0');
outtextxy(1,350,'100');
outtextxy(1,250,'200');
outtextxy(1,150,'300');
outtextxy(1,50,'400');
outtextxy(31,20,'Ur[V]');
outtextxy(580,470,'f1[Hz]');
end;
{Reprezentare grafica - Ur=f(Gt)}
procedure grafic3;
v          a          r
Km,Ws,Kws,FIs,Gt,psi,V,Rt,s,Km1,eta1,t,dvdt,tt,f1,U1,Kp,Ur:real;
gd,gm,x2,y2,q1,q2,Ur0,Ur1,Ur2:integer;

```

```

const pi=3.14;
label S1;
begin
clrscr;
gd:=detect;
initgraph(gd,gm,'');
if graphresult<>grok then halt(1);
Km:=0.00015;
Ws:=4.5;
Kws:=1.2;
FIs:=112;
f1:=0.5;
psi:=0.8;
Rt:=82;
Km1:=8;
eta1:=0.87;
dvdt:=-10;
Gt:=500;
q1:=20;
s:=-0.2;
tt:=Gt*dvdt*1000/psi+Rt*1000;
{Calculul coeficientului Kp}
Kp:=sqrt(s*tt/Km);
{Calculul tensiunii recuperate Ur}
Ur:=Kp*Km1*eta1*sqrt(f1*f1*f1)/1000;
Ur1:=round(Ur);
Ur2:=460-Ur1;
putpixel(q1,Ur2,15);
q2:=q1+4;
S1:Gt:=Gt+10;
Ur0:=Ur2;
tt:=Gt*dvdt*1000/psi+Rt*1000;
{Calculul coeficientului Kp}
Kp:=sqrt(s*tt/Km);
{Calculul tensiunii recuperate Ur}
Ur:=Kp*Km1*eta1*sqrt(f1*f1*f1)/1000;
Ur1:=round(Ur);

```

```
Ur2:=460-Ur1;
line(q1,Ur0,q2,Ur2);
q1:=q2;
q2:=q2+4;
if Gt<2000 then goto S1;
line(20,10,20,465);
line(15,460,640,460);
line(15,15,20,10);
line(25,15,20,10);
line(635,455,640,460);
line(635,465,640,460);
x2:=20;
repeat
x2:=x2+40;
line(x2,455,x2,465);
until x2=620;
outtextxy(1,470,'500');
outtextxy(41,470,'600');
outtextxy(121,470,'800');
outtextxy(201,470,'1000');
outtextxy(281,470,'1200');
outtextxy(361,470,'1400');
outtextxy(441,470,'1600');
outtextxy(521,470,'1800');
y2:=460;
repeat
y2:=y2-20;
line(18,y2,22,y2);
until y2=20;
outtextxy(1,450,'0');
outtextxy(1,350,'100');
outtextxy(1,250,'200');
outtextxy(1,150,'300');
outtextxy(1,50,'400');
outtextxy(31,20,'Ur[V]');
outtextxy(580,470,'Gt[kg]');
end;
```

```

{Reprezentare grafica -  $U_r=f(R_t)$ }
procedure grafic4;
var
Km,Ws,Kws,FIs,Gt,psi,V,Rt,s,Km1,eta1,t,dvdt,tt,f1,U1,Kp,Ur:real;
gd,gm,x2,y2,q1,q2,Ur0,Ur1,Ur2:integer;
const pi=3.14;
label S1;
begin
clrscr;
gd:=detect;
initgraph(gd,gm,'');
if graphresult<>grok then halt(1);
Km:=0.00015;
Ws:=4.5;
Kws:=1.2;
FIs:=112;
f1:=0.5;
psi:=0.8;
Km1:=8;
eta1:=0.87;
dvdt:=-10;
Gt:=1000;
q1:=20;
s:=-0.2;
Rt:=0;
tt:=Gt*dvdt*1000/psi+Rt*1000;
{Calculul coeficientului Kp}
Kp:=sqrt(s*tt/Km);
{Calculul tensiunii recuperate Ur}
Ur:=Kp*Km1*eta1*sqrt(f1*f1*f1)/1000;
Ur1:=round(Ur);
Ur2:=460-Ur1;
putpixel(q1,Ur2,15);
q2:=q1+3;
S1:Rt:=Rt+1;
Ur0:=Ur2;
tt:=Gt*dvdt*1000/psi+Rt*1000;

```

```

{Calculul coeficientului Kp}
Kp:=sqrt(s*tt/Km);
{Calculul tensiunii recuperate Ur}
Ur:=Kp*Km1*eta1*sqrt(f1*f1*f1)/1000;
Ur1:=round(Ur);
Ur2:=460-Ur1;
line(q1,Ur0,q2,Ur2);
q1:=q2;
q2:=q2+3;
if Rt<210 then goto S1;
line(20,10,20,465);
line(15,460,640,460);
line(15,15,20,10);
line(25,15,20,10);
line(635,455,640,460);
line(635,465,640,460);
x2:=20;
repeat
x2:=x2+30;
line(x2,455,x2,465);
until x2=620;
outtextxy(1,470,'0');
outtextxy(61,470,'20');
outtextxy(121,470,'40');
outtextxy(181,470,'60');
outtextxy(241,470,'80');
outtextxy(301,470,'100');
outtextxy(361,470,'120');
outtextxy(421,470,'140');
outtextxy(481,470,'160');
outtextxy(541,470,'180');
y2:=460;
repeat
y2:=y2-20;
line(18,y2,22,y2);
until y2=20;
outtextxy(1,450,'0');

```

```

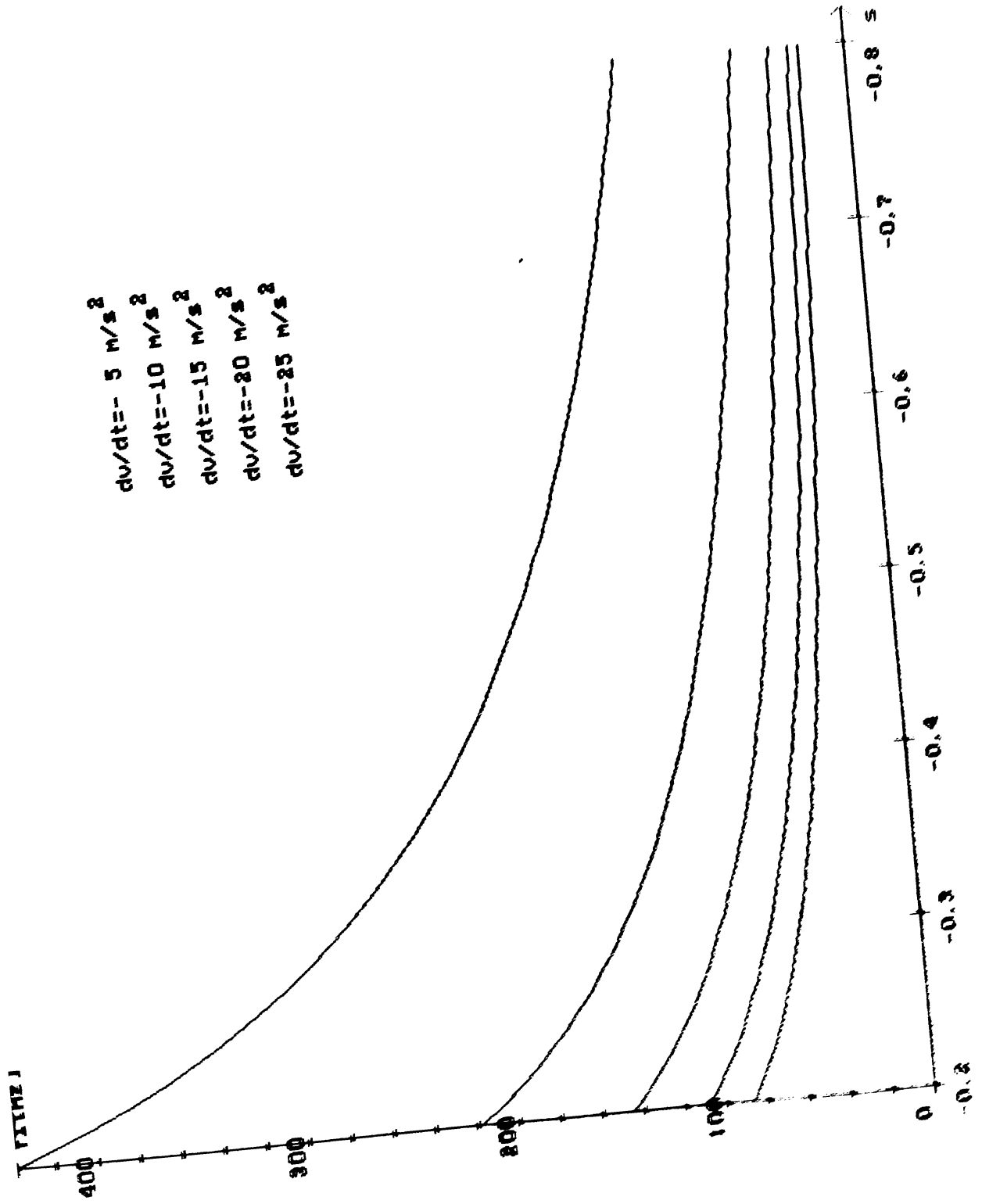
outtextxy(1,350,'100');
outtextxy(1,250,'200');
outtextxy(1,150,'300');
outtextxy(1,50,'400');
outtextxy(31,20,'Ur[V]');
outtextxy(590,470,'Rt[kg]');
end;
{Reprezentare grafica - Ur=f(V)}
procedure grafic5;
var Km,Ws,Kws,FIs,Gt,psi,V,Rt,s,Km1,eta1,t,tt,f1,U1,Kp,Ur:real;
gd,gm,x2,y2,q1,q2,Ur0,Ur1,Ur2:integer;
const pi=3.14;
label S1;
begin
clrscr;
gd:=detect;
initgraph(gd,gm,'');
if graphresult<>grok then halt(1);
Km:=0.00015;
Ws:=4.5;
Kws:=1.2;
FIs:=112;
f1:=0.5;
psi:=0.8;
Km1:=8;
eta1:=0.87;
{Valori variabile}
Gt:=1000;
Rt:=82;
q1:=20;
s:=-0.2;
t:=-60;
V:=200;
tt:=Gt*1000*v*1000/(t*3600*psi)+Rt*1000;
{Calculul coeficientului Kp}
Kp:=sqrt(s*tt/Km);
{Calculul tensiunii recuperate Ur}

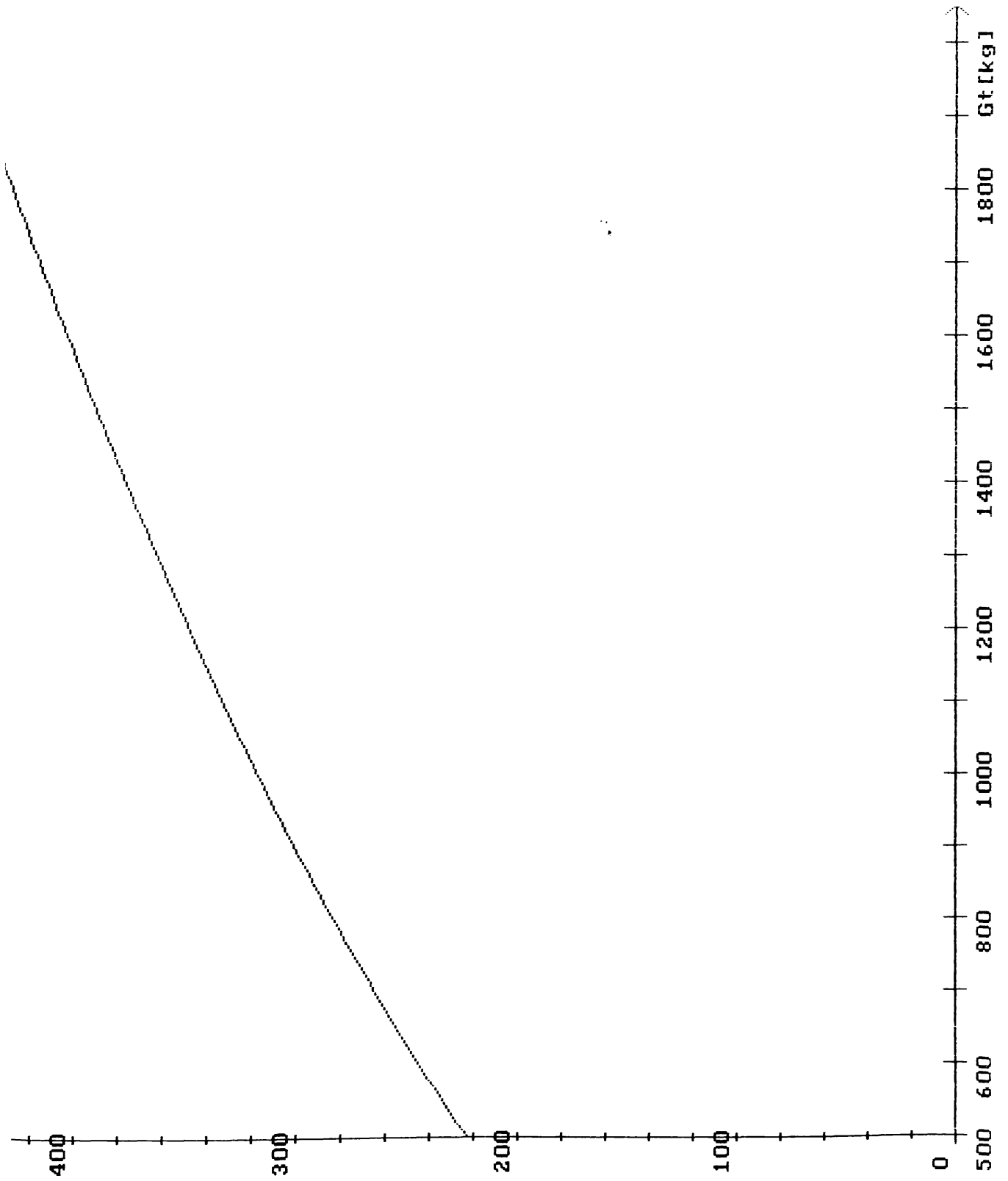
```

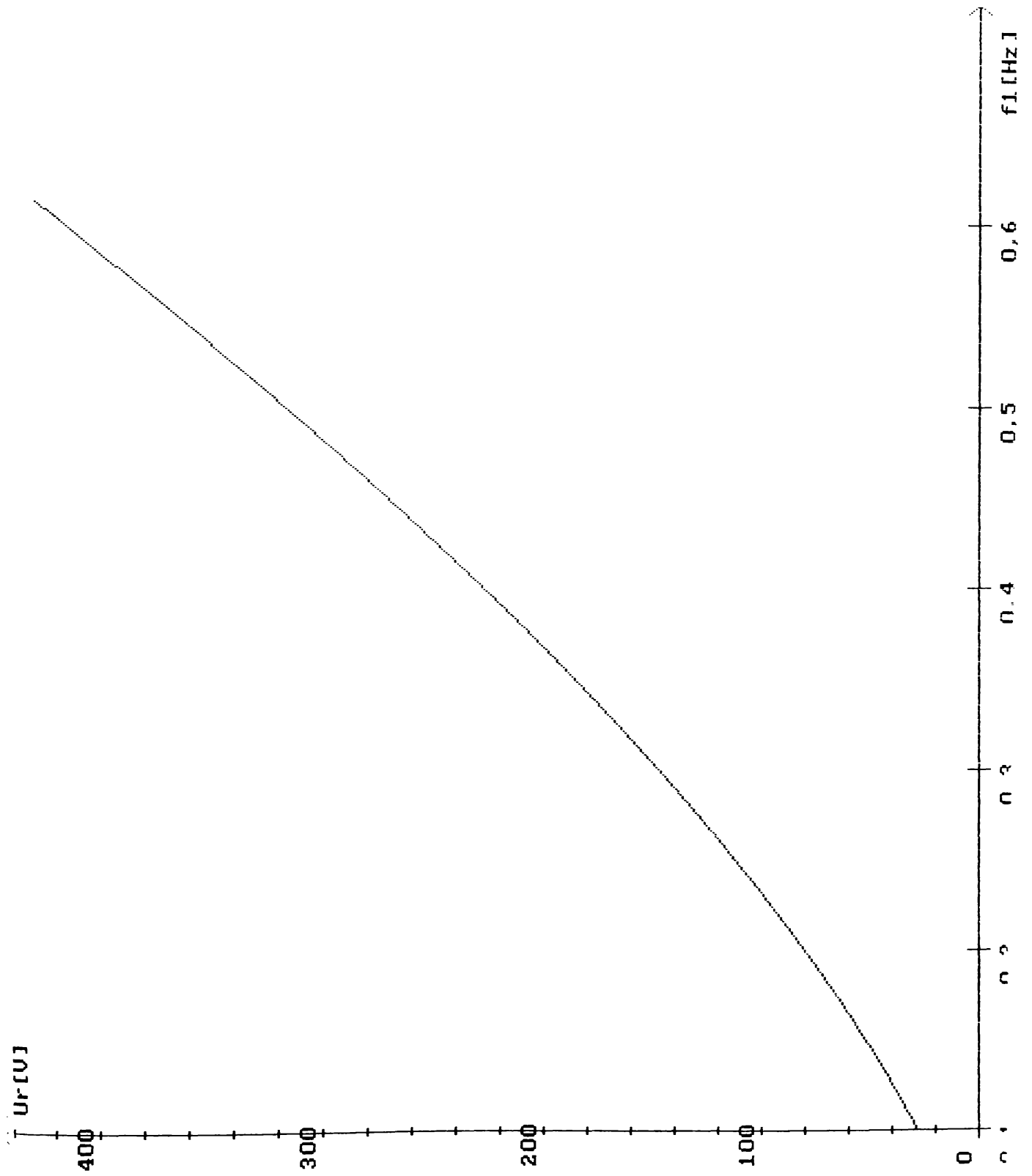
```
Ur:=Kp*Km1*eta1*sqrt(f1*f1*f1)/1000;
Ur1:=round(Ur);
Ur2:=460-Ur1;
putpixel(q1,Ur2,15);
q2:=q1+5;
S1:V:=V-1;
Ur0:=Ur2;
tt:=Gt*1000*v*1000/(t*3600*psi)+Rt*1000;
{Calculul coeficientului Kp}
Kp:=sqrt(s*tt/Km);
{Calculul tensiunii recuperate Ur}
Ur:=Kp*Km1*eta1*sqrt(f1*f1*f1)/1000;
Ur1:=round(Ur);
Ur2:=460-Ur1;
line(q1,Ur0,q2,Ur2);
q1:=q2;
q2:=q2+5;
if V>80 then goto S1;
line(20,10,20,465);
line(15,460,640,460);
line(15,15,20,10);
line(25,15,20,10);
line(635,455,640,460);
line(635,465,640,460);
x2:=20;
repeat
x2:=x2+100;
line(x2,455,x2,465);
until x2=620;
outtextxy(1,470,'200');
outtextxy(101,470,'180');
outtextxy(201,470,'160');
outtextxy(301,470,'140');
outtextxy(401,470,'120');
outtextxy(501,470,'100');
y2:=460;
repeat
```

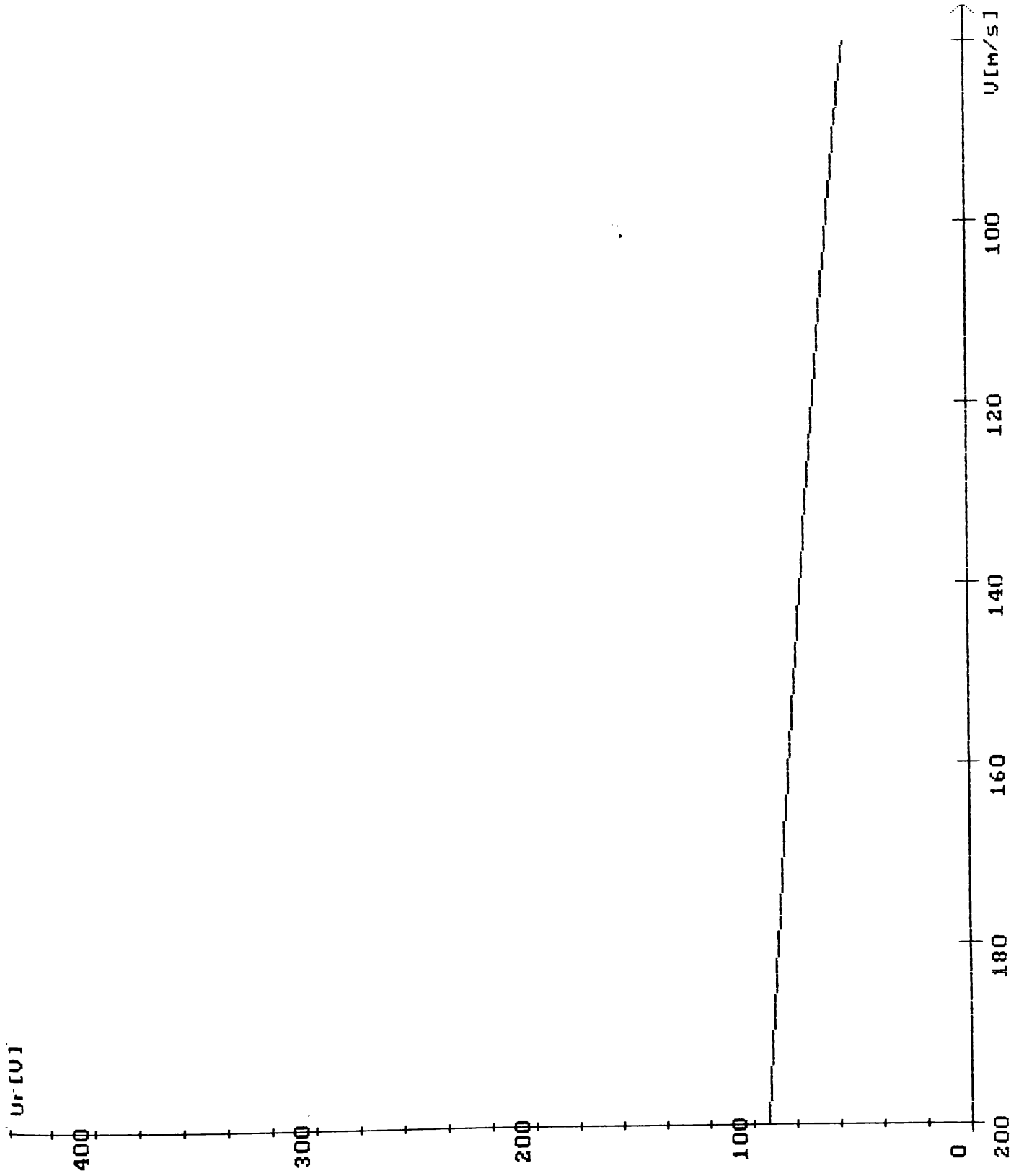


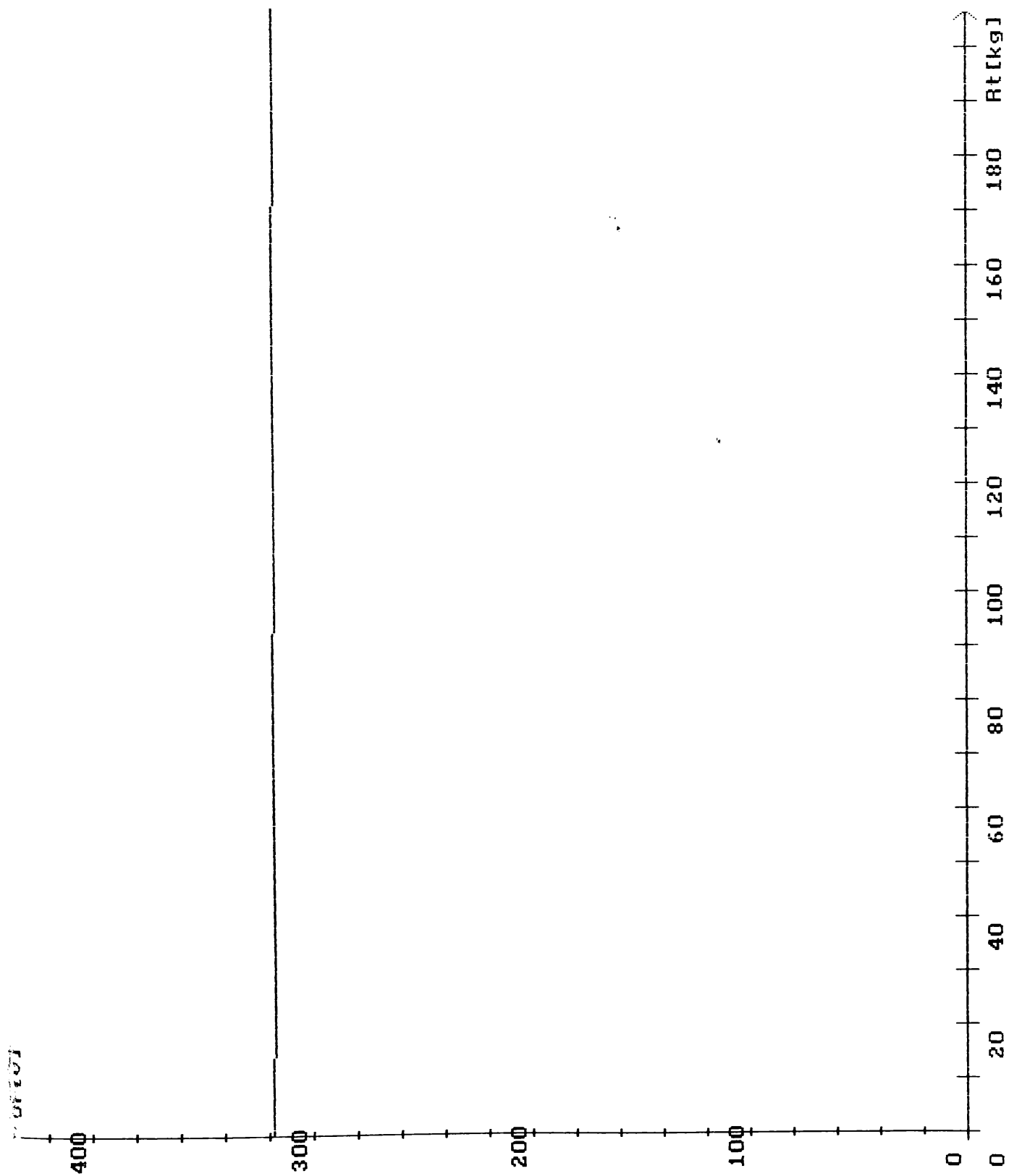
```
y2:=y2-20;
line(18,y2,22,y2);
until y2=20;
outtextxy(1,450,'0');
outtextxy(1,350,'100');
outtextxy(1,250,'200');
outtextxy(1,150,'300');
outtextxy(1,50,'400');
outtextxy(31,20,'Ur[V]');
outtextxy(590,470,'V[m/s]');
end;
begin
calcul;
readln;
grafic1;
readln;
grafic2;
readln;
grafic3;
readln;
grafic4;
readln;
grafic5;
readln;
end.
```











CAPITOLUL III. SISTEME DE REGLARE SI COMANDA AUTOMATA IN REGIM DE FRANA RECUPERATIVA

3.1. Sisteme de reglare automată a motorului asincron trifazat

3.1.1. Necesitatea de reglare automată a motorului asincron trifazat

Utilizarea sistemelor de comandă și reglare automată a locomotivelor și trenurilor electrice este un obiectiv pe care și-l impun majoritatea administrațiilor de cale ferată, atât pentru ușurarea muncii personalului de locomotivă, cât și pentru mărirea siguranței circulației.

Utilizarea vehiculelor feroviare motoare la efectuarea unor prestații care necesită opriri frecvente în stații (transportul suburban), viteze și puteri mari (transportul interurban), este posibilă numai prin introducerea sistemelor de comandă și reglare automată.

Prin aceasta, personalul de locomotivă este degrevat de manipulări repetate și monotone, atenția putându-i fi îndreptată într-o mai mare măsură asupra liniei de mers și a semnalelor.

Diminuarea factorilor perturbatori, proprii naturii muncii personalului de locomotivă, și a celor datorate stării tehnice a vehiculelor feroviare conduce la eliminarea unor posibile erori și accidente de muncă și creșterea eficienței activității la calea ferată [13], [46], [47].

Pe lângă avantajele arătate la cap.1.1., comanda și reglarea principalilor parametri de funcționare a locomotivelor electrice prezintă și alte avantaje, ca de exemplu:

- economisirea de energie electrică;
- menținerea confortului călătorilor la normele prescrise;
- evitarea uzurii rapide a materialului rulant;
- încadrarea în timpii de mers, respectându-se trasele din graficele de circulație;
- evitarea șocurilor din timpul procesului de demaraj sau frânare, deci, a pericolului ruperii trenului;
- realizarea unor forțe de tracțiune-frânare optime, prin

utilizarea la maximum a aderenței dintre roată și șină;

- realizarea caracteristicilor de tracțiune în funcție de rezistențele de mers și de condițiile impuse de circulație;

- frânarea trenului în funcție de viteză (frânarea rapidă, semnal de alarmă, dispozitive de vigilență, control punctual);

- intrarea în acțiune a frânei electrice, independent de manevrarea robinetului mecanicului (regulator de frână);

- intrarea în acțiune a frânei pneumatice, în cazul defec-tării frânei electrice.

În cazul frânării recuperative, sistemele automate de comandă și reglaj trebuie să respecte integral și prevederile fișei UIC 542-2/69.

3.1.2. Metoda de reglare a vitezei motorului asincron

Analizând relația [14] pentru cuplul electromagnetic, se remarcă faptul că există o multitudine de posibilități de reglare a vitezei motorului asincron pentru a realiza o alunecare negativă. Acționarea se poate face fie asupra parametrilor proprii ai mașinii: numărul de poli P , reactanța și rezistența statorului, respectiv rotorului, fie asupra parametrilor tensiunilor sau curenților de alimentare: frecvenței, amplitudinii sau fazei.

Unele din aceste metode sunt inefficiente din punct de vedere tehnic sau economic sau al posibilităților de uzuale de comandă, ceea ce face ca în acționările moderne, în afara modificării numărului de poli (v.1.4.1.), posibilitățile interesante din punct de vedere tehnic să se reducă la trei:

a) Modificarea rezistenței circuitului rotoric, uneori concomitent cu cea a amplitudinii tensiunii statorice de alimentare;

b) Modificarea amplitudinii și frecvenței tensiunii imprimate în rotor, frecvența tensiunii de alimentare a statorului păstrându-se constantă;

c.) Modificarea concomitentă a frecvenței și tensiunii sau curenților statorici, rotorul fiind în scurtcircuit.

Primele două metode nu prezintă interes practic pentru tracțiunea electrică feroviară (limite moderate de reglare 1:3), rezumându-se pentru aplicații la pompe, ventilatoare, etc.

Cea mai eficientă metodă de reglare a vitezei motoarelor asincrone o reprezintă modificarea frecvenței tensiunii, respectiv curentului statoric. Modificarea frecvenței se face astfel încât să aibă loc la flux constant (cuplu electromagnetic maxim), ceea ce implică ca, o dată cu frecvența să aibă loc și o modificare adecvată a tensiunii curentului de alimentare. O altă variantă este funcționarea motorului la randament maxim, ceea ce implică o modificare a fluxului rezultat cu modificarea sarcinii, astfel încât pierderile în mașină să fie minime.

În figura 23 se prezintă, în funcție de turație, modul de variație a principalelor mărimi electrice.

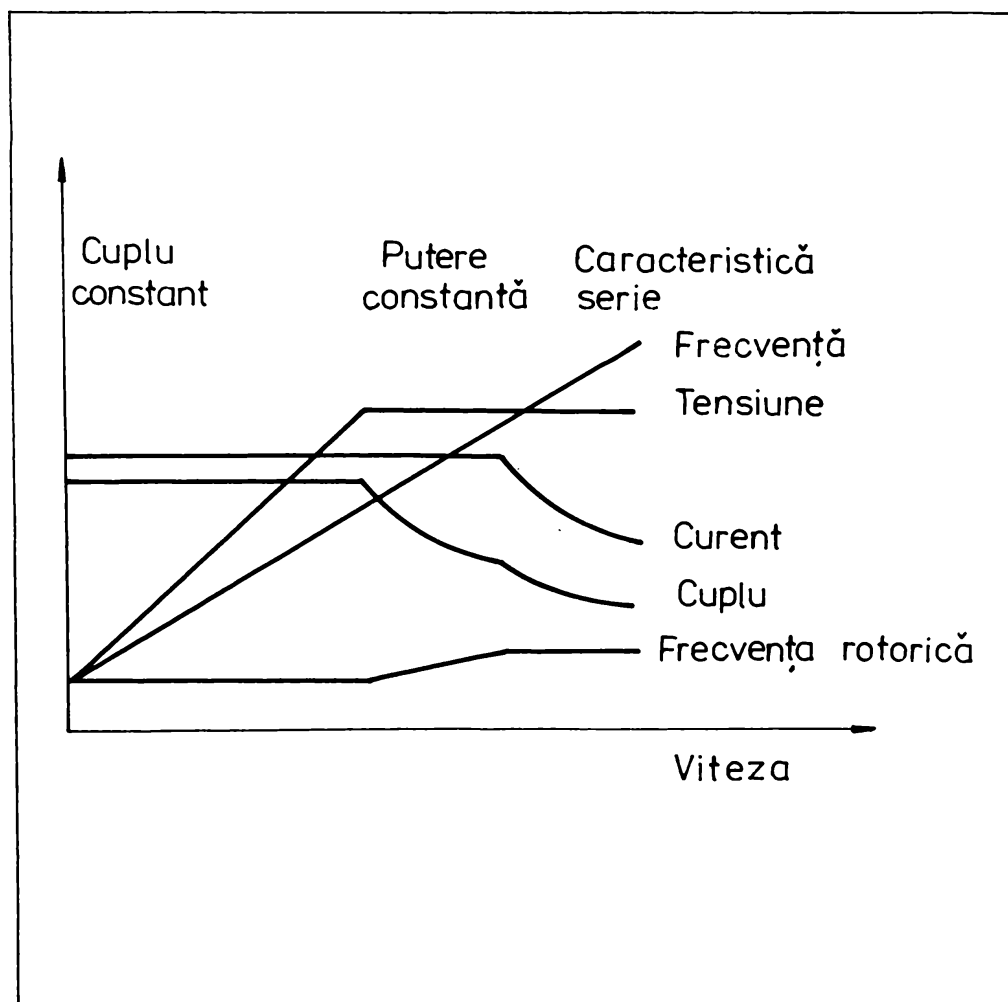


Figura 23. Variația principalilor parametri ai motorului asincron la reglarea frecvenței tensiunii de alimentare.

3.1.2.1. Regimul dinamic și matricea de transfer

Pentru supravegherea regimului dinamic a motorului asincron se recomandă două moduri de reglare: după curentul statoric și turație sau după tensiunea statorică și turație.

În figura 24 este redată schema bloc de reglare după curentul statoric și turație.

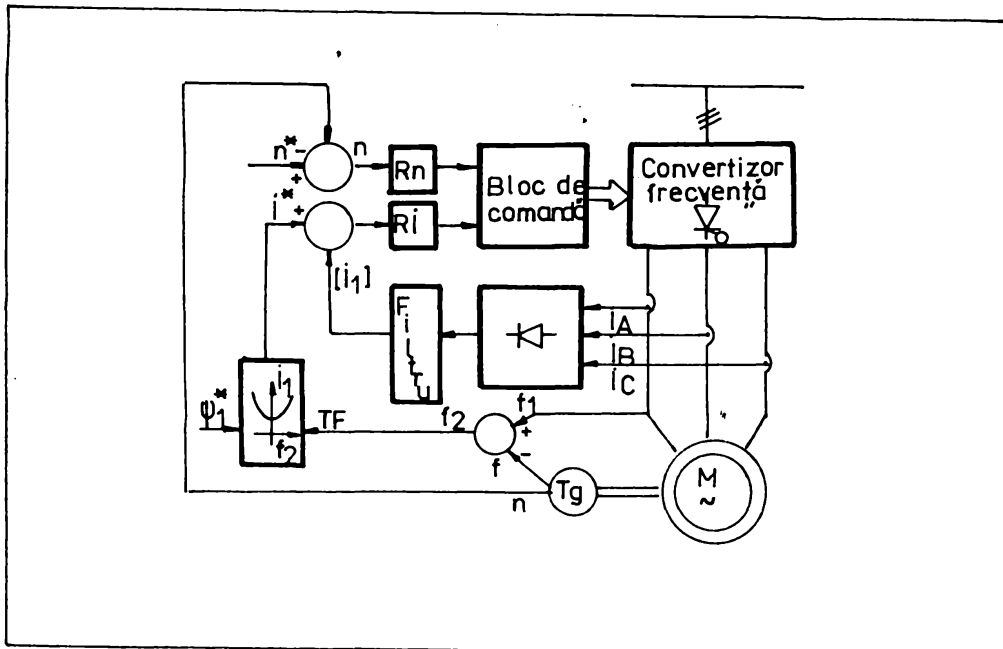


Figura 24. Schema bloc de reglare după curentul statoric și turație.

Redresând într-o punte trifazată semnalele de la cei trei curenți i_A , i_B și i_C , se obține o filtrare corespunzătoare, o informație proporțională cu modul curentului statoric I_1 . Informația privind frecvența rotorică f_2 se obține făcând diferența dintre un semnal proporțional cu frecvența de alimentare f_1 (obținută în realitate direct de la blocul de comandă al invertorului) și un semnal de la un tahogenerator, proporțional cu turația, respectiv, frecvența de rotație a mașinii.

Transformatorul funcțional TF generează, pentru un flux statoric impus, funcție de frecvența rotorică determinată, un semnal proporțional cu curentul statoric impus al mașinii, I_1^* , curent ce se compară cu cel măsurat I_1 , abaterea fiind aplicată regulatorului de curent RI1 ce va acționa asupra tensiunii de

alimentare, în sensul reducerii la zero a erorii de curent.

O funcționare similară o are și bucla de turație. La intrarea regulatorului de turație se compară turația impusă n^i cu cea măsurată n , semnalul de ieșire acționând asupra frecvenței tensiunii de alimentare, urmărind reducerea abaterii de viteză la zero.

Problema principală care se pune într-un sistem de reglare automată este aceea a sintetizării reglatoarelor pe baza funcțiilor, respectiv ale matricilor de transfer a diverselor elemente constitutive ale sistemului (fig. 25 și 26).

În afara funcției de transfer a motorului H_{va} în schema bloc intervine funcția de transfer a elementului de execuție, care se reprezintă, în general, printr-o funcție de transfer de gradul I de tipul: $H_{EE}(s) = K_{EE} / (1 + sT_{EE})$, constanta de timp T_{EE} incluzând întârzierile introduse de filtre pe partea de forță, timpii morți ai convertizorului de frecvență, etc. [39].

Funcția de transfer a traductorului $H_{\theta}(s)$ se poate aproxima printr-un singur factor de transfer, K_{θ} , eventualele întârzieri fiind induse în constanta de timp a filtrului T_F , $H_F(s) = K_F / (1 + sT_F)$.

Se consideră, în prima instanță, acordarea buclei de turație, buclă pentru care este necesară cunoașterea comportării mașinii la comanda de frecvență/tensiune (reglare la flux constant).

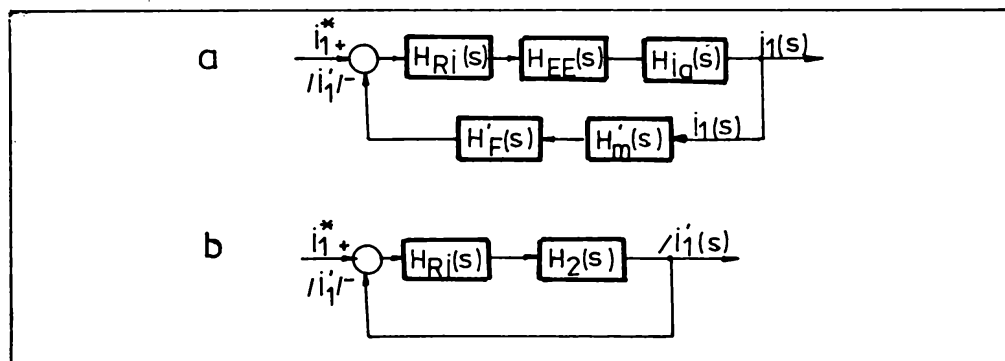


Figura 25. Schema bloc a buclei de turație și răspunsul la comandă treaptă de viteză a motorului asincron.

- a.) - schema bloc a buclei de turație;
 b.) - schema bloc modificată;
 c.) - răspunsul mașinii la treapta impusă de viteză.

Funcția de transfer simplificată a motorului asincron se poate scrie sub forma:

$$\begin{aligned}
 H_{va} &= \frac{k_v}{\left(1 + \frac{s}{p}\right) \left(1 + \frac{s}{\bar{p}}\right)} = \frac{k_v p \bar{p}}{1 + s \frac{p + \bar{p}}{p \bar{p}} + \frac{s^2}{p \bar{p}}} = \\
 &= \frac{k_v (a^2 + b^2)}{1 + \frac{2as}{a^2 + b^2} + \frac{s^2}{a^2 + b^2}} = \frac{k_v^*}{1 + sT_m + s^2T_mT_A} \quad (78)
 \end{aligned}$$

unde p sunt polii complex conjugați ai numitorului:

$$p = a + j^b, \quad \bar{p} = a - j^b, \quad \text{iar } T_m = 2 \frac{a}{a^2 + b^2},$$

$$T_A = \frac{1}{2a}, \quad k_v^* = k_v (a^2 + b^2).$$

Rezultă deci că funcția de transfer a căii directe a buclei modificate de viteză (fig. 26.b.) (minus a regulatorului) se poate scrie ca:

$$\begin{aligned}
 H_1(s) &= H_{va}(s) \cdot H_{EE}(s) \cdot H_n(s) \cdot H_E(s) = \\
 &= \frac{k_v^*}{1 + sT_m + s^2T_mT_A} \cdot \frac{k_{EE}}{1 + sT_{EE}} \cdot \frac{k_m k_f}{1 + sT_E} \cdot \frac{k_1}{(1 + sT_m + s^2T_mT_A) (1 + sT_E)}
 \end{aligned}$$

unde $k_1 = k_v^* \cdot k_{EE} \cdot k_m \cdot k_f$, iar

$$\prod_{i=1}^n (1+sT_{mi}) \approx 1+s(T_{\Sigma E}+T_F+\dots) = 1+sT_{\Sigma}$$

T_{mi} fiind constantele de timp mici adiționale ale sistemului,
 T_{Σ} reprezentând suma lor,

$$T_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n T_{mi}$$

Pentru un astfel de sistem, se recomandă utilizarea unui regulator cu funcția de transfer

$$H_{Rn}(s) = \frac{[1+s(T_1+T_2)+s^2T_1T_2]}{sT_0} \quad (79)$$

astfel încât funcția de transfer directă a căii directe să devină:

$$H_{Rn}(s) \cdot H_1(s) = \frac{[1+s(T_1+T_2)+s^2T_1T_2]}{sT_0} \times \frac{k_1}{(1+sT_m+s^2T_mT_A)(1+sT_2)} \quad (80)$$

Aplicând criteriului modulului propus de Kessler, se aleg următorii parametri pentru constantele regulatorului:

$$T_1+T_2=T_m; T_1 \cdot T_2=T_m \cdot T_A; T_0=2k_1T_{\Sigma}$$

Pe baza acestor relații, funcția de transfer a căii directe devine:

$$H_{Rn}(s) \cdot H_1(s) = \frac{1}{2sT_{\Sigma}(1+sT)} \quad (81)$$

respectiv a buclei închise:

$$\frac{n^{\circ}(s)}{n^*(s)} = \frac{H_{Rn}(s) \cdot H_1(s)}{1+H_{Rn}(s) \cdot H_1(s)} = \frac{1}{1+2sT+2s^2T_{\Sigma}^2} \quad (82)$$

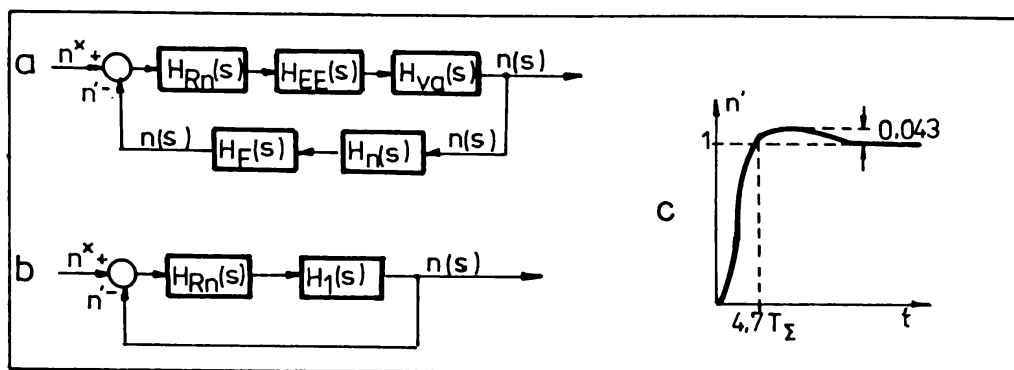


Figura 26. Schema bloc a buclei de curent a motorului asincron; a - schema globala;
b - schema modificată.

Pentru o funcție treaptă de comandă $n^*(t) = 1(t)$ se obține un răspuns de forma:

$$n^{\circ}(t) = 1 + \sqrt{2} e^{-t/T_{\Sigma}} \cdot \sin\left(\frac{t}{2T_{\Sigma}} + \frac{\pi}{4}\right) \quad (83)$$

răspuns deosebit de convenabil (figura 25.a.), prezentând o suprareglare de numai 4,3 % pentru un timp de primă stabilire de $4,7 T_{\Sigma}$.

Dacă sistemul poate fi reprezentativ printr-o singură constantă de timp, atunci se adoptă $T_2 = 0$ și regulatorul de viteză devine clasicul regulator PI.

Pentru acordarea buclei de curent se pornește de la modelul sistemului (figura 26.a.) și de la funcția de transfer pe calea de curent a mașinii:

$$H_{Ia}(s) = \frac{SK_1}{\left(1 + \frac{s}{p}\right) \left(1 + \frac{s}{p}\right)} = \frac{K_I^{\circ} T_m s}{1 + sT_m + s^2 T_m T_A} \quad (84)$$

unde s-au utilizat notațiile folosite în relația ().

$$K_I^{\circ} T_m = K_I (a^2 + b^2)$$

Dacă regulatorul de curent va fi abordat în mod corespunzător, atunci fenomenele se vor desfășura rapid în bucla de curent,

ceea ce permite simplificarea funcției de transfer (84). Pentru cunoașterea răspunsului la timpi apropiați de zero, se poate utiliza teorema valorii finale, care spune că în acest caz operatorul Laplace ia valori foarte mari. În consecință:

$$\begin{aligned} H_{I_{A_{t \rightarrow 0}}}(s) &= H_{I_{A_{s \rightarrow \infty}}}(s) = K_I^\circ \frac{sT_m}{1+sT_m+s^2T_mT_A} \approx \\ &\approx K_I^\circ \frac{sT_m}{s^2T_mT_A} = \frac{K_I^\circ}{1+sT_A} \end{aligned} \quad (85)$$

Rezultă că funcția de transfer a căii directe a buclei modificate (figura 26.b.) (minus a regulatorului) poate fi scrisă:

$$\begin{aligned} H_2(s) &= H_{I_B}(s) \cdot H_{EE}(s) \cdot H_M(s) \cdot H_F(s) \approx \\ &\approx \frac{K_I^\circ}{1+sT_A} \cdot \frac{K_{EE}^\circ}{1+sT_E^\circ} \cdot \frac{K_M^\circ \cdot K_F^\circ}{1+sT_F^\circ} \approx \frac{K_{II}^\circ}{(1+sT_A)(1+sT_\Sigma)} \end{aligned}$$

unde:

$$K_{II}^\circ = K_I^\circ \cdot K_{EE}^\circ \cdot K_M^\circ \cdot K_F^\circ$$

Pentru un astfel de sistem se recomandă utilizarea unui regulator PI de forma:

$$H_{RI}(s) = \frac{1+sT_A}{2sK_{II}^\circ T_\Sigma} \quad (86)$$

care conduce la o funcție de transfer a căii directe:

$$H_{RI}(s) H_2(s) = \frac{1}{2sT_\Sigma(1+sT_\Sigma)} \quad (87)$$

respectiv pentru bucla închisă:

relații identice cu cele ce caracterizează bucla de turație și a cărui răspuns este asemănător cu cel din figura 25.c., evident

$$\frac{I_1^*(s)}{I_1^*(s)} = \frac{H_{RI}(s) H_2(s)}{1 + H_{RI}(s) H_2(s)} = \frac{1}{2sT_{\Sigma}^*(1 + sT_{\Sigma}^*)} \quad (88)$$

însă la o altă scară de timp (T_{Σ} se înlocuiește cu T_{Σ}^*).

Intre tensiunea la borne și fluxul statoric există, de asemenea, o relație liniară, legătura fiind mai complexă, implicând pe lângă frecvența rotorică

$$(f_2 = \Delta\Omega)$$

și frecvența de alimentare

$$(f_1 = \xi)$$

$$U_1 = \Psi_1 f(\Delta\Omega, f_1)$$

Ca și în cazul precedent, aceste relații exacte pentru regimul staționar pot fi considerate aproximativ corecte și pentru regimul dinamic și utilizate în procesul de reglare (figura 27).

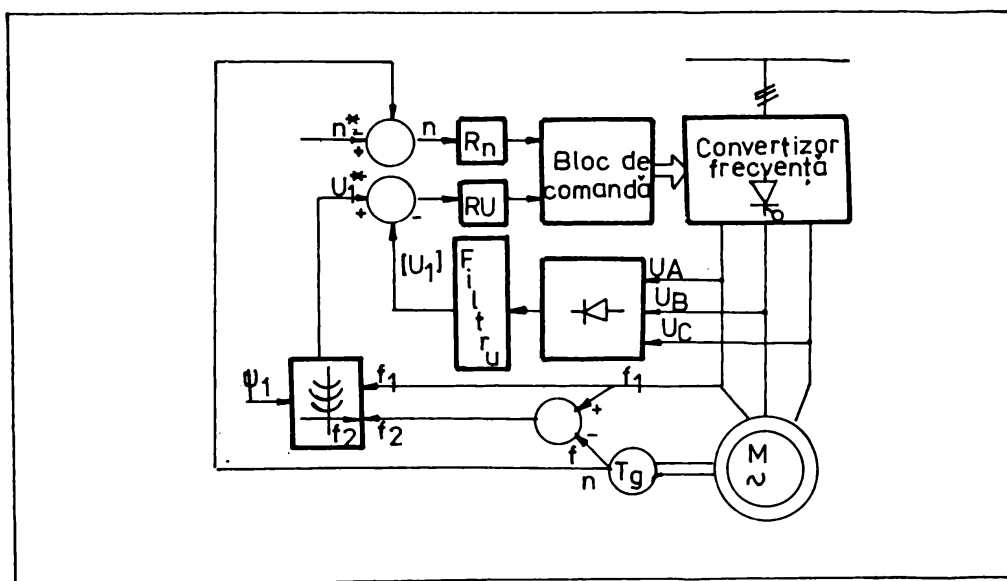


Figura 27. Schema bloc de reglare după tensiunea statorică și turație.

Tensiunea de referință U_1^* ce se obține de la un bloc de calcul sau transformator funcțional, care pe baza fluxului statoric impus Φ_1^* , a frecvenței tensiunii de alimentare f_1 și a celei rotorice f_2 , se compară cu modulul tensiunii la borne, obținut prin redresarea printr-o punte trifazată a tensiunilor U_A, U_B, U_C , realizându-se astfel semnalul de comandă pe tensiune a convertizorului.

O buclă de turație similară cu cea din cazul precedent completează sistemul de reglare a mașinii.

Regulatele de turație și tensiune acordate prin metode asemănătoare celor utilizate în reglarea după curentul statoric permit obținerea unor performanțe similare.

3.1.3. Comanda convertizorului static de frecvență

3.1.3.1. Elemente de comandă ale CSF

Pe locomotivă, convertorul de frecvență face legătura între transformatorul principal (figura 2) și motoarele de tracțiune trifazate.

Se folosesc două sisteme de convertoare statice: directe (cicloconvertoare) și cu circuit intermediar de curent continuu.

Cicloconvertoorul transformă energia de curent alternativ, de anumiți parametri, direct în energie de curent alternativ de alți parametri. Acest tip de convertor poate fi folosit, dacă frecvența sursei de alimentare este sensibil mai mare decât frecvența maximă de alimentare a motoarelor de tracțiune.

În funcție de locul unde se face reglarea tensiunii de ieșire, convertoarele cu circuit intermediar de curent continuu pot fi clasificate în două categorii:

- convertor format dintr-un redresor comandat și un invertor la care tensiunea este reglată în redresor, iar frecvența în invertor;

- convertor format dintr-un redresor necomandat și un invertor cu posibilități de reglare a tensiunii și frecvenței.

Indiferent de tipul convertorului, la locomotivele electrice dispozitivele de reglare și comandă sunt constituite în trei grupe :

- comanda redresorului (comanda 1);

- comanda inverterului (comanda 2);
- comanda locomotivei.

Locomotivele și trenurile electrice sunt dotate cu mai multe motoare electrice de tracțiune. În funcție de puterea motoarelor, acestea sunt comandate fie grupate (2x3, 2x2), fie individual (1x4, 1x6).

Convertoarele funcționează independent unele față de celelalte, conducerea și supravegherea funcționării acestora fiind asigurată de semnalele care se transmit între blocurile de comandă ale convertoarelor și între acestea, și unitatea centrală a echipamentului electronic de putere (la locomotivele S.252 - un microprocesor) [5], [12], [49].

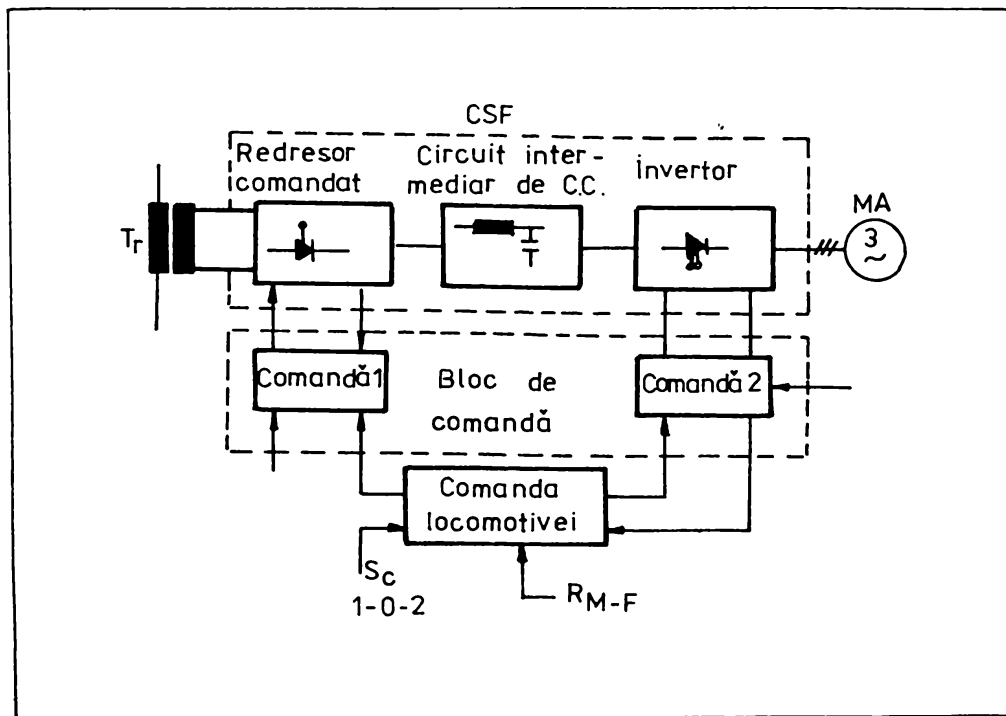


Figura 28. Convertor cu circuit intermediar de curent continuu.

T_r - transformatorul principal; MA - motor asincron trifazat; CSF - convertor static de frecvență; I_m - inversor de mers; R_{M-F} - regulator de mers-frânăre.

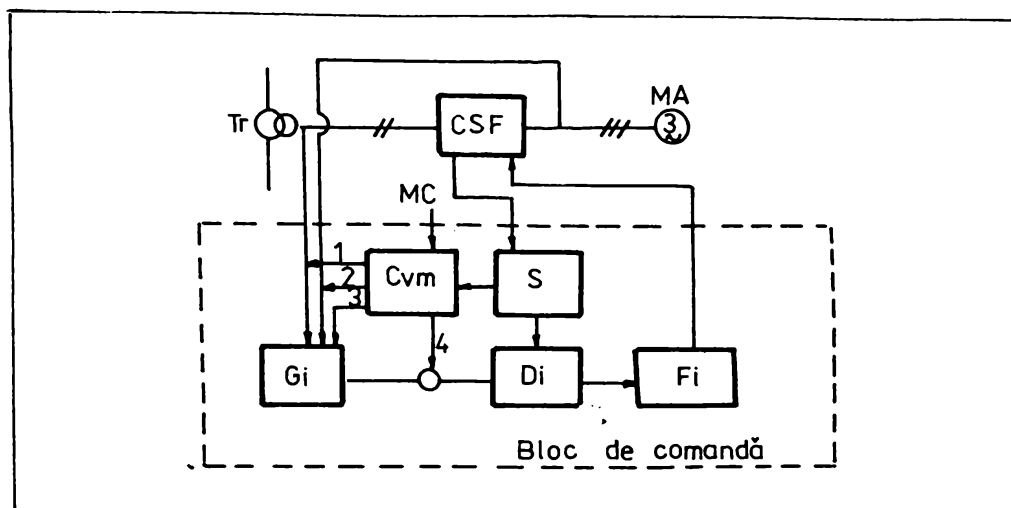


Figura 29. Schema bloc de funcționare a circuitelor de comandă a unui CSF.

G_i - generator de impulsuri de tact; C_{vm} - comanda valorii medii; S - supraveghere; D_i - distribuitor de impulsuri; F_i - formator de impulsuri; M_c - mărime de comandă.

Acest sistem prezintă avantaje considerabile. Intreg procesul de comandă și reglare este condus prin semnale de nivel mic, pierderile de energie fiind aproape neglijabile.

În figura 29 este redată schema bloc de funcționare a circuitelor de comandă a unui convertor static de frecvență CSF.

Funcția principală a blocului de comandă este aceea de a genera semnale de comandă pentru tiristoarele și diodele de putere ce alcătuiesc CSF.

Aceste semnale pot controla principalii parametri de funcționare din tracțiunea electrică trifazată. Prin comanda de impulsuri se poate comanda închiderea și deschiderea tiristoarelor, modulația în durată a tensiunii de ieșire după o lege sinusoidală, modulația în amplitudine, etc.

Se poate regla, astfel, atât tensiunea, cât și frecvența din componentele CSF, într-un cuvânt, regimul de funcționare a locomotivei.

Generatorul de impulsuri G_i (impulsuri de tact obținute de la rețea sau de la sarcină), sub controlul blocului de comandă a valorii medii, repartizează semnalele dispozitivelor semiconduc-

toare din CSF. Această repartiție se realizează prin intermediul circuitelor logice, din distribuitorul de impulsuri D_i .

Circuitele logice sunt comandate de pe locomotivă (regulator mers-frânare) sau de la blocul central (microprocesor).

Semnalele ajung la formatorul de impulsuri F_i , numai dacă primesc acceptul circuitelor de supraveghere.

Se pot crea sisteme în care sunt incluse și programe de mers (timpuri de mers, spații de mers și de frânare, viteze, opriri în stații, etc.).

În general, comenzile sunt grupate în funcție de cerințele concrete de automatizare, specifice activității locomotivelor sau trenurilor electrice luate în studiu. Printre funcțiunile care se pot automatiza, putem enumera: reglarea tensiunii și frecvenței la demarare; reglarea forțelor la demarare și frânare; reglarea frecvenței la mers; reglarea alunecării; controlul alunecării; reglarea după energia maximă recuperată.

Sisteme de reglare și comandă automată la pornire și în regim de mers au fost studiate și prezentate în [8], [22], [48].

Tendința de creștere a vitezei în pantă, peste viteza maximă a secției de remorcare prin comanda trecerii în regim de generator a motoarelor asincrone de tracțiune.

Același regim se aplică motoarelor și la una din următoarele comenzi: frânare în stație, frânare rapidă sau de urgență și frânare de menținere constantă a vitezei.

În figura 30 este prezentată schema de reglare a frânării cu recuperare.

În funcție de tipul circuitului intermediar (de curent sau de tensiune), convertorul de rețea poate fi un redresor comandat sau un invertor. Indiferent de tip, acesta are rolul de a permite în cazul frânării cu recuperare a motoarelor de curent alternativ transformarea tensiunii continue a circuitului intermediar într-o tensiune alternativă, având o frecvență egală cu cea a rețelei și o formă de undă de impulsuri modulate în durată, după o lege sinusoidală. Această modulare sinusoidală a impulsurilor este necesară, deoarece curentul transmis în rețea trebuie să aibă o formă de undă cât mai aproape de o sinusoidă.

Unghiul de fază φ , dintre curentul din rețea și tensiunea

rețelei, este măsurat și comparat în regulatorul R1 cu mărimea impusă φ^* . Diferența dintre aceste mărimi influențează amplitudinea tensiunii U, constituind semnalul modulator pentru impulsurile tensiunii de ieșire a convertorului cu comutație forțată.

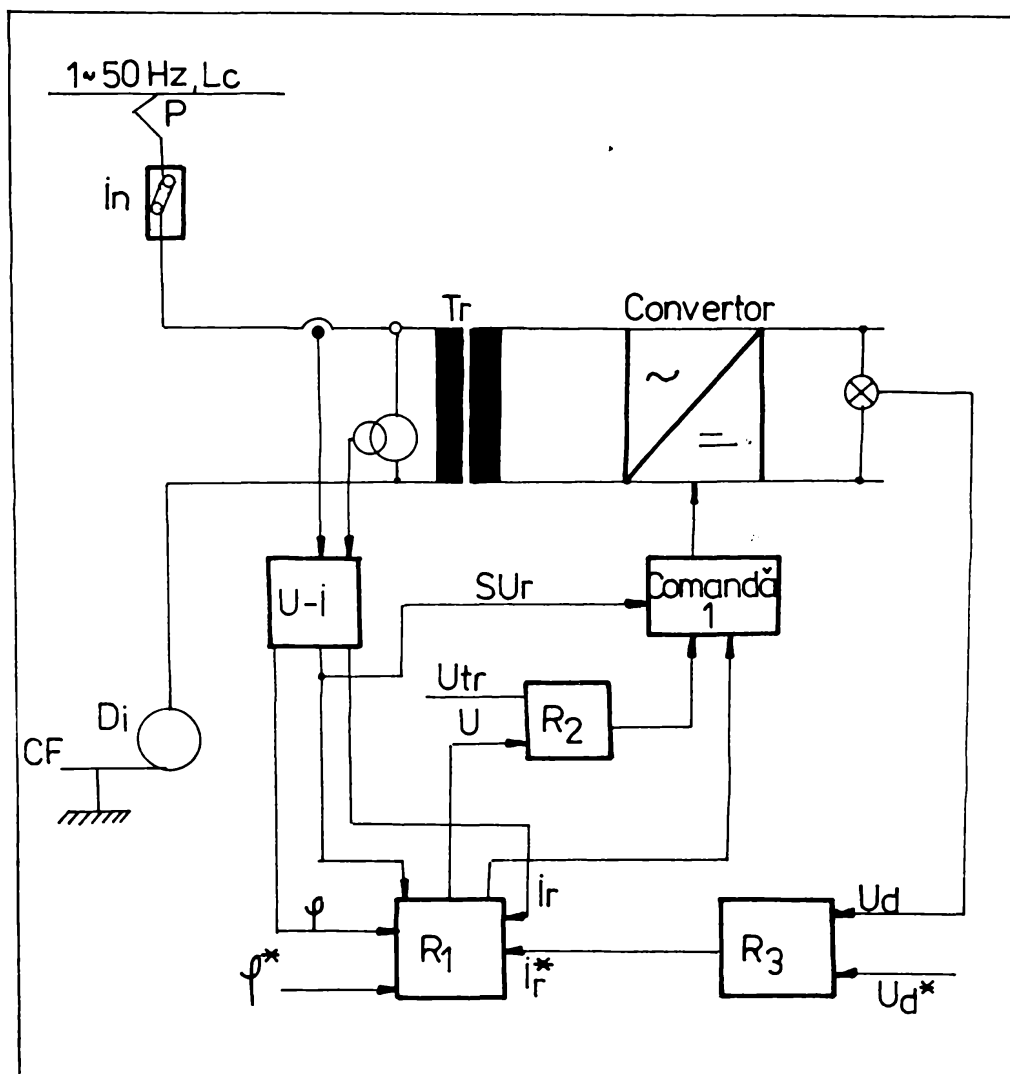


Figura 30. Sistem de reglare a convertorului în regim de debitare în rețea.

φ - unghi de fază; φ^* - unghi de fază impus; R1 - regulator de fază și curent; R2, R3 - regulatoare de tensiune; U-I - bloc de măsură tensiune și curent; U - modulator de tensiune; sU_r -

supraveghere tensiune; U_{\ddagger} - semnal triunghiular tensiune; I_r - curent rețea; I_r^{\ddagger} - curent rețea impus; U_0 - tensiune circuit intermediar; U_0^{\ddagger} - tensiune impusă.

Comanda impulsurilor este condiționată de aparatura de supraveghere a tensiunii recuperate sU_r . Trecerea din regim de motor în regim de generator poate fi automată sau comandată prin regulatorul de frână R_{H-f} .

Trecerea automată se realizează când motorul asincron ajunge la o alunecare suprasincronă și își schimbă semnul alunecării (frecvența mecanică > frecvența statorică).

În acest caz, alunecarea s este negativă, iar cuplul C își schimbă semnul, acționând în sens invers sensului de rotire.

Procesul de frânare se desfășoară invers față de cel de tracțiune. Frecvența statorică se micșorează pe măsură ce viteza locomotivei (trenului) scade. La viteze sub 27...30 % din viteza nominală, se menține constanta de reglare K_r .

În caz de cădere a rețelei sau a frânei de rețea, se trece automat pe frâna electrică rezistivă. În cazul când efortul de frânare este mai mare decât capacitatea de disipare pe rezistențele de frânare - frâna pneumatică completează la coeficientul de frânare necesar.

În figurile 31, 32 sunt prezentate două tipuri de convertizoare statice cu tiristoare care permit funcționarea în regim de recuperare. Figura 32 prezintă un convertizor static de frecvență cu tiristoare cu stingere pe poartă având un invertor de curent cu modulație în durată a impulsurilor. Schema permite funcționarea în patru cadrane.

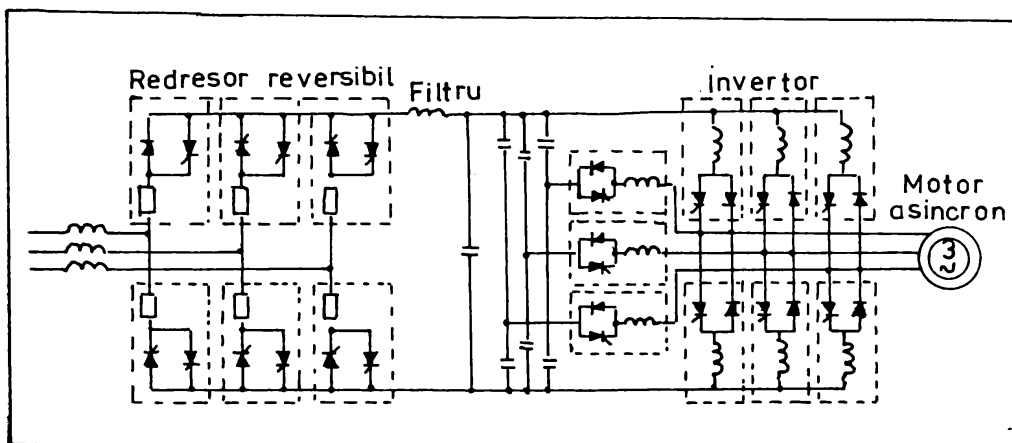


Figura 31. Convertizor static de frecvență cu tiristoare cu funcționare în patru cadrane.

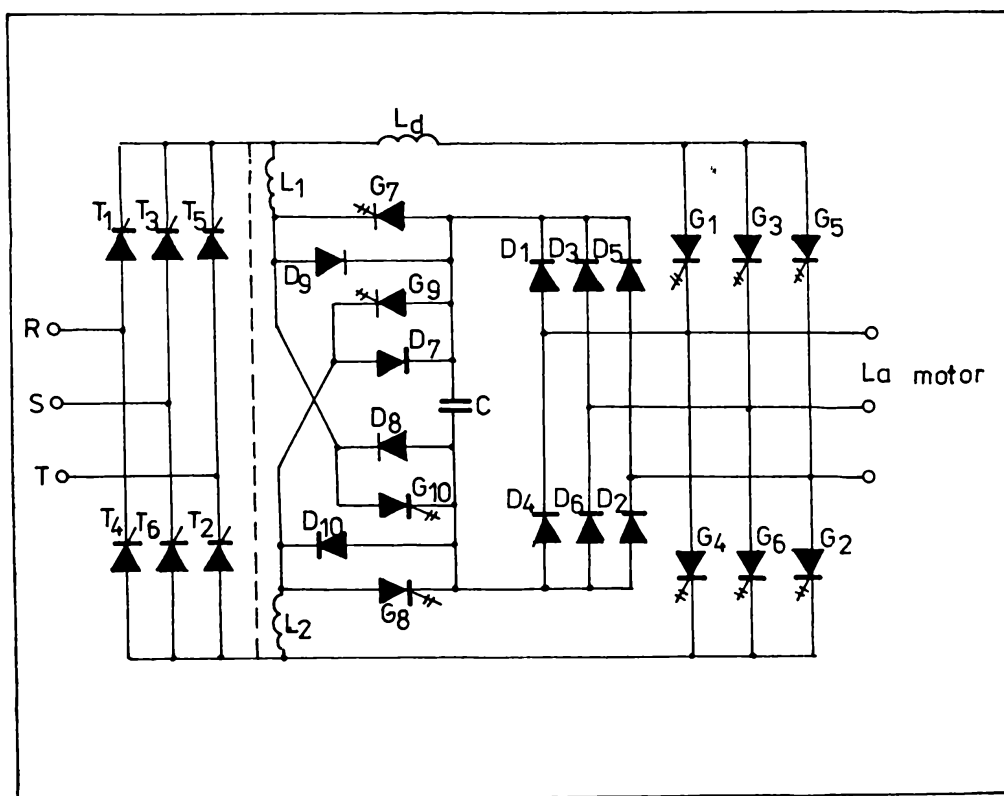


Figura 32. Convertizor static de frecvență cu tiristoare cu stingere pe poartă de curent cu funcționare recuperativă.

Convertizorul este alcătuit din redresorul comandat (T_1-T_6), invertorul în punte realizat cu tiristoare cu stingere pe poartă

(G1-G6), circuitul de recuperare a energiei care conține o punte trifazată (D1-D6), patru tiristoare cu stingere pe poartă (G7-G10), patru diode (D7-D10), condensatorul C și două bobine (L_1 , L_2). G7 și G8 sunt utilizate pentru recuperarea energiei reactive în circuitul intermediar în pulsuri iar G9-G10 în cazul recuperării energiei din sarcină.

Această schemă permite eliminarea supratensiunilor care apar la comutația tiristoarelor cu stingere pe poartă din invertor.

3.1.3.2. Dimensionarea principalelor elemente ale CSF

Pentru dimensionarea unui convertor static de frecvență, conform figurii 33, destinat alimentării unui motor asincron trifazat de tracțiune, sunt necesare următoarele date ale acestui motor:

- a) Puterea nominală P_n [kW];
- b) Tensiunea nominală de linie U_n [V_{ef}];
- c) Curentul nominal I_n [A_{ef}];
- d) Factorul de putere nominal $\cos\phi_n$;
- e) Frecvența nominală f_n [Hz];
- f) Turația nominală n_n [rot/min];
- g) Gama de reglare a frecvenței de alimentare f_1 :

$$f_{min}, f_{max};$$

h) Parametrii din schema echivalentă a motorului se pot determina prin încercări experimentale dacă nu sunt comunicați de firma furnizoare:

- rezistența statorică R_1 [Ω];
- rezistența rotorică raportată la stator R'_2 [Ω];
- reactanța de scăpări statorică X_1 [Ω];
- reactanța de scăpări rotorică, raportată la stator X'_2 [Ω];
- reactanța de magnetizare X_μ [Ω].

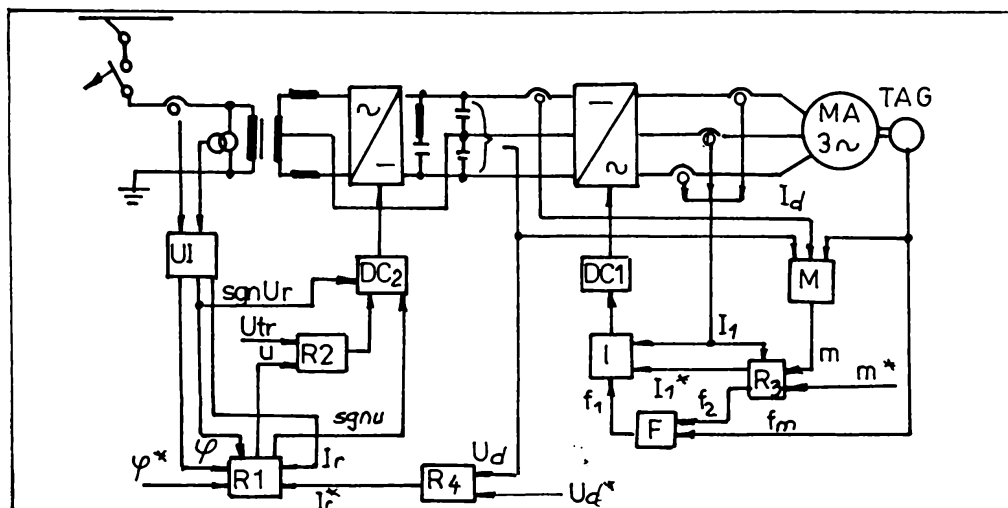


Figura 33. Converter static de frecvență racordat la o rețea monofazată de c.a. pentru alimentarea unui motor de tracțiune de c.a.

Cu datele de mai sus se trasează schemele echivalente ale motorului pentru frecvențele f_n și f_{min} , scheme care sunt redată în figura 34, a și b.

În cazul când reglarea turației motorului asincron se face prin menținerea constantă a fluxului statoric total, înseamnă că tensiunea este variată astfel, ca la bornele reactanței statorice totale $X_1 + X_\mu$ din figura 34 b, să se mențină E_{11} / f_1 constant, ceea ce necesită compensarea căderii de tensiune în rezistența stato-rică R_1 .

În mod aproximativ, se poate deduce valoarea tensiunii de alimentare U_{1min} cu relația:

$$\frac{U_{1min}}{U_1} \approx \sqrt{\left(\frac{f_{min}}{f} + \frac{R_1 \cdot f_2}{c_1 R'_2 f_n}\right)^2 + \frac{R_1^2}{(X_1 + X_\mu)^2}} \quad (92)$$

în care coeficientul c_1 are expresia:

$$c_1 = 1 + \frac{X_1}{X_\mu} \approx 1,02 \dots 1,08$$

presupunând neglijabile pierderile în fier ($R_{Fe} \sim \infty$) și că $X_1 / X_\mu \ll 1$.

Considerând că la frecvența minimă f_{min} , tensiunea de ieșire pe fază a invertorului conține un număr maxim de pulsuri egal cu

m, valoarea instantanee reală a acestei tensiuni, de exemplu pentru faza R, se poate descompune într-o serie Fourier de forma:

$$U_{R0} = \sum_{p=1}^{p=m/12} \sum_{n=1}^{2n=\infty} \frac{8Usibd}{3n\pi} \sin n \frac{\pi}{2} (1 + \cos n \frac{\pi}{3}) (1 + \cos n \frac{\pi}{6}) x$$

$$x \sin n \frac{\pi \lambda}{12} \sin n [\omega_1 t - (p-1) \frac{2\pi}{m} - \frac{\pi \lambda}{12}] \quad (95)$$

în care $p = m/12$ reprezintă numărul de pulsuri corespunzătoare pentru a 12-a parte a perioadei tensiunii de ieșire, iar λ este durata relativă de conectare a inverterului ce variază între 0 și $12/m$ când tensiunea de ieșire variază între valorile nulă și cea nominală U_1 .

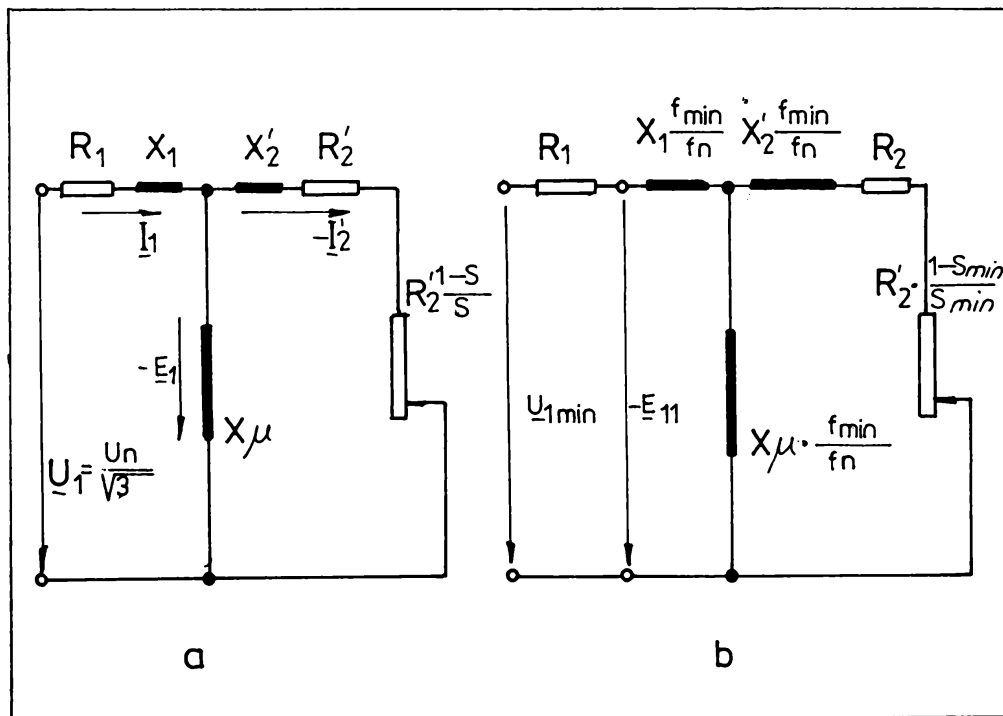


Figura 34. Scheme echivalente ale motorului asincron.

a) - pentru frecvența nominală f_n ;

b) - pentru frecvența minimă f_{min} .

La comanda completă, când $m = 12$ și $\lambda = 1$, se obține o formă de undă a tensiunii de ieșire sub formă de trepte cu 12 pulsuri, a cărei armonică fundamentală are valoarea efectivă:

$$U_1 = 0,436 U_d \quad (96)$$

valoare care trebuie să coincidă cu cea a tensiunii nominale pe fază $U_n / \sqrt{3}$ a motorului.

După determinarea tensiunii minime pe fază U_{1min} din relația (92) se calculează durata relativă de conectare minimă λ_{min} , apelându-se la expresia (100). În acest scop se calculează mai întâi valoarea instantanee a armonicii fundamentale U_{R1} a tensiunii de ieșire pe fază:

$$U_{R1} = 2,38 U_d \sin \frac{\pi \lambda_{min}}{12} \sum_{p=1}^{p=m/12} \sin \left[\omega_1 t - (p-1) \frac{2\pi}{m} - \pi \frac{\lambda_{min}}{12} \right] \quad (97)$$

și cu aproximație suficientă după efectuarea sumei:

$$U_{R1} = 2,38 \frac{m}{12} U_d \sin \frac{\pi \lambda_{min}}{12} \sin \left[\omega_1 t - \left(\frac{m}{12} - 1 \right) \frac{\pi}{m} - \pi \frac{\lambda_{min}}{12} \right] \quad (98)$$

Ținând seama că unghiul $\pi \lambda_{min} / 12$ este foarte mic, de ordinul a câteva grade, iar expresia lui U_{R1} este obținută prin însumarea a $m/12$ termeni ce sunt practic egali între ei, se determină valoarea efectivă a tensiunii U_{R1} ce trebuie să coincidă cu U_{1min} .

$$U_{1min} = \frac{1}{\sqrt{2}} 2,38 U_d \frac{\pi \lambda_{min}}{12} \frac{m}{12}$$

de unde se deduce valoarea lui λ_{min}

$$\lambda_{min} = 0,186 \frac{144}{m} \frac{U_{1min}}{U_d} = 0,0815 \frac{144}{m} \frac{U_{1min}}{U_1} \quad (100)$$

Această valoare pentru durata relativă de conectare a inverterului permite să se determine curentul de pornire al motorului asincron la frecvența f_{min} , curent pe baza căruia se face dimensionarea tiristoarelor principale ale inverterului. În acest scop, se determină impedanța echivalentă a motorului conform figurii 34.b, considerând că alunecarea acestuia este egală cu 1:

Cunoscându-se valoarea acestei impedanțe se poate exprima

$$\begin{aligned}
Z_{\text{ech}} = R + jX = R_1 + \frac{R_2 X_\mu \left(\frac{f_{\min}}{f_n}\right)^2}{(R_2)^2 + (X_2 + X_\mu)^2 \left(\frac{f_{\min}}{f_n}\right)^2} + \\
+ jX_1 \frac{f_{\min}}{f_n} + \frac{X_\mu \left[(R_2^\circ)^2 + X_2^\circ (X_2^\circ + X_\mu) \left(\frac{f_{\min}}{f_n}\right)^2 \right] \frac{f_{\min}}{f_n}}{(R_2^\circ)^2 + (X_2^\circ + X_\mu) \left(\frac{f_{\min}}{f_n}\right)^2} \quad (101)
\end{aligned}$$

valoarea instantanee reală a curentului de pornire la frecvența f_{\min} , sub forma:

$$\begin{aligned}
i_p = \sum_{i=1}^{p-m/12} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8U_2}{3n\pi} \sin n \frac{\pi}{2} (1 + \cos n \frac{\pi}{3}) (1 + \cos n \frac{\pi}{6}) x \\
x \sin n\pi \frac{\lambda_{\min}}{12} \frac{\sin n \left[\omega_1 t - (p-1) \frac{2\pi}{m} - \pi \frac{\lambda_{\min}}{12} - \varphi(n) \right]}{\sqrt{R^2 + n^2 X^2}} \quad (102)
\end{aligned}$$

în care $\omega_1 = 2\pi f_{\min}$, iar unghiul de defazaj $\varphi(n)$ este dat de relația:

$$\cos n\varphi(n) = \frac{R}{\sqrt{R^2 + n^2 X^2}} \quad (103)$$

Considerând prin aproximație că, curentul i_p trece prin valoarea nulă după un unghi $\gamma + \varphi_1$ față de origine:

$$\gamma + \varphi_1 = \left(\frac{m}{12} - 1\right) \frac{\pi}{m} + \pi \frac{\lambda_{\min}}{12} + \varphi_1 \quad (104)$$

Curentul mediu ce trece printr-un tiristor principal, de exemplu T1, conform figurii, este dat de relația:

$$I_{T1AV} = \frac{1}{2\pi} \int_{\gamma + \varphi_1}^{\pi} i_p d(\omega_1 t) \quad (105)$$

În ceea ce privește curentul mediu ce parcurge un tiristor de stingere, de exemplu T_{11} , se poate determina expresia:

$$I_{T_{11},AV} = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi}^{\pi + \frac{7\pi}{6}} i_p d(\omega_1 t) + \frac{m}{3} U_d C \quad (106)$$

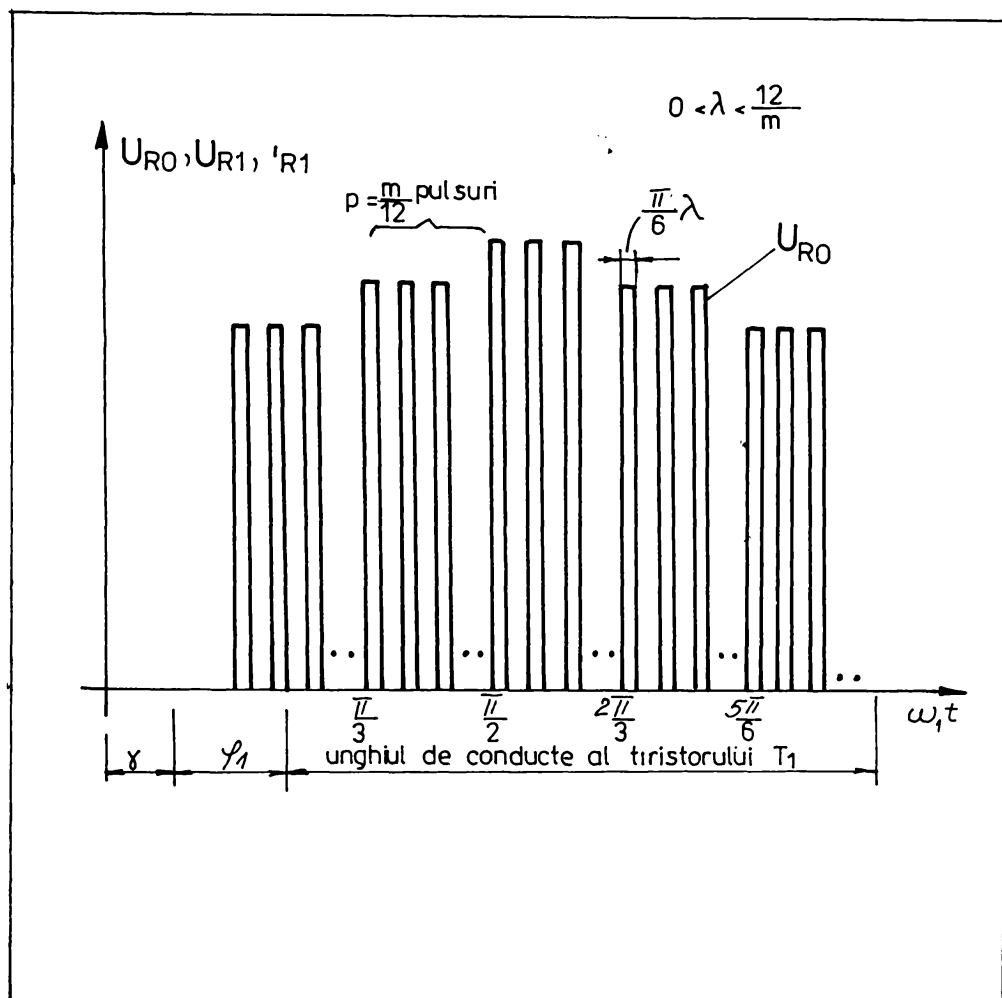


Figura 35. Formele de undă ale tensiunilor de ieșire pe fază totală U_{R0} și de armonică fundamentală U_{R1} precum și a curentului de armonică fundamentală pe fază I_{R1} .

Dimensionarea elementelor de comutație L și C se poate face prin:

$$L = \frac{2,5 t_g}{\pi I_{smax}} \left(\frac{U_d}{2} \right) \quad (107)$$

$$C = \frac{5,63 t_g I_{smax}}{\pi \left(\frac{U_d}{2} \right)} \quad (108)$$

în care valoarea curentului I_{smax} reprezintă valoarea maximă a lui i_p .

3.1.3.3. Program de calcul în limbaj Turbo Pascal pentru dimensionarea convertorului static de frecvență

Pentru dimensionarea unui convertor static de frecvență destinat alimentării unui motor asincron trifazat de tracțiune sunt necesare următoarele date ale acestui motor:

- 1.) Puterea nominală P_n [kW];
- 2.) Tensiunea nominală de linie U_n [V_{ef}];
- 3.) Curentul nominal I_n [A_{ef}];
- 4.) Factorul de putere nominal $\cos \varphi_n$;
- 5.) Frecvența nominală f_n [Hz];
- 6.) Turația nominală n_n [rot/min];
- 7.) Gama de reglare a frecvenței de alimentare $f_1: f_{min} f_{max}$;
- 8.) Parametrii din schema echivalentă a motorului care se pot determina prin încercări experimentale dacă nu sunt comunicați de fabrica furnizoare:
 - rezistența statorică R_1 [Ω];
 - rezistența rotorică raportată la stator R_2 [Ω];
 - reactanța de scăpări statorică X_1 [Ω];
 - reactanța de scăpări rotorică raportată la stator X_2 [Ω];
 - reactanța de magnetizare X_μ [Ω].
- 9.) Invertor $m = 12$.

Se cere:

$$\frac{U_{1\min}}{U_1} = \sqrt{\left(\frac{f_{\min}}{f_n} + \frac{R_1}{C_1 R_2} \frac{f_{\min}}{f_2}\right)^2 + \frac{R_1^2}{(X_1 + X_\mu)^2}}$$

$$C_1 = 1 + \frac{X_1}{X_\mu} \approx 1,02 \dots 1,08$$

$$\lambda_{\min} = 0,0815 \frac{144}{m} \frac{U_{1\min}}{U_1}$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$

$$U_d = \frac{U_1}{0,436}$$

$$i_p = \frac{0,622 U_d \lambda_{\min}^{p-12}}{\sqrt{R^2 + X^2}} \sum_{p=1}^{p=12} \sin\left[\omega_1 - (p-1) \frac{\pi}{72} - \pi \frac{\lambda_{\min}}{12} - \varphi_1\right]$$

$$I_T = \frac{1}{2\pi} \int_{11 \frac{\pi}{144} + \pi \frac{\lambda_{\min}}{12} + \varphi_1}^{\pi} i_p d(\omega_1 t) =$$

$$= \frac{870}{2} \left[\cos\left(11 \frac{\pi}{144} + \pi \frac{\lambda_{\min}}{12} + \varphi_1\right) + 1 \right]$$

$$* \quad L = 1,25 t_g \frac{2,5 U_d}{2\pi I_{smax}} [\mu H]$$

Notă:

(*) Din baza de memorie se alege tipul tiristorului.

$$C = 1,25 t_g \frac{2,5,63 I_{smax}}{\pi U_d} [\mu F]$$

$$** \quad L_p = \frac{U_d/2}{di/dt}$$

ex: tiristor tip T 290 F fabricat AEG cu caracteristicile:

- tensiunea inversă de vârf repetitivă în stzare blocată

$$U_{RRM} = 1200 \text{ V};$$

- curentul mediu redresat $I_{TAV} = 290 \text{ A};$

- timpul de revenire $t_g = 25 \mu s;$

- viteza critică de creștere a curentului de conducție directă $di/dt = 200 \text{ A}/\mu s.$

(**) Din baza de memorie se alege tipul condensatorului.

ex: tip B 25838 - A 8106 (19 cond. legătură în paralel);

$$C = 10 \mu F; U_{ef} = 800 \text{ V}; du/dt = 250 \text{ V}/\mu s.$$

```
uses crt,printer;
var Pn,Un,fn,Iin,nn,fmin,fmax,R1,R21,X1,X21,Xmiu,
Ismax,tg,didt,p,U1,Ulmin,U10,c1,lambdamin,cosfi,omega,fi,
Y1,Y2,Ud,ip,IT,L,C,Lp:real;
begin
{Declaram valorile constantelor}
Pn:=150*100
Un:=380
Iin:=285
fn:=50
nn:=1470/60
fmin:=2.5
fmax:=100
R1:=0.021;
R21:=0.017;
X1:=0.067;
X21:=0.076;
Xmiu:=4.14;
Ismax:=870;
```



```

tg:=25/100000;
U1:=Un/sqrt(3);
didt:=200*100000;
{Calcul valoare c1}
clrscr;
c1:=1+X1/Xmiu;
{Calcul valoare U1min/U1}
Y1:=(fmin/fn)+(R1*fmin/(c1*R21*fn));
U10:=sqrt(Y1*Y1+R1*R1/(X1+Xmiu)*(X1+Xmiu));
{Calcul valoare lambdamin}
Lambdamin:=0.0815*144*U10/12;
{Calcul valoare cosfi}
cosfi:=R1/sqrt(R1*R1+X1*X1);
{Calcul valoare U1min}
U1min:=U10*U1;
{Calcul valoare Ud}
Ud:=U1/0.436;
{Calcul valoare L}
L:=1.25*tg*2.5*Ud*100000/(2*pi*Ismax);
{Calcul valoare C}
C:=1.25*tg*2*5.63*Ismax*100000/(pi*Ud);
{Calcul valoare Lp}
Lp:=Ud/(2*didt)*100000;
cosfi:=0.946;
fi:=1.9999;
p:=1;
repeat
Y2:=sin((2*pi*nn-(p-1)*pi/72-pi*lambdamin/12-fi));
until p<13;
ip:=0.622*Ud*lambdamin*Y2/sqrt(R1*R1+X1*X1);
IT:=870*(cos(11*pi*144+pi*lambdamin/12+fi)+1)/2;
{Listare la ecran a rezultatelor obtinute}
writeln('');
writeln('');
writeln('');
writeln('====='');
writeln('Constanta          c1 =',c1:5:2,'      ');

```

```

writeln('Raportul          U1min/U1 =',U10:5:2,'      ');
writeln('Durata relativa de conec.=' ,lambdamin:5:2,'[s]      ');
writeln('Valoarea unghiului      cosfi =',cosfi:5:2,'      ');
writeln('Tensiunea de alimentare U1min =',U1min:5:2,'[V]      ');
writeln('Tensiunea de durata      Ud =',Ud:5:2,'[V]      ');
writeln('Inductanta                L =',L:5:2,' [microH] ');
writeln('Capacitatea                C =',C:5:2,' [microF] ');
writeln('Inductanta de limitare    Lp =',Lp:5:2,'[microH] ');
writeln('Curentul de pornire         ip =',ip:5:2,'[A]      ');
writeln('Curentul mediu prin tiristor IT=' ,IT:5:2,'[A]      ');
writeln(' ===== ');
readln;
{Listare la imprimanta a rezultatelor obtinute}
writeln(1st,' ');
writeln(1st,' ');
writeln(1st,' ');
writeln(1st,' O===== ');
writeln(1st,'Constanta          c1 =',c1:5:2,'      ');
writeln(1st,'Raportul          U1min/U1 =',U10:5:2,'      ');
writeln(1st,'Durata relativa de con.=' ,lambdamin:5:2,'[s]      ');
writeln(1st,'Valoarea unghiului      cosfi =',cosfi:5:2,'      ');
writeln(1st,'Tensiunea de alim. U1min =',U1min:5:2,'[V]      ');
writeln(1st,'Tensiunea de durata      Ud =',Ud:5:2,'[V]      ');
writeln(1st,'Inductanta                L =',L:5:2,' [microH] ');
writeln(1st,'Capacitatea                C =',C:5:2,' [microF] ');
writeln(1st,'Inductanta de limitare    Lp =',Lp:5:2,'[microH] ');
writeln(1st,'Curentul de pornire         ip =',ip:5:2,'[A]      ');
writeln(1st,'Curentul mediu prin tiristor IT =',IT:5:2,'[A]      ');
writeln(1st,' ===== ');
readln;
end.

```

Constanta	c1	1.02
Raportul	U_{\min}/U_1	0.11
Durata relativa de conectare		0.11 [s]
Valoarea unghiului	cos ϕ_i	0.95
Tensiunea de alimentare	U_{\min}	24.74 [V]
Tensiunea de durata	U_d	503.20 [V]
Inductanta	L	7.19 [microH]
Capacitatea	C	193.65 [microF]
Inductanta de limitare	L_p	1.26 [microH]
Curentul de pornire	i_p	440.90 [A]
Curentul mediu prin tiristor	IT	242.67 [A]

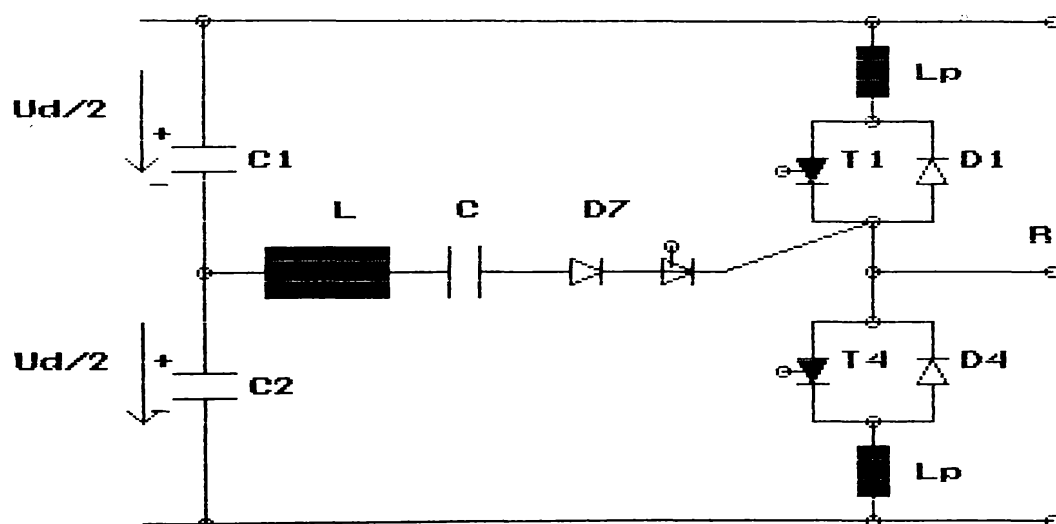


Figura 36

Schema conectarii inductantelor de limitare la di/dt

L = bobina

C = condensator

L_p = inductor de limitare

Capitolul 4. CERCETARI EXPERIMENTALE PRIVIND FRINAREA RECUPERATIVA IN TRACTIUNEA TRIFAZATA

4.1. Cercetări experimentale privind funcționarea motorului asincron trifazat cu rotorul în scurtcircuit în regim de generator

4.1.1. Condiții de experimentare

Pe standul construit de autor în depoul de locomotive Dej Triaj s-au făcut încercări și măsurători în regim de generator a unui motor asincron trifazat având caracteristicile:

$P = 4 \text{ KW}$, $U_n = 380 \text{ V}$, $I_n = 8,3 \text{ A}$, $\cos \varphi = 0,85$, $n = 3000 \text{ rot/min}$, clasa de izolație E, rezistența Ohmică de înfasurare $0,640 \text{ Mohm}$, rezistența de izolație min 50 Mohm .

În figura (37) este redată schema electrică generală de principiu a standului de probă, pe care am făcut încercările și măsurătorile privind funcționarea la alunecări negative ale motorului asincron.

Motorul asincron MA este antrenat la turatie variabila de care un motor de către un motor continuu MC cu caracteristicile: tip CE _ C44, $P = 4 \text{ KW}$, $U_n = 100\text{V}$, $I_n = 49 \text{ A}$, clasa de izolație B, $n_n = 3600 \text{ rot/min}$.

Motorul MC este alimentat cu tensiune variabila de la convertorul de tip CPT 380.6.170 alimentat de la priza exterioară $3 \times 380 \text{ V}$ ($U_a = 380 \text{ V}$, $I_a = 170 \text{ A}$).

Motorul asincron MA debitează prin convertizorul de frecvență CSF, format din redresorul C_v , condensatorul C (circuitul intermediar) și inversorul I_v .

Sarcina R este construită din 6 rezistențe de valoare totală $1,6 \times 6 \text{ Kohmi}$.

Redresorul C_v este de tip 11 KVA și este format din 1×3 diode redresoare tip KS 10/60 (60 A/1000 V).

Circuitul intermediar C este format din 5 acumulatori tip 12Es 320 legați în serie iar invertorul I_v este de tip 5KVA și este format din doi tiristori de putere T 100 A/ 1100 V și 2 diode KS 11/60, (60A /1100 V).

În figura (38) este prezentat grupul MC - MA, supus

experimentarii.

In figura (39) este prezentata sarcina R , cu valoare totala de $1,6 \times 6$ Kohmi.

In figura (40) este prezentat convertorul cu tensiune variabila tip CPT 380.6.170.

In figura (41) este prezentat convertorul static de frecventa CSF.

In figura (42) este prezentata aparatura de captare si masura.

4.1.2. Metode de captare și înregistrare a semnalelor de pe standul experimental.

Captarea semnelor de pe standul experimental s-a facut prin metoda de înregistrari discontinue. La diferite valori ale frecventei de comanda s-au masurat valorile tensiunii si curentului de comanda.

Masuratorile s-au facut la circuitul intermediar (punctele de masura 6, 7) si la iesirile din invertor (punctele de masura 8, 9). Semnalele de la punctele 8, 9 au fost primite prin traductorul R 1/20 (20 A/60 mV), iar cele din circuitul intermediar prin sonda R 1/10. Viteza valorica a motorului asincron AM a fost masurata prin metoda stroboscopica si afisata direct la turometru calculator tip N 2630.

Semnalele privind U , I au fost afisate direct prin osciloscop cu doua spoturi tip E 0109, 0 - 25 MHz, iar frecventa de comanda la versatesterul E 502.

Tensiunea si curentul de alimentare de la convertorul tip CPT 380.6.170 au fost indicate prin afisare directa la aparatura de comanda de pe bloc.

4.1.3. Analiza regimurilor și a semnalelor înregistrate la încercari pe stand.

Pe baza semnalelor înregistrate s-a trecut la analiza regimurilor de functionare a motorului asincron cu rotorul in scurtcircuit.

In fotografiile nr.43, 44, sunt prezentate tensiunea si curentul debitat la MA.

In fotografiile nr.45-52 sunt prezentate tensiunea si curentul debitat dupa invertor de la diferite frecvente de comanda si evolutia tensiunii din circuitul intermediar.

Fotografiile sunt efectuate dupa semnalele aparute la ecranul osciloscopului E 0109, pentru fiecare semnal inmagazinat.

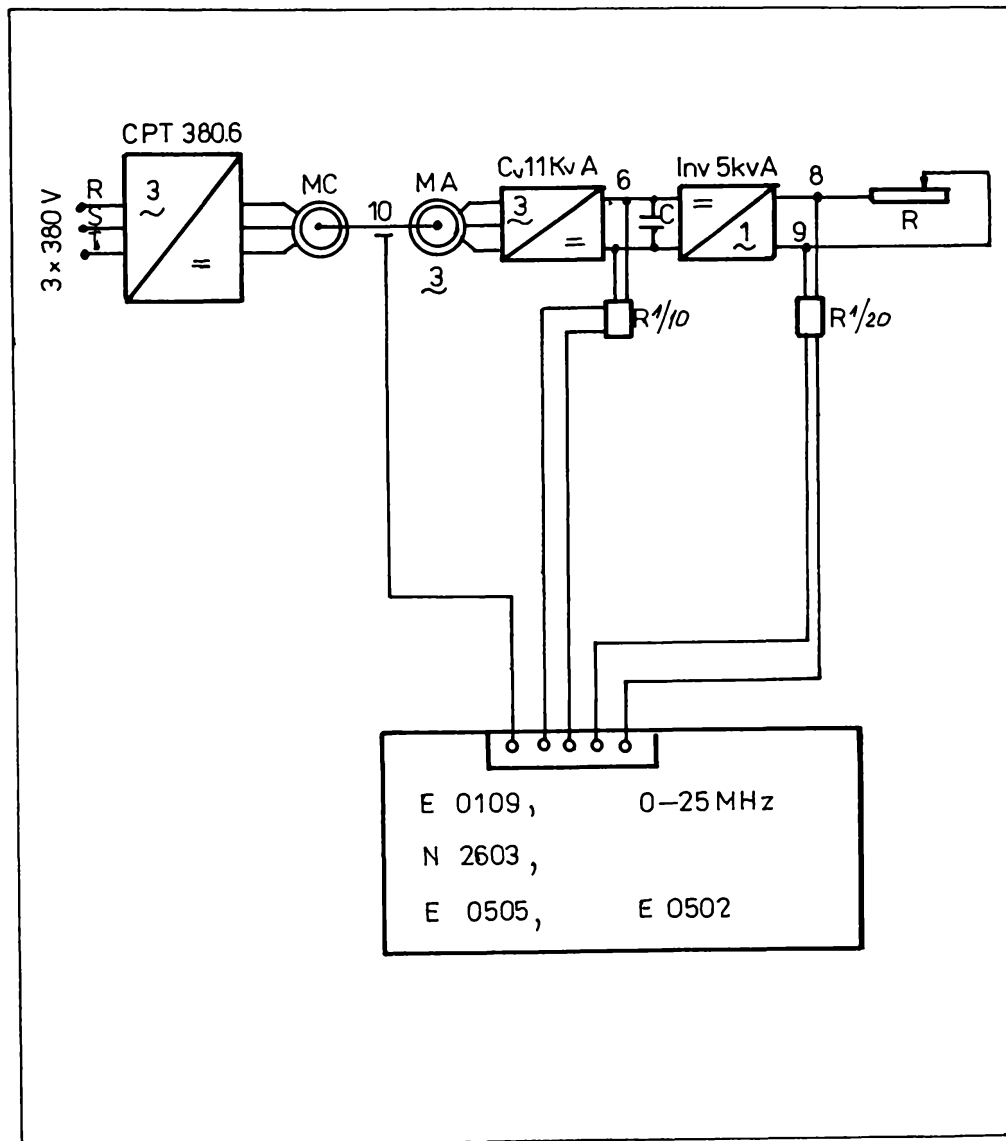


Figura 37. Schema electrica generala de principiu al standului de proba.

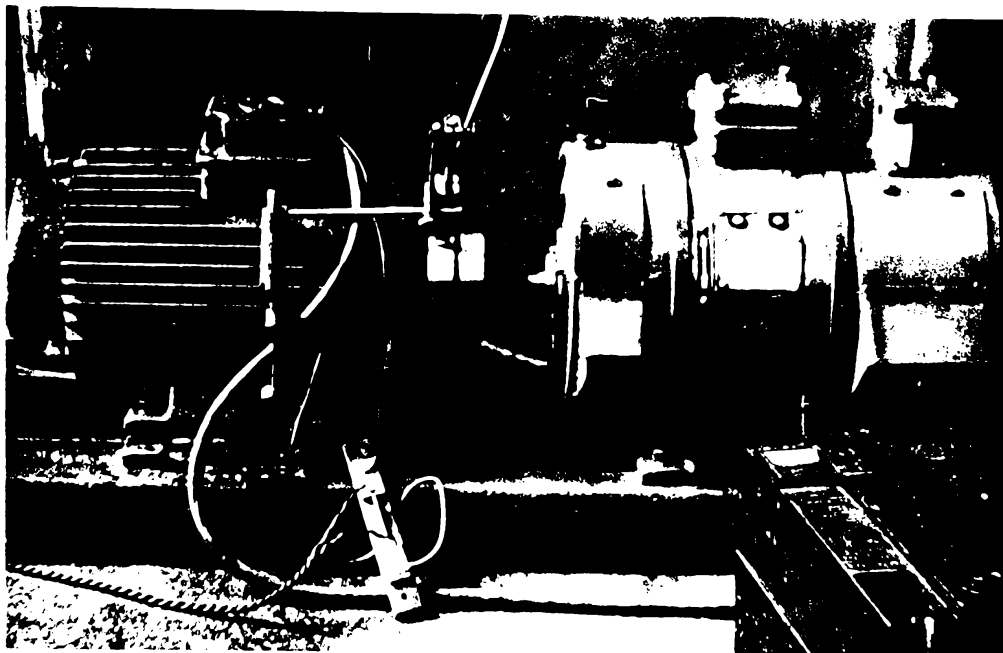


Figura 38. Grupul MC -MA

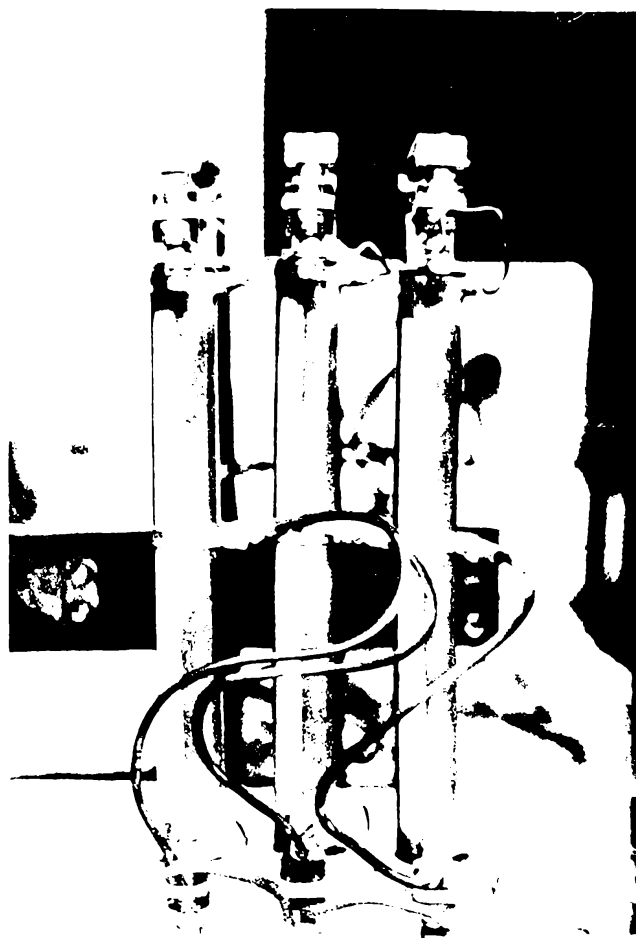


Figura 39. Sarcina R.

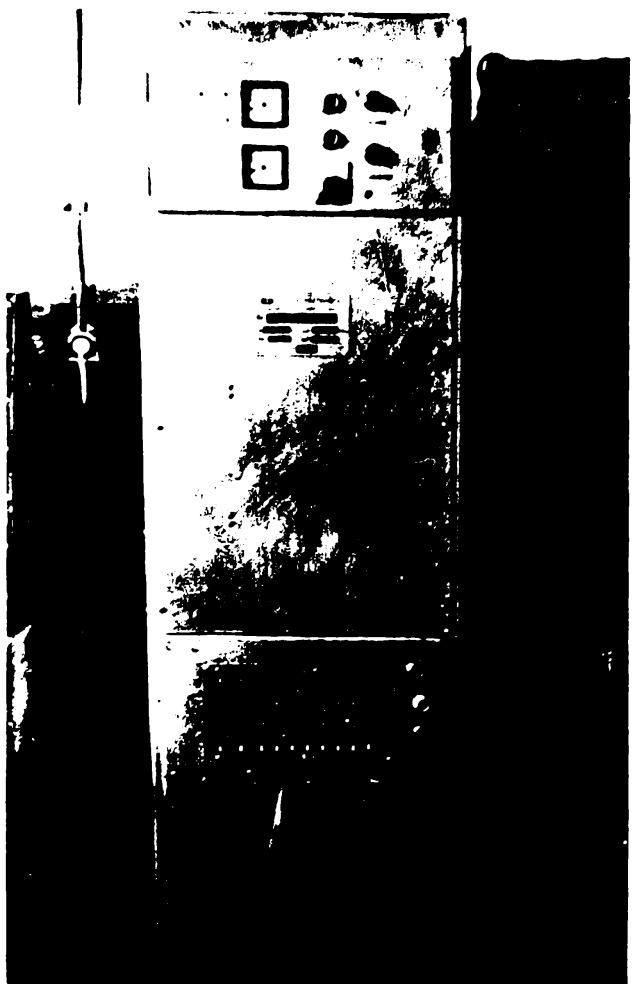


Figura 40. Cor

tip CPT - 380.6.

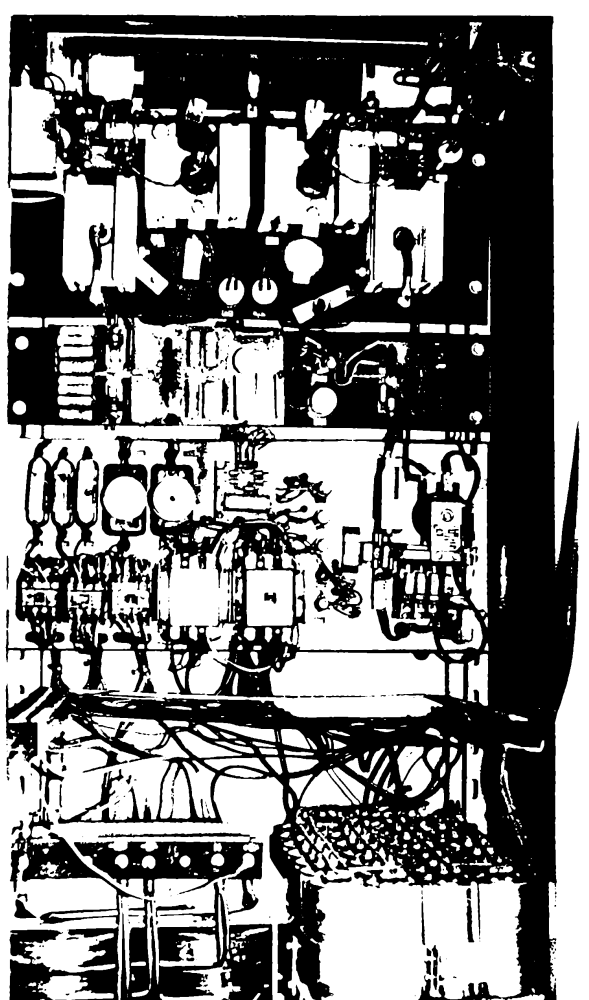
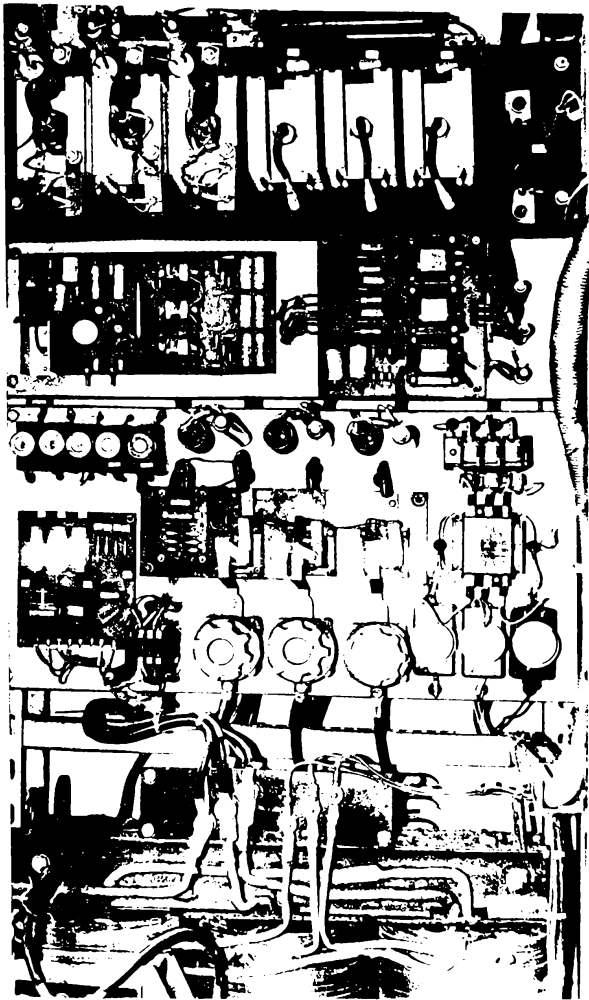


Figura 41.

Tranzistor CSF

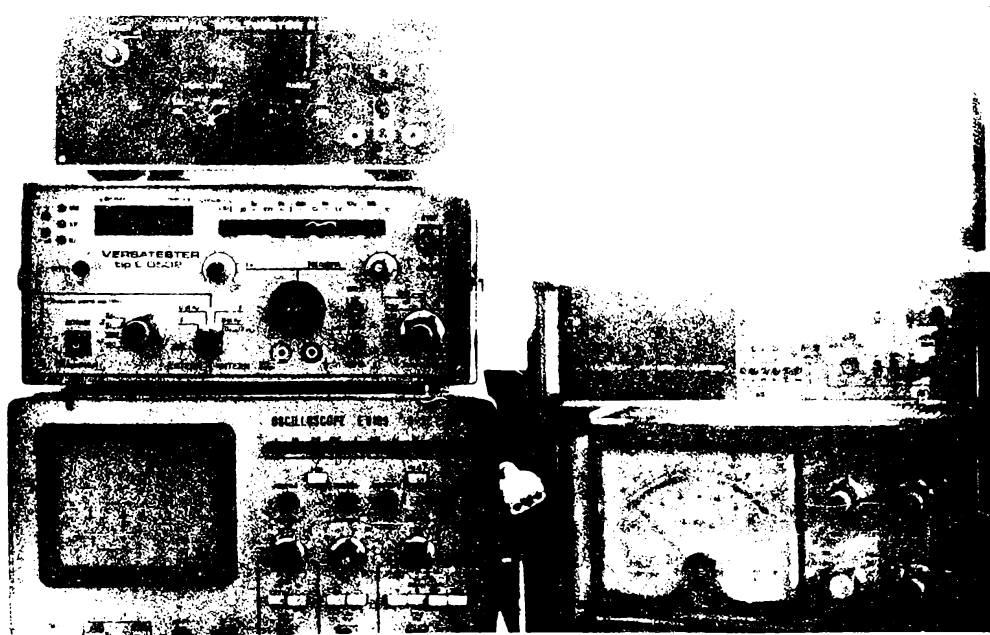


Figura 42.

si masur

Scarile osciloscopului au fost stabilite in functie de semnale si anume:

- pentru curentul alternativ: 0,07 A/div, 1 ms;
- pentru tensiunea alternativa: 3,00 V/div, 1 ms;
- pentru tensiunea continua: 12,50 V/div, 1 ms.

4.1.4. Considerații asupra rezultatelor măsurătorilor pe ștandul de probă.

Din analiza fotogramelor nr. 21 - 30 reiese posibilitatile de functionare a motorului asincron cu rotorul in scurtcircuit, in regim de generator.

Alunecarile au fost negative prin $n_{MC} > n_{MA}$.

Perturbatia maxima a semnalelor iesite de la MA, a fost de ~ 16 % in cazul tensiunii, si ~ 3 % in cazul curentului.

In circuitul intermediar perturbatia semnalului a fost sub 2%.

Semnalele la iesire dupa inverter au fost influentata de frecventa de comanda $f_{min} = 10$ Hz, si $f_{max} = 50$ Hz.

Reiese clar influenta frecventei asupra recuperarii de energie si implicit asupra cuplului de frinare.

La frecvente de valori mai mici, produsul UI este mai mare.

Prin integrarea produsului UI se poate calcula energia recuperata.



Figura 43. U_{R-T} la $n = 3052$ rot/min.

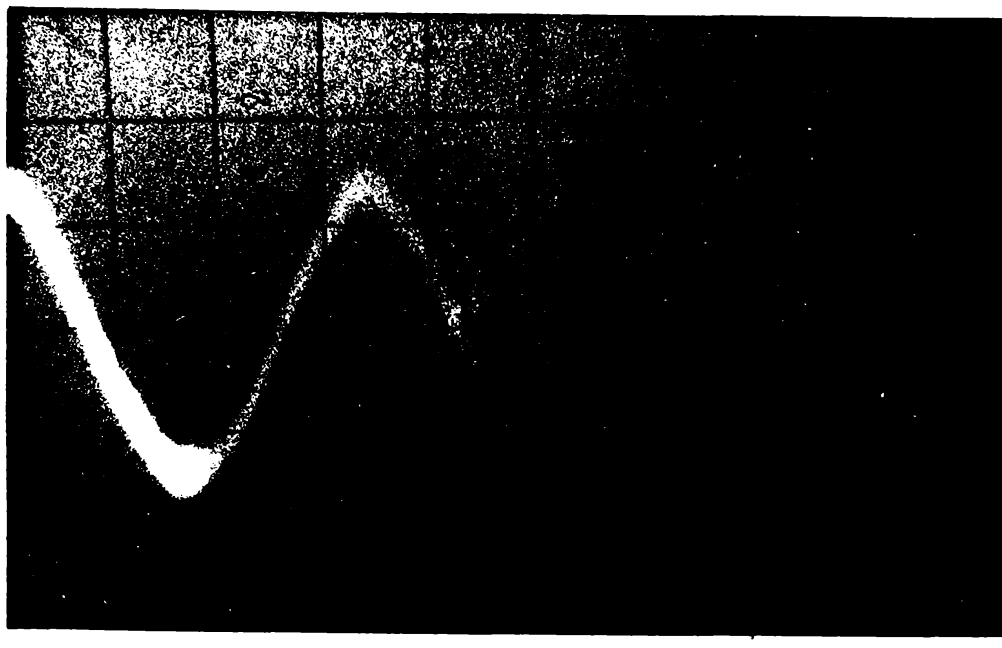


Figura 44. I_p la $n = 3052$ rot/ min.

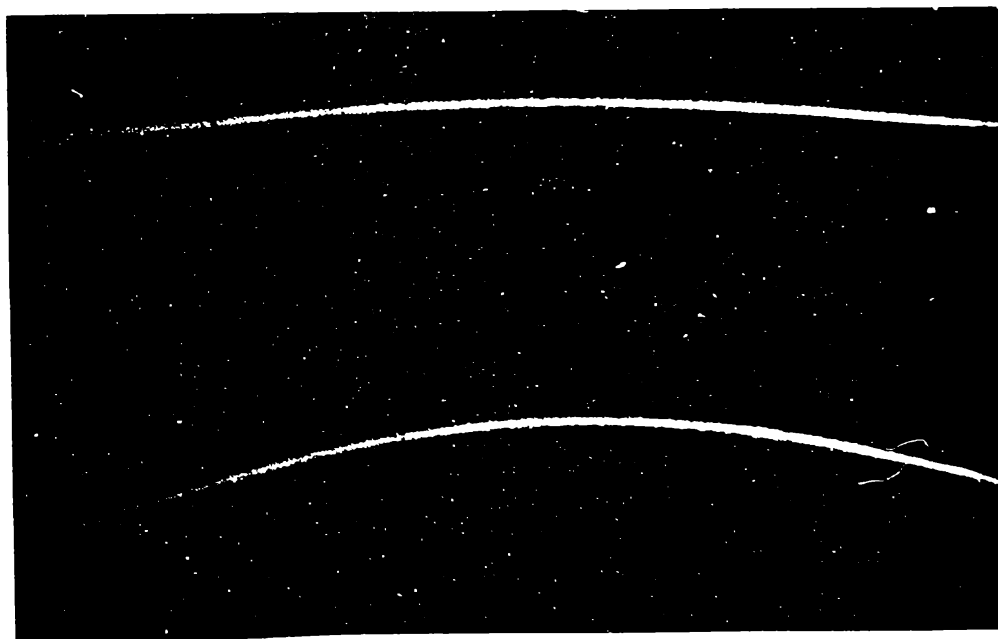


Figura 45. Tensiunea si curentul dupa invertor la frecventa de comanda $f = 10$ Hz

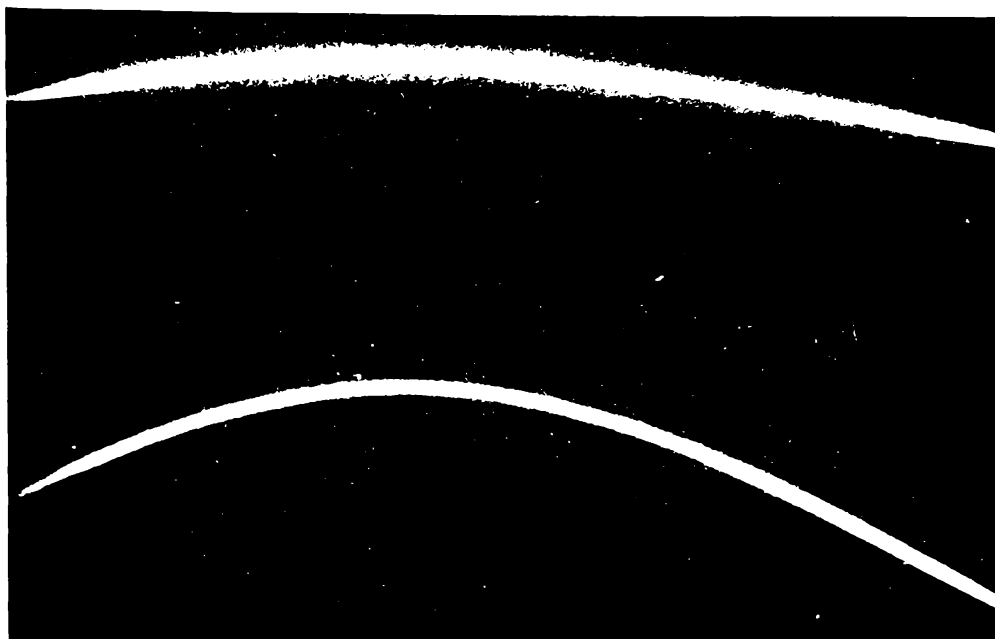


Figura 46. Tensiunea si curentul dupa invertor la frecventa de comanda $f = 15$ Hz

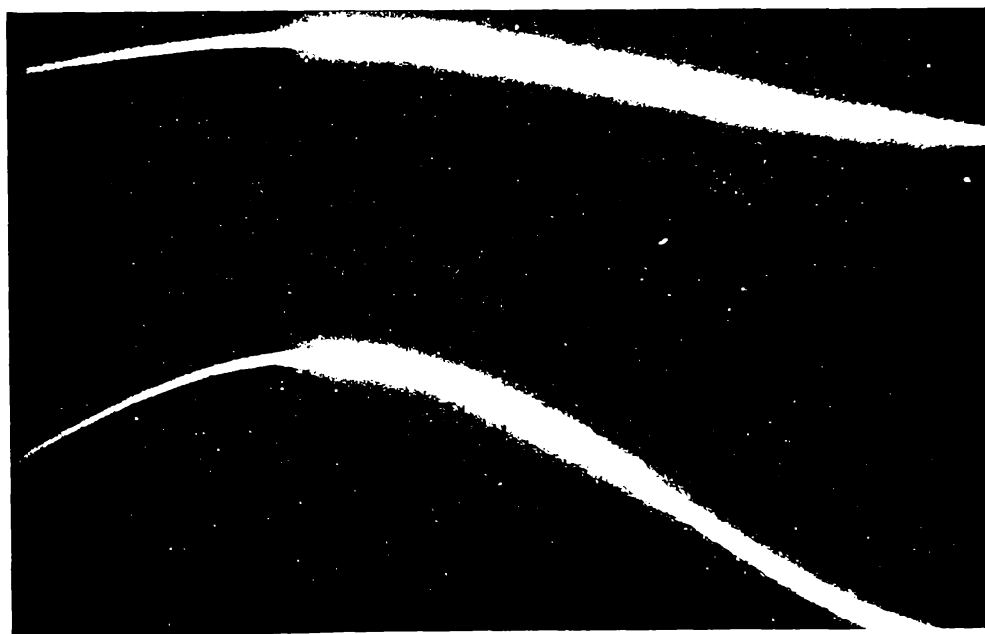


Figura 47. Tensiunea si curentul dupa invertor la frecventa de comanda $f = 20$ Hz

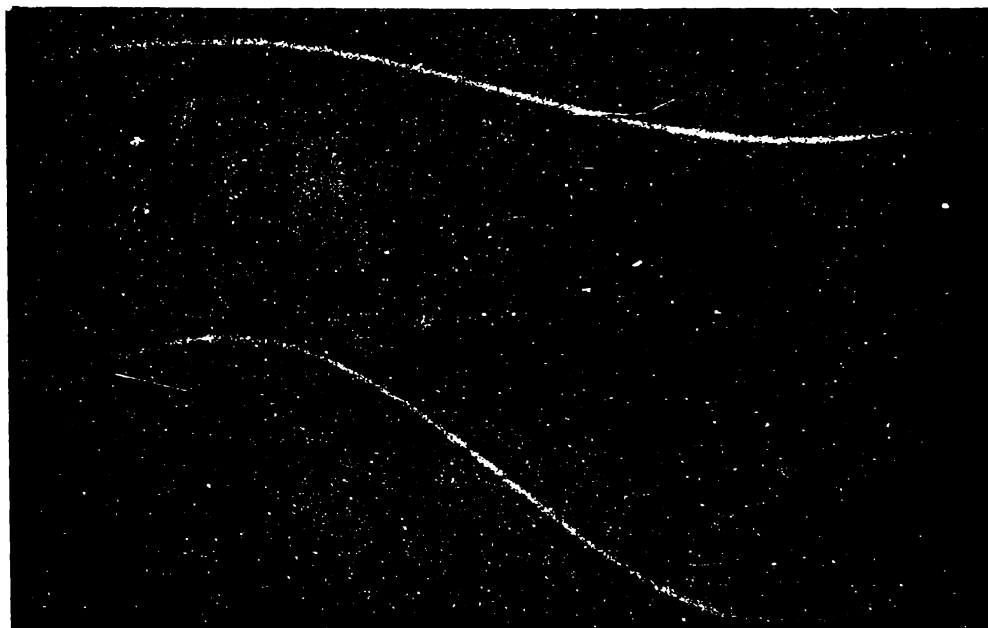


Figura 48. Tensiunea si curentul dupa invertor la frecventa de comanda $f = 35$ Hz

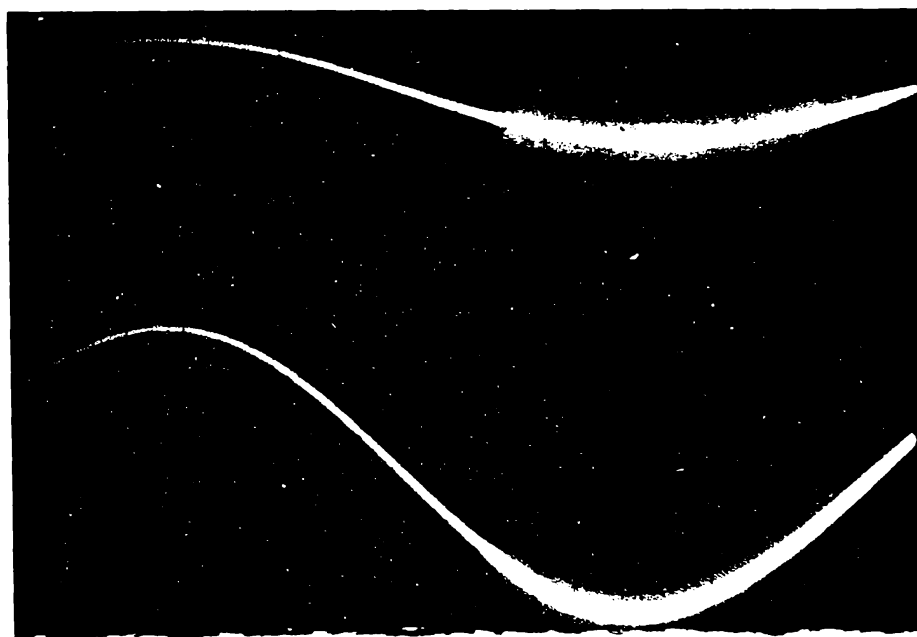


Figura 49. Tensiunea si curentul dupa invertor la frecventa de comanda $f = 40$ Hz



Figura 50. Tensiunea si curentul dupa invertor la frecventa de comanda $f = 45$ Hz

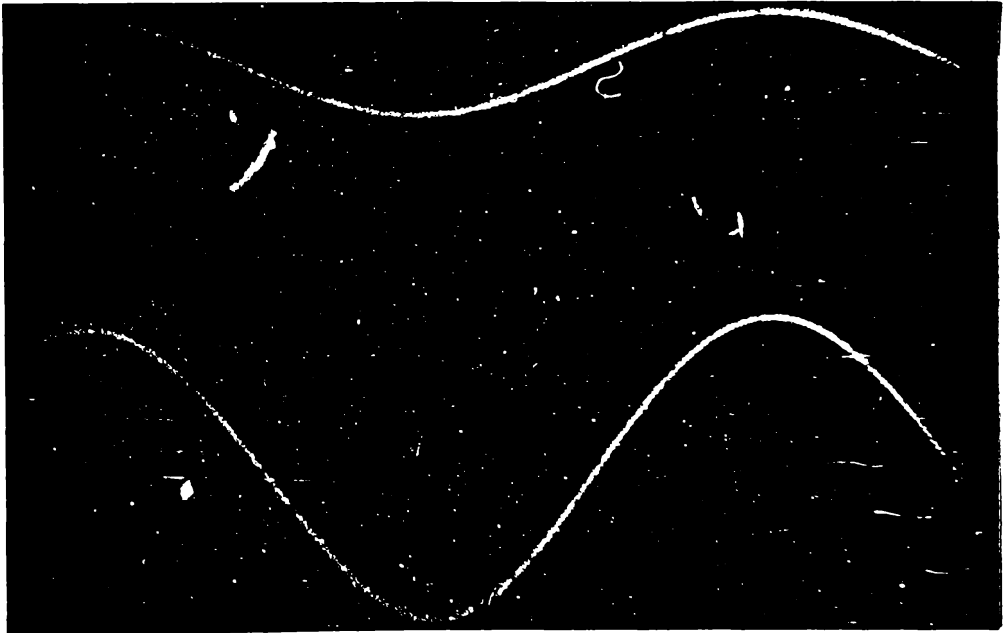


Figura 51. Tensiunea si curentul dupa invertor la frecventa de comanda $f = 50$ Hz

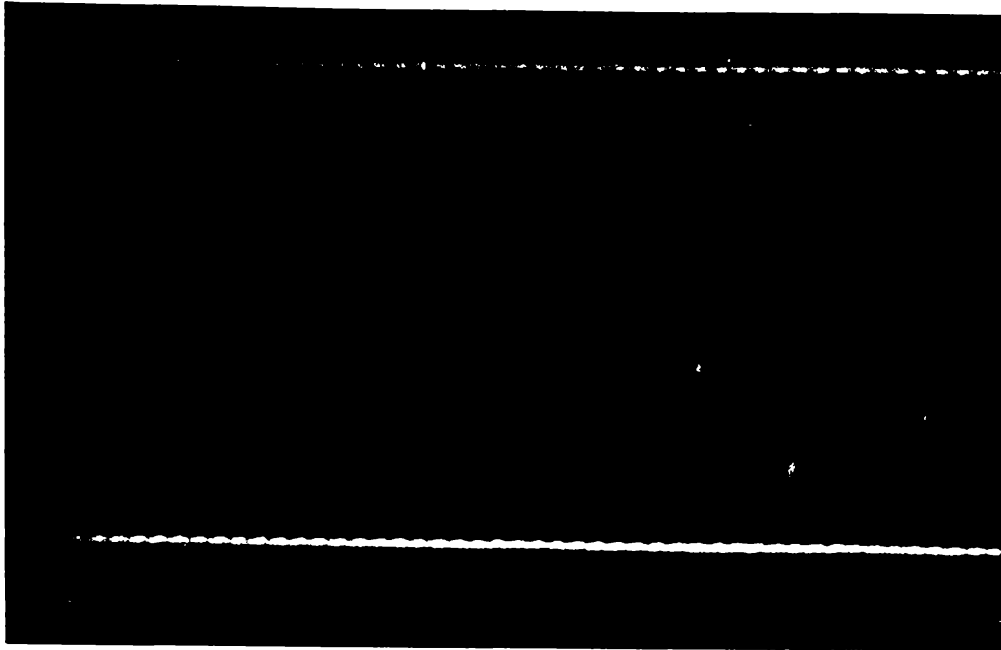


Figura 52. Tensiunea si curentul in circuitul intermediar.

4.2. Măsurători în exploatare a ramei de metrou nr. 023 în regim de frânare recuperativă.

4.2.1. Condiții de experimentare.

Rama de metoda cu motorul de tractiune asincrone, nr. 023 este formata din doua vagoane motoare, din productia prototip.

Pe rama s-au montat aparare de captare a semnelor pe partea primara , de curent continuu si pe partea secundara de alimentare a motoarelor de tractiune asincrone in curent alternativ - trifazat.

Rama de metrou a fost supusa la incercari la urmatoarele regimuri: regim lansat; regim de frinare electrica recuperativa de la viteza maxima la viteze reduse 10 - 15 Km/h si respectiv curenti de frinare maxim permis la deceleratia maxima $1,2 \text{ m/s}_2$, suprasarcini la motoarele de tractiune, intreruperi de tensiune de alimentare, intrarea in actiune a protectiilor.

4.2.2. Vehicule de tracțiune supuse experimentării.

Experiențele s-au efectuat pe vagoane duble, respectiv rama de metrou nr. 023 (figura 53).

Fiecare vagon, este vagon motor. Fiecare boghiu are cite doua captatoare de curent, cite unul pe fiecare parte pentru alimentarea de la sina a treia.

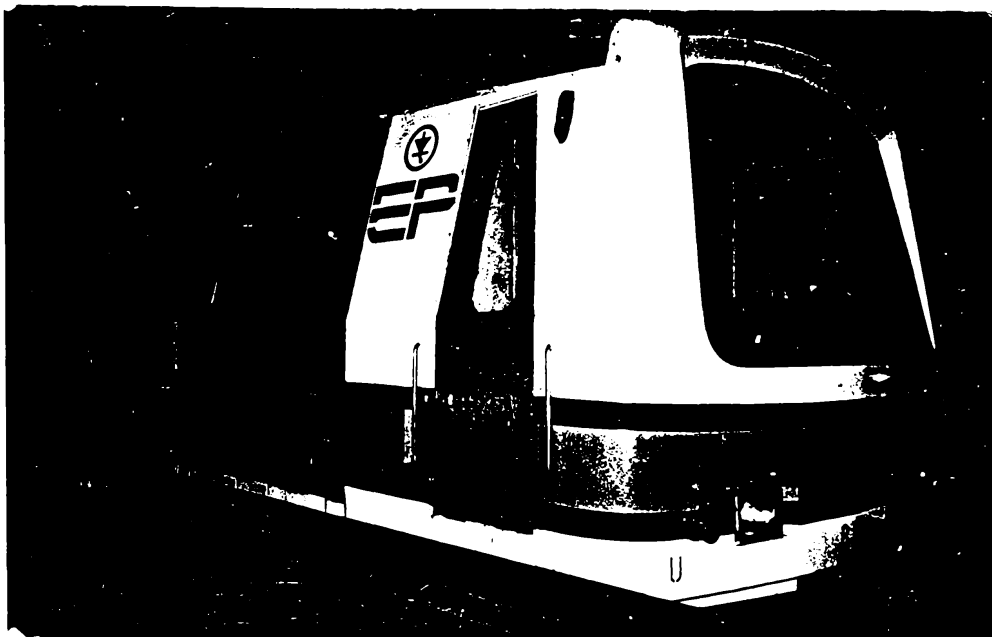


Figura 53. Rama de metrou nr.023.

Captatoarele au fost legate electric intre ele si reglata forta de apasare, astfel incit sa se mentina conditiile optime de captaj a curentului.

Vagoanele motoare de metrou au fost alimentate din doua surse, una de inalta tensiune externa, la 750 V si una interna, la 24 V.

Dupa cum s-a mentionat, tensiunea externa de 750 V se culege de la sina a treia, prin captatori.

Tensiunea retelei de alimentare a circuitelor de forta se caracterizeaza prin:

- tensiunea nominala $U_n = 750 \text{ V}$;

- tensiunea maxima $U_{max} = 900 \text{ V}$;
- tensiunea minima $U_{min} = 525 \text{ V}$.

Tensiunea joasa interna, 24 V, care provine de la bateriile de acumulare are valorile:

- maxime: $U_n + 10 \% U_n$;
- minime: $U_n - 10 \% U_n$.

De la aceasta tensiune sunt alimentate aparatele si instalatiile auxiliare de comanda, de protectie, de semnalizare.

Tensiunea utilizata variaza in limitele $(25 - 30) \% U_n$.

Echipamentul din schema electrica in regim de frinare recuperativa este urmatorul:

- aparatura de intrerupere automata la suprasarcina in circuitul primar;
- aparatajul de deconectare in circuitul de inalta tensiune;
- aparatajul de protectie la supratensiune;
- aparatajul de filtrare pe partea de inalta tensiune;
- invertorul curent continuu - curent alternativ trifazat la tensiuni si frecvente diferite;
- motoare de tractiune asincrone cu rotorul in scurtcircuit.

Frinarea electrica s-a facut de la viteza de 80 km/h pina la viteza de 10-15 km/h. Fiecare invertor este inzestrat si cu o rezistenta de frinare. Invertoarele sunt reversibile.

Invertoarele sunt trifazate de tensiune cu circuit de stingere individual si tiristoare auxiliare cu comanda prin modularea in durata a tensiunii.

La experiente s-a luat in considerare particularitatile noi la scheme de forta si comanda si s-au comandat in exploatare la masuratori regimuri care sa acopere regimuri intilnite in exploatare.

Aceasta a permis ca pe memoriile magnetice sa se prinda cele mai semnificative semnale ca valoare si ca forma.

4.2.3. Metoda de captare și înmagazinare a semnalelor pe vehicul.

Luind in considerare timpul de schimbare a regimurilor de functionare a agregatelor vehiculului, timpul de actionare al

protectiilor, timpul de comanda a instalatiilor de automatizare de pe rama de metrou, s-a trecut la stabilirea metodei de captare a semnalelor si de inmagazinare a acestora.

Pentru fidelitatea captarii semnalelor s-a folosit pentru rama de metrou metoda inregistrarii continue, fara inertie.

Metoda a putut fi materializata prin folosirea traductoarelor de tensiune si de curent a firmei LEM - Elvetia.

Traductoarele de tensiune au fost de tip LV-100 si traductoarele de curent au fost de tip LV-4000 S.

Acestea au fost de partea primara, de inalta tensiune, in curent continuu. Pentru partea secundara, pe partea de curent alternativ trifazat s-a folosit un traductor de curent tip TORR-500/5 si un traductor de tensiune tip TU-1000/220. Toate traductoarele folosite au fost cu izolatie galvanica si cu protectii la perturbatii.

Adaptorii din treapta a doua de adaptare au fost rezistivi pentru inlaturarea inertiei si mentinerea raspunsului la variatii tranzitorii a semnalului.

Metoda de captare a semnalelor si inmagazinarea acestora pe memorii magnetice a fost metoda de captare directa si continua pentru frecvente medii si inalte.

Aparatura de inmagazinare a semnalelor pe memorii magnetice a fost inregistratorul magnetic tip Bruel-Kjaer cu patru canale de inregistrare pe FM si MA si un canal de comentarii. De asemenea semnalele au fost inregistrate pe oscilografii cu 14 canale tip H071.4 si inregistratorul cu hirtie cu 6 canale tip H327.

In figura 54, este prezentata schema de inmagazinare pe memorii magnetice a semnalelor de pe rama de metrou cu motoare de tractiune asincrone.

In figura 55, este prezentata schema de inregistrare si urmarire a semnalelor in circuitele de cale si de statie.

In figura 56, este prezentata schema de indicare si inregistrare pentru circuitul de semnalizare de linie.

In figura 57, este prezentata fotograma de amplasament al traductoarelor de curent si de tensiune in circuitul primar de inalta tensiune a ramei de metrou cu motoare de tractiune

asincrone.

In figura 58, este prezentata fotograma de amplasament al traductoarelor de curent si de tensiune in circuitul secundar al transmisiei electrice in curent alternativ cu motoare de tractiune asincrone.

In figura 59, este prezentata fotograma captarii semnalelor pentru circuitele de semnalizare din sala de relee din statia metrou Industriilor.

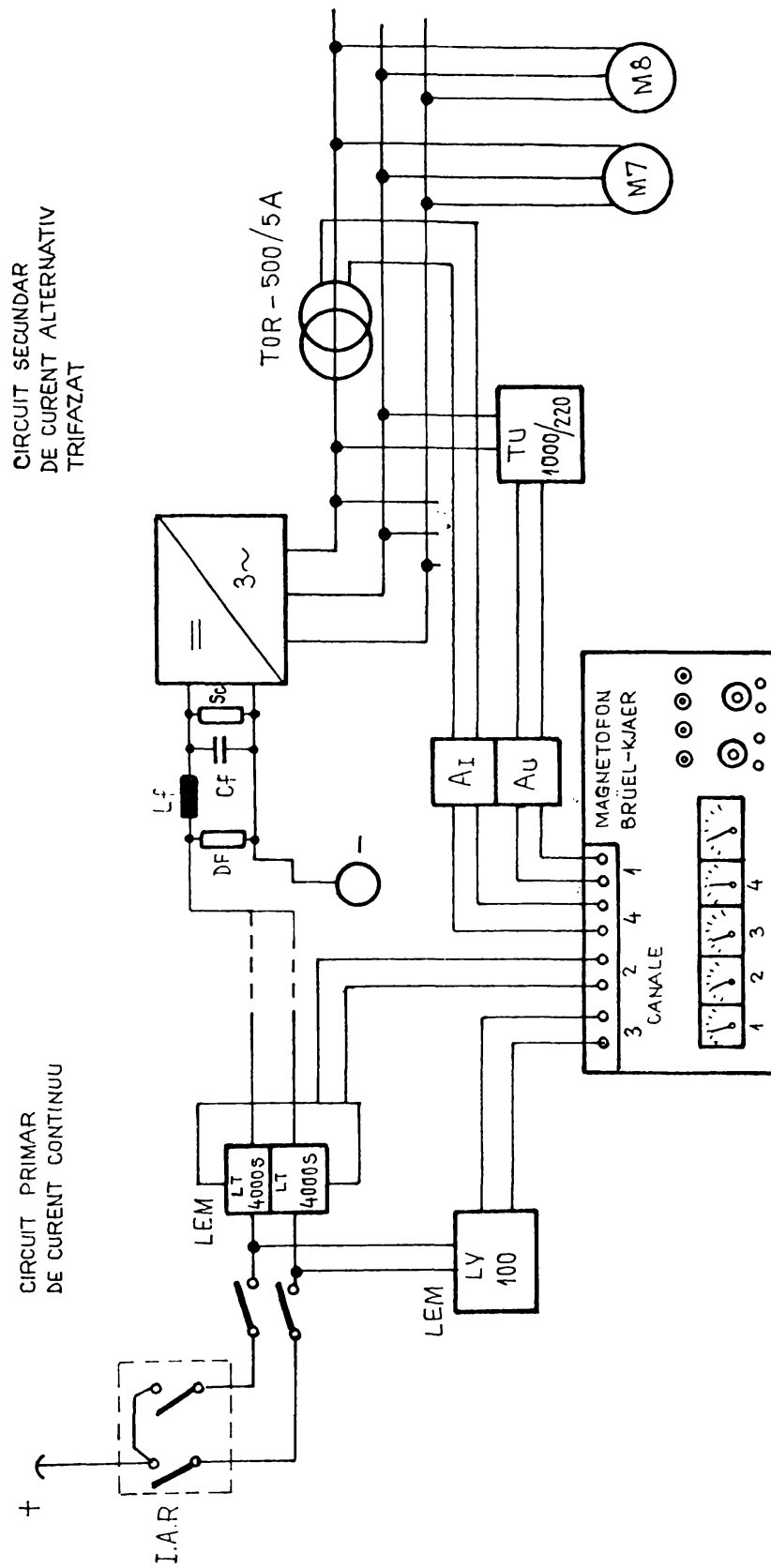


Figura 54. Schema de inmagazinare pe memorii magnetice a semnalelor de pe rama de metrou cu motoare asincrone trifazate.

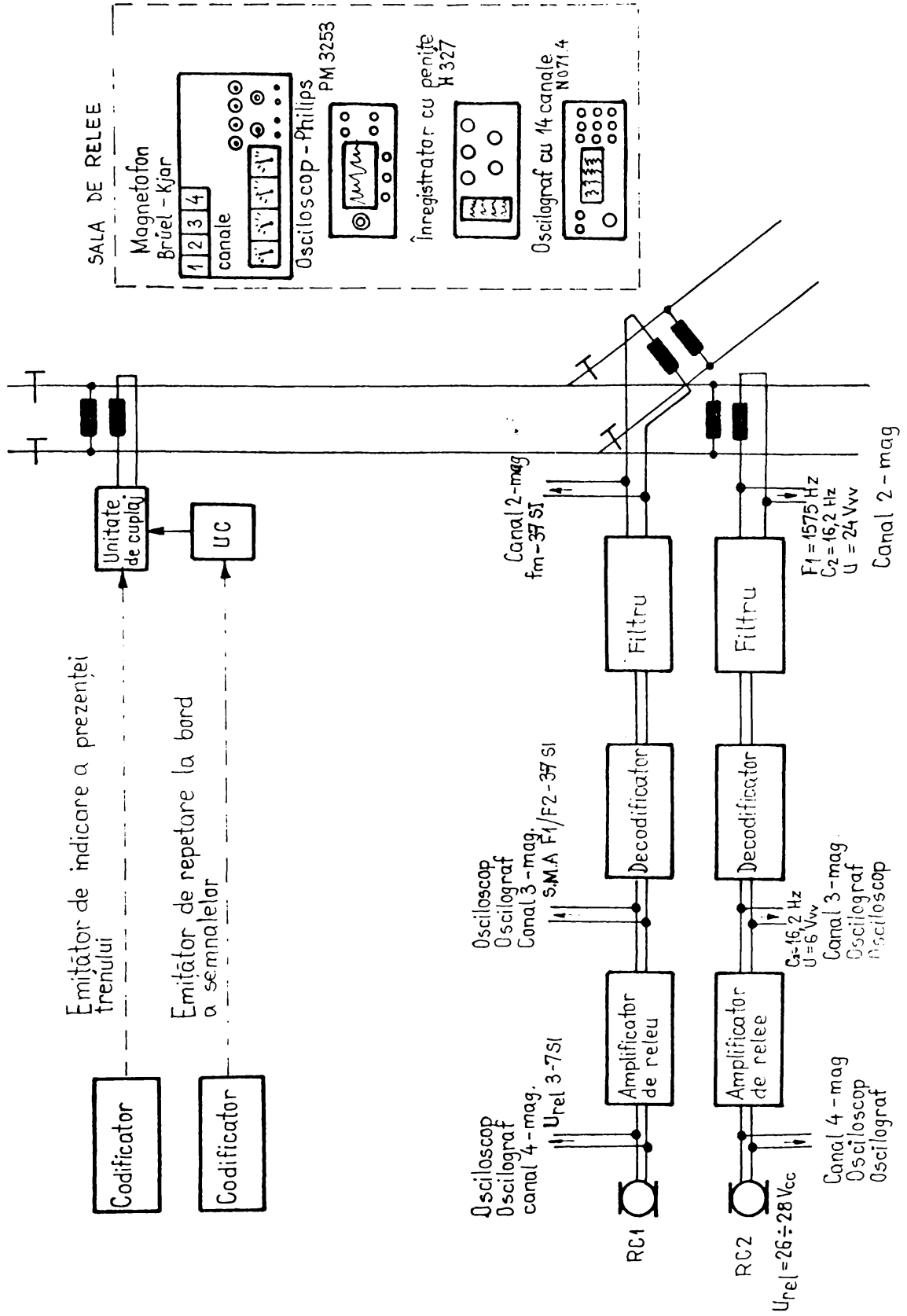


Figura 55. Schema de inregistrare si urmarire a semnalelor in circuitele de cale si de statie.

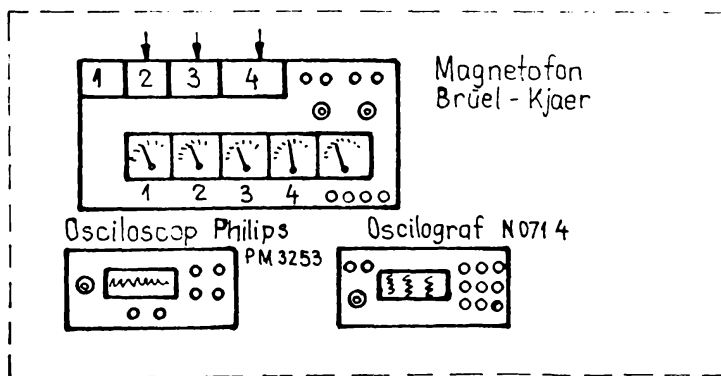
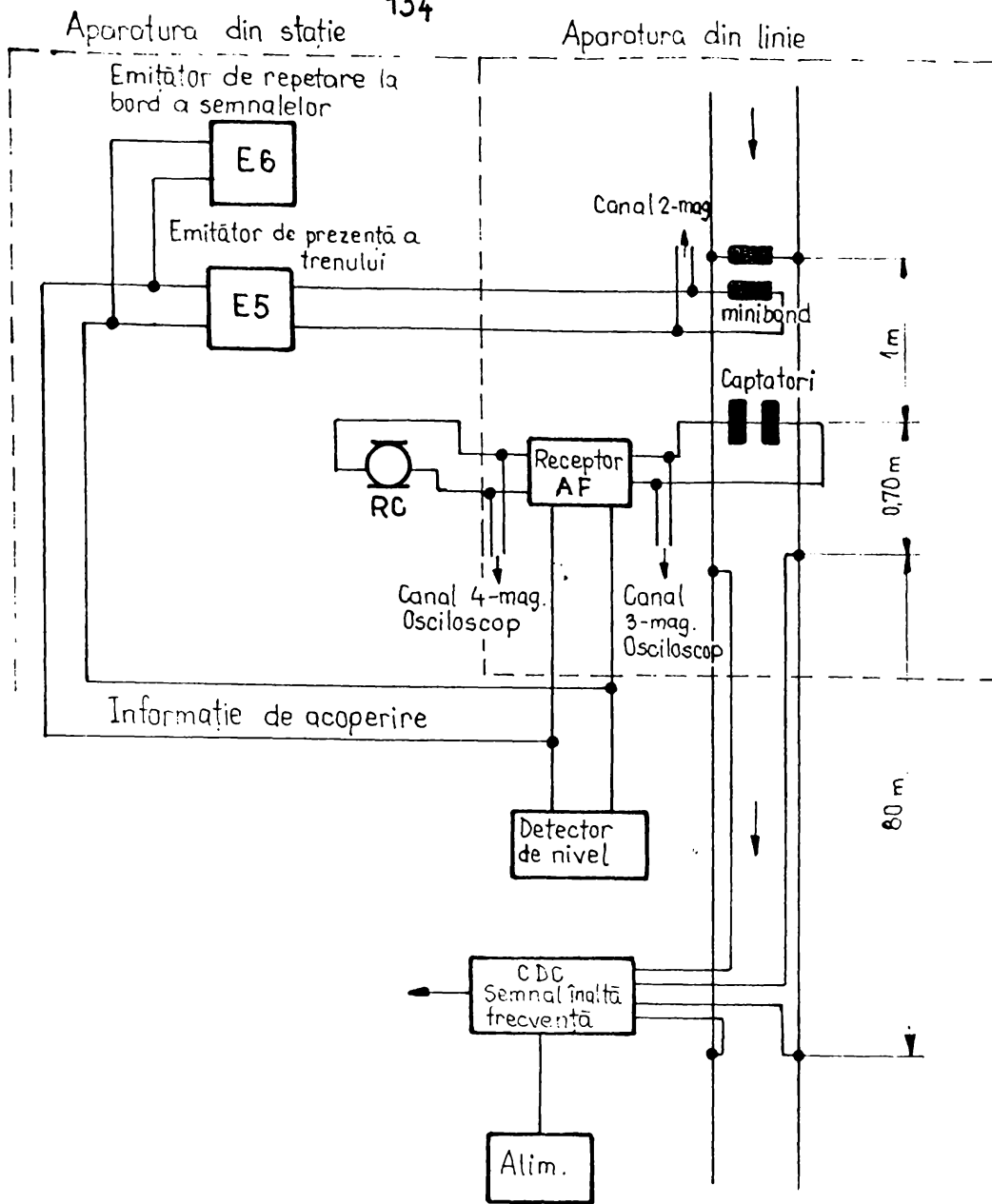


Figura 56. Schema de indicare și înregistrare pentru circuitul de semnalizare de linie.

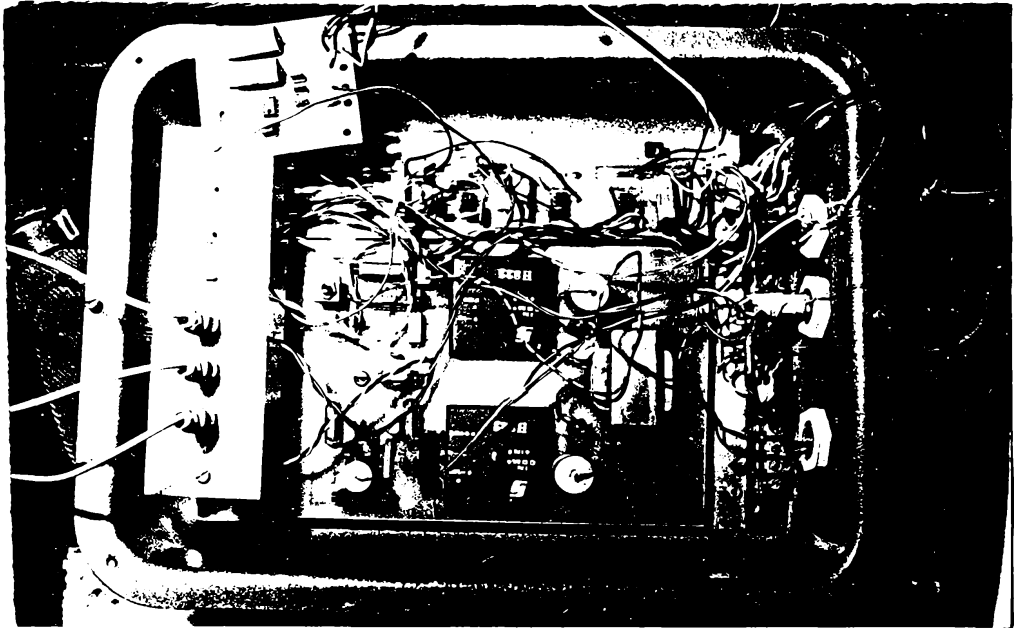


Figura 57. Fotograma de amplasament al traductoarelor de curent si de tensiune in circuitul primar de inalta tensiune a rezei de metrou cu motoare de tractiune asincrone.



Figura 58. Fotograma de amplasament al traductoarelor de curent si de tensiune in circuitul secundar al transmisiei electrice in curent alternativ cu motoare asincrone.

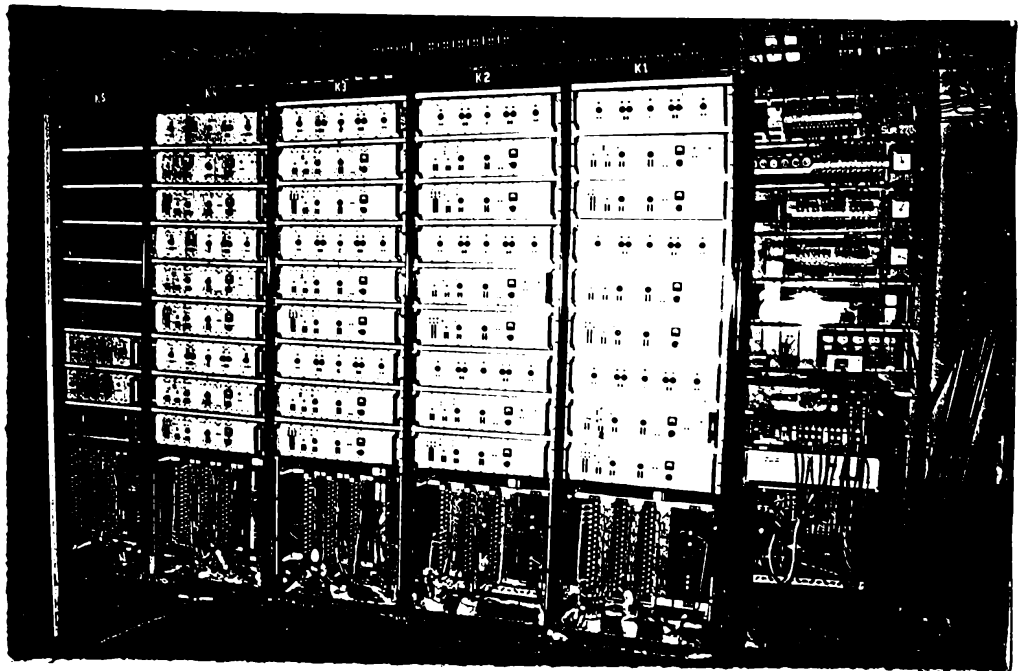


Figura 59. Fotograma captarii semnalelor pentru circuitele de semnalizare din sala de relee din statia de metrou Industriilor.

4.2.4. Metoda de analiză a semnalelor inregistrate

4.2.4.1. Transpunerea și vizualizarea semnalelor.

Pentru transpunerea semnalelor de pe aparatura de inmagazinare cu memorii magnetice s-a folosit metoda de analiza directa. Aceasta metoda, consta in transpunerea concomitenta a semnalelor pe osciloscopia si pe aparate indicatoare a valorii semnalelor.

In figura 60, este prezentata fotograma de amplasament in schema de analiza directa pentru transpunere si vizualizarea semnalelor.

4.2.4.2. Selectarea semnalelor pe domenii de valori.

Pentru selectarea semnalelor pe domenii de valori se foloseste schema de montaj cu aparatura din figura 61. De pe aparatura unde s-au inregistrat semnalele se transpun pe osciloscopia cu memorii si pe oscilograf. Apoi se fixeaza regimul si se citesc valorile. Daca aceste valori intereseaza ele sunt

fixate pe hirtie fotosensibila si totodata pozitia de pe memoria magnetica.

4.2.4.3. Selectarea semnalelor pe domenii de deformatii si perturbatii.

In fotograma din figura 62, este prezentata aparatura specializata Bruel-Kjaer pentru selectarea semnalelor pe domenii de frecvente si perturbatii. Semnalele sunt transpuse direct de pe memorii magnetice pe osciloscoape si pe analizoare de frecventa, astfel ca semnalele sa poata fi analizate din punct de vedere al perturbatiilor pe domenii de frecventa.

4.2.4.4. Transpunerea semnalelor de pe memorii magnetice pe aparate inregistratoare.

Semnalele inregistrate atat pe rama de metrou in circuitul primar - doua semnale si in circuitul secundar doua semnale, au fost introduse in memorii magnetice a inregistratorului Bruel-Kjaer tip 7003. In laborator, cu montajul din fotograma 63, s-au transmis semnale pe osciloscoape si pe oscilograf. Pentru semnalele inregistrate pe rama de metrou s-a folosit osciloscopul multimeter tip RK-7401 cu doua spoturi si cu memorie.

Semnalele memorate si expuse pe ecranul osciloscopelor au fost fotografiate, urmind ca apoi sa fie analizate.

4.2.4.5. Analiza regimurilor si a semnalelor inregistrate la rama de metrou cu motoare de tractiune asincrone.

Pe baza semnalelor inregistrate s-a trecut la analiza regimurilor de functionare a ramei de metrou cu motoare asincrone nr.023. In fotogramele din figura 64, 65 sunt prezentate regimuri de frinare recuperative de la viteza maxima 80 km/h pina aproape de 10 km/h.

In imaginile din figurile 66, 67 sunt prezentate tensiunea si curentul in circuitul primar si curentul in circuitul secundar, dupa invertor pe doua motoare de tractiune si de alimentare a motoarelor asincrone de tractiune.

In oscilogramele din figura 64-67, sunt prezentate semnale fotografiate dupa ecranul osciloscopului cu doua spoturi si

memorie, pentru doua semnale inmagazinate. Scarile osciloscopului au fost stabilite in functie de semnale si anume:

- pentru curentul alternativ: 2 V/div; 2 ms/div;
- pentru tensiune continua: 0,2 V/div; 2 ms/div;
- pentru curentul continuu: 20 mV/div; 2 ms/div.

In figurile 68, 69, sunt prezentate semnalele circuitelor de cale sectiune neocupata si sectiune ocupata.

4.2.5. Considerații asupra rezultatelor măsurătorilor

Pe baza masuratorilor in exploatare cu cele doua vagoane de metrou nr. 023, inzestrate cu motoare de tractiune asincrone cu rotorul in scurtcircuit s-a reusit functionarea in regim de frinare recuperativa de la $V_{max.} = 80 \text{ Km/h}$ pina la $V = 10-12 \text{ Km/h}$

Regimul de frina cu recuperare produce unele semnale perturbatoare dar nu influenteaza negativ semnalizarea circuitelor de cale.

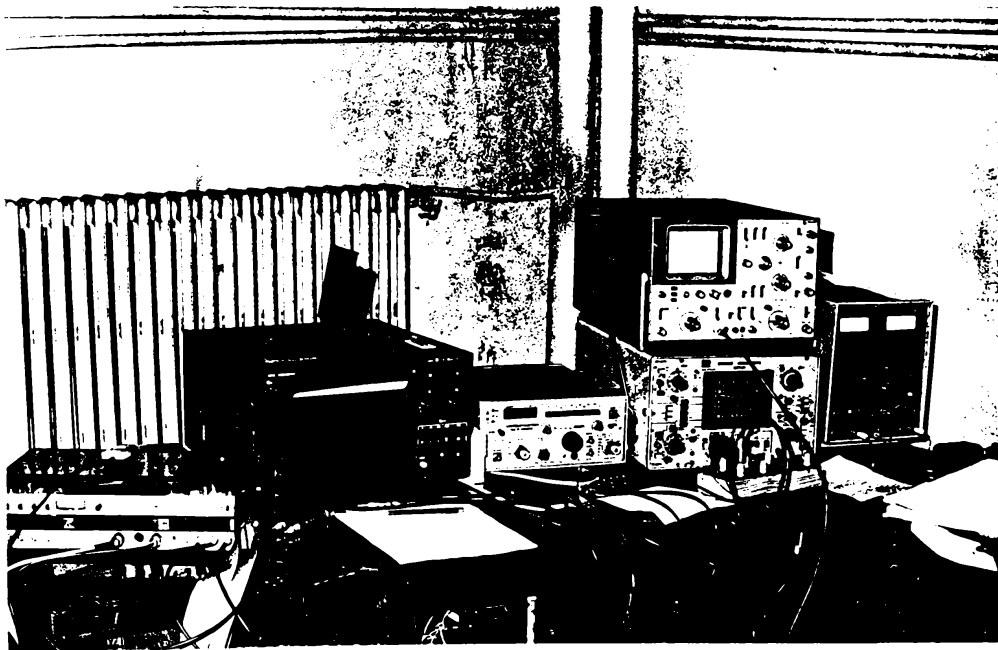


Figura 60. Fotograma de amplasament in schema de analiza directa pentru transpunere si vizualizarea semnalelor.

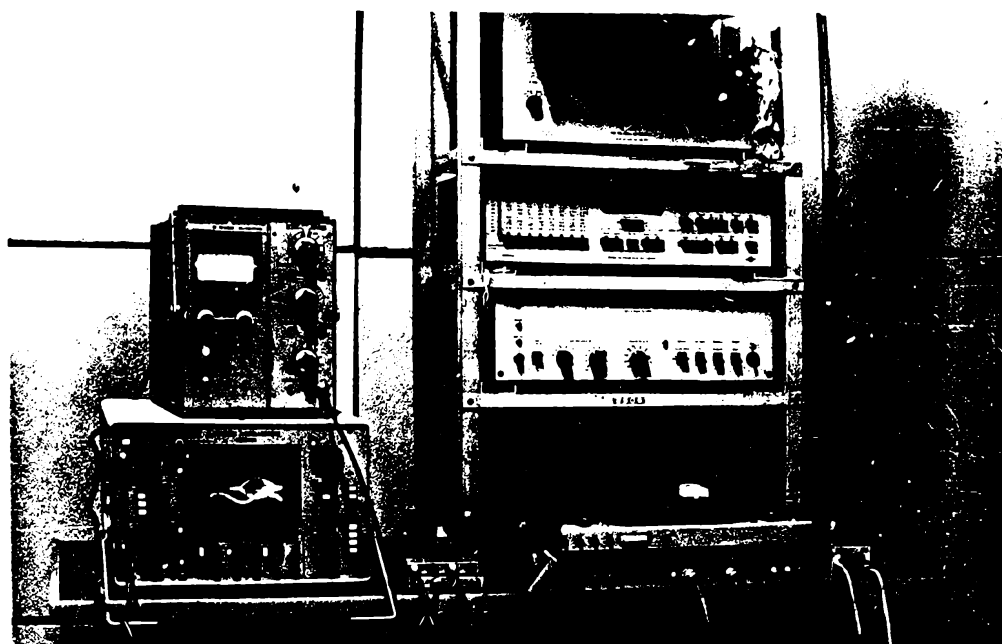


Figura 61. Schema de montaj cu aparatura pentru selectarea semnalelor pe domenii de valori.

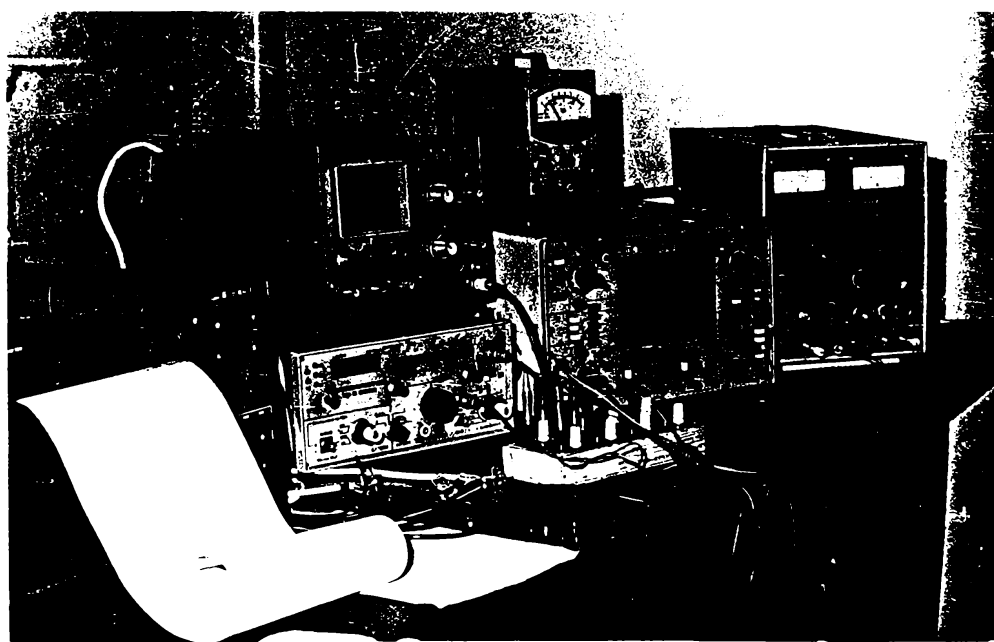


Figura 62. Aparatura specializata Brüel - Kjaer pentru selectarea semnalelor pe domenii de frecventa și perturbatii.

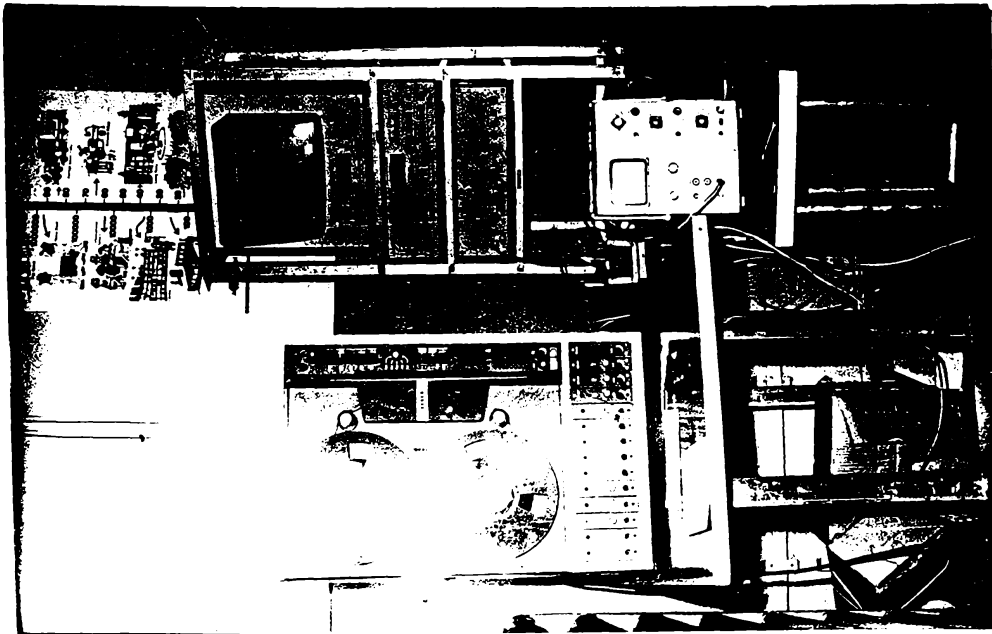


Figura 63. Transmitera semnalelor pe osciloscopie.

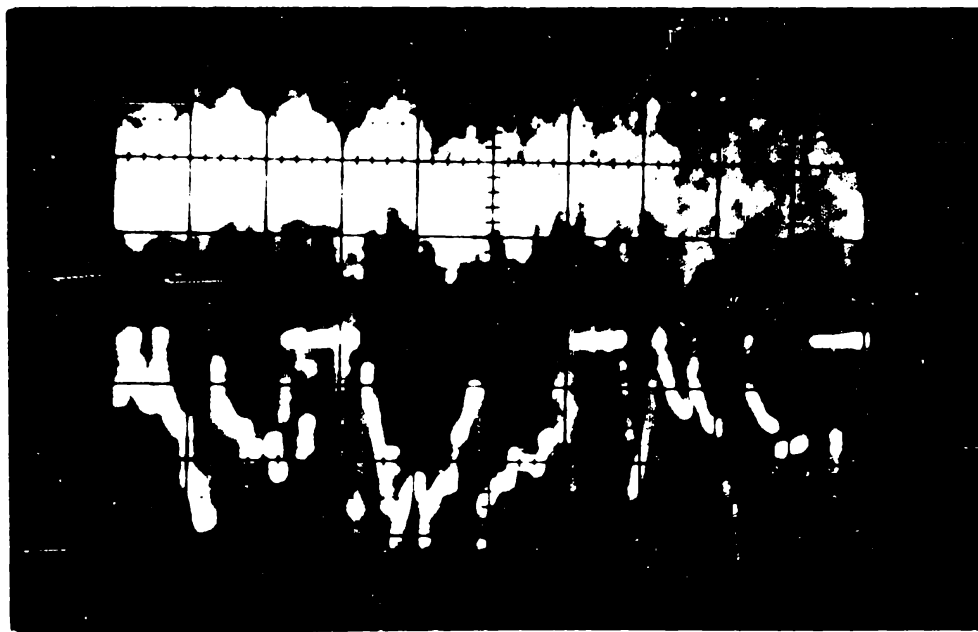


Figura 64. Fotograma curentului alternativ pe motoare de tractiune in regim de frinare recuperativa si a curentului primar al ramei de metrou.

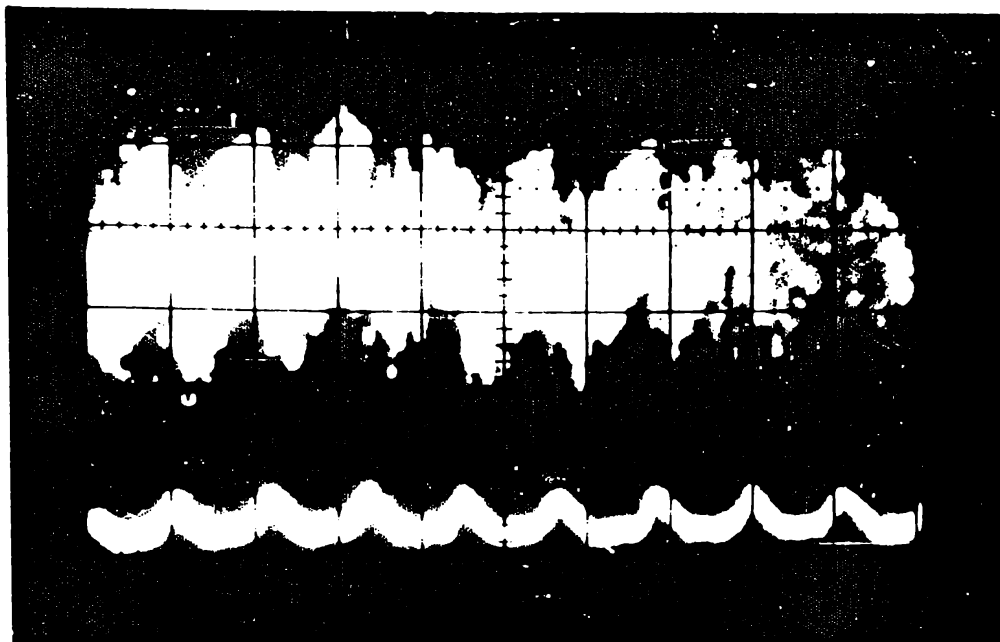


Figura 65. Fotografia curentului alternativ și a curenților
 continue în circuitul primar al transformatorului în
 regim de frinare recuperativă.

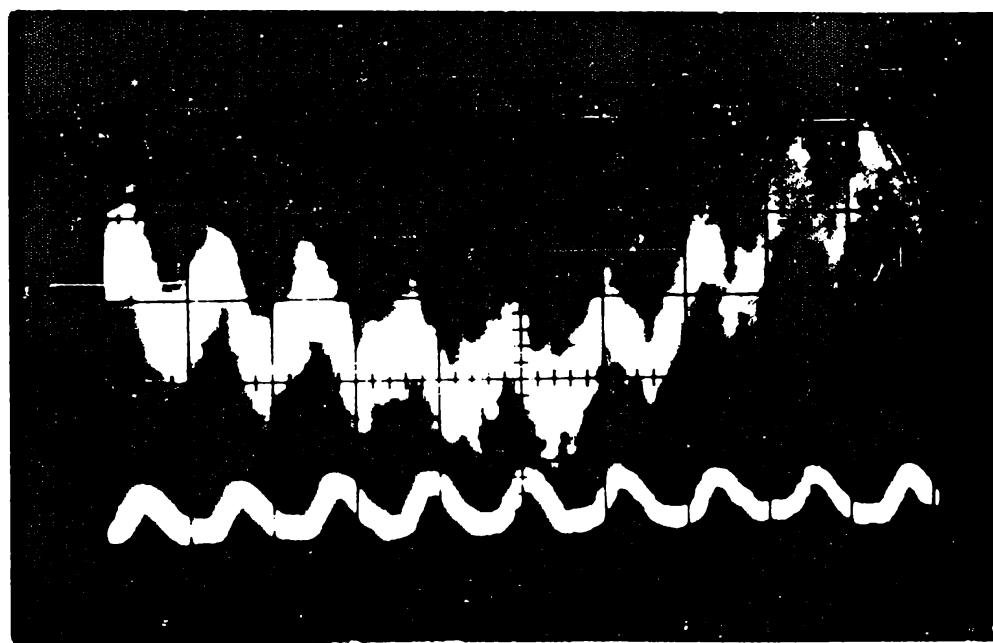


Figura 66. Fotografia curentului alternativ pe
 reacțiune asincronă și a curenților
 continue în circuitul primar al transformatorului în
 reacțiune.

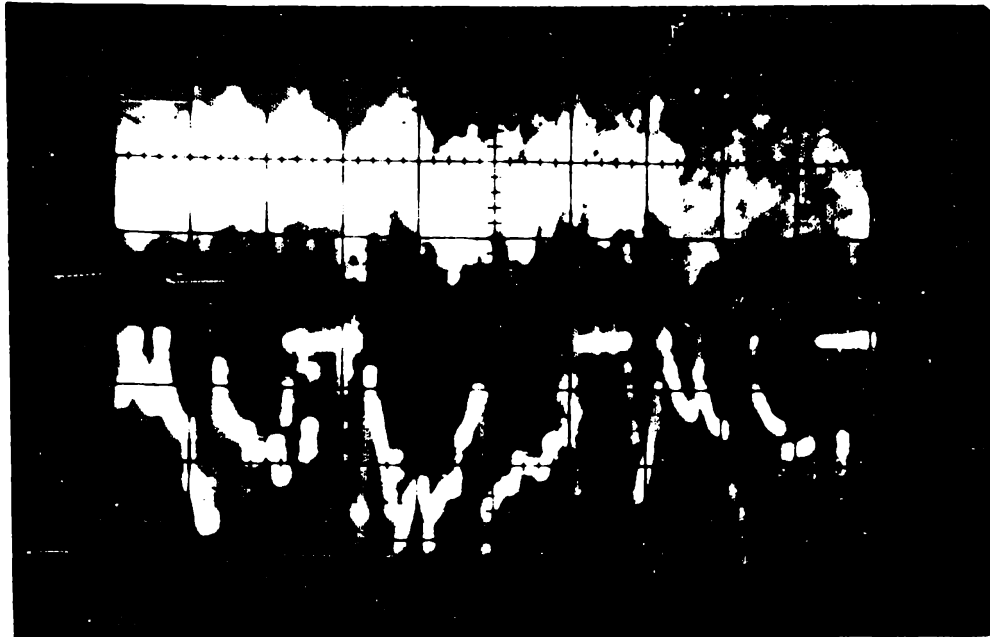


Figura 67. Programă de simulare a unui sistem de control în timp discret, cu o funcție de transfer de tip $\frac{1}{s^2}$ și o funcție de intrare de tip $\sin(\omega t)$.

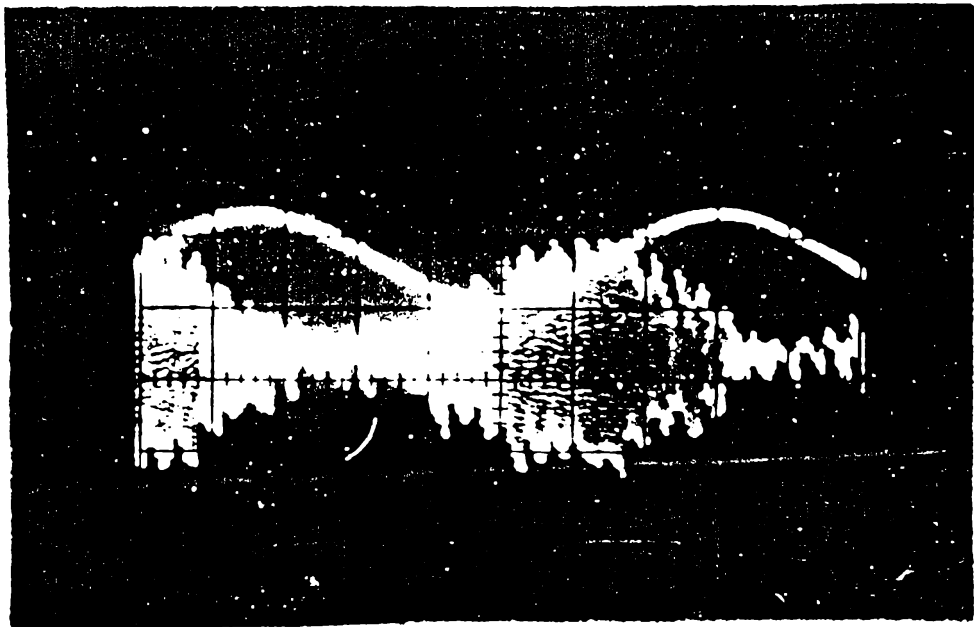


Figura 68. Programă de simulare a unui sistem de control în timp discret, cu o funcție de transfer de tip $\frac{1}{s^2}$ și o funcție de intrare de tip $\sin(\omega t)$, înainte și după aplicarea unei funcții de filtrare.

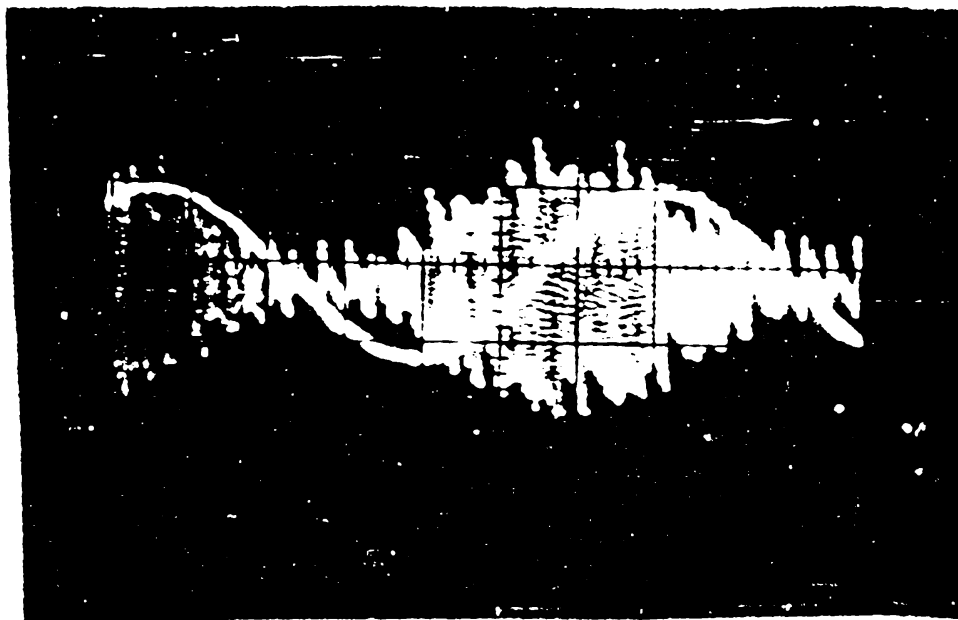


Figura 69. Semnalele circuitelor de cale perturbate de regimul de frinare recuperativ.

CAPITOLUL 5. EFICIENȚA ECONOMICĂ A FRÂNEI DE REȚEA

Pe lângă avantajele legate de Siguranța Circulației prin existența pe locomotive a două sisteme de frânare independente (electric și pneumatic), frâna de rețea realizează economii prin reducerea cheltuielilor materiale și prin recuperarea de energie electrică.

În [5], [27], [49] cheltuielile materiale legate de întreținerea aceleași tip de ramă electrică dar cu frână de rețea au fost.

	- Reducere -
- cheltuieli cu bandaje	68 %
- cheltuieli cu saboți	71 %
- cheltuieli cu rest partea de rulare	47 %
- cheltuieli curățenie	19 %
- cheltuieli echipament pneumatic	56 %
- cheltuieli materiale auxiliare	17 %

În medie se poate estima a reducere aproximativă cu 46 % a cheltuielilor legate de partea de rulare și aparataj auxiliar. Din totalul cheltuielilor materiale la noua frână de rețea, procentul mediu de reducere este de aproximativ 7 %.

În ceea ce privește energia economisită la exploatarea cu motoare asincrone față de motoarele de curent continuu reducerea este de 25 %.

Un calcul dovedește că economia se ridică la 110 MWh pe ramă de metrou (Metrorex) într-un an, ceea ce înseamnă că, în primii cinci ani de exploatare, 30 rame modernizate vor economisi 6600 MWh.

Tensiunea redată liniei de contact U_t se determină din relațiile (70) și (75), respectiv:

$$U_t = K_m^* \eta_c \sqrt{\frac{sf_1^3}{k_m} \left(\frac{G_t}{\xi} \frac{dv}{dt} + R_t \right)} \quad (109)$$

Pentru o secție de remorcare, energia totală recuperată este suma energiilor parțiale recuperate din mers și oprire. Pentru

fiecare porțiune se ține cont de viteza normală din livret, tonajul trenului și declivitatea secției.

Se poate concluziona că economiile totale aduse de frâna de rețea la această oră sunt de peste 17 % din totalul cheltuielilor din sistemul clasic.

Pentru exemplificare este redat mai jos algoritmul, programul și rezultatele frânai de rețea la trenurile cu tracțiune electrică pe secția Dej-Cluj Napoca.

În program se ține cont:

- spațiu de frânare: max.1200 m, min.500 m;
- nu există restricții, limitări de viteză pe secție;
- frânarea se efectuează de la $V_{max} = V_{max}$ a liniei la $V=0$ în dreptul stației;
- se efectuează o singură frânare de menținere a vitezei între stații pe un spațiu total de 1200 m;
- datele tehnice și de comandă s-au luat în ipoteza locomotivei S252;
- tonajele sunt cele din livretul de mers nr.4 al Regionalei SNCFR Cluj.

Program de calcul în Turbo Pascal pentru determinarea energiei recuperate în rețea pe secția Dej-Cluj Napoca.

```
uses crt,printer;
var km1,eta1,s,f1,Rt,Gt,xi,km,dvdt,Ur:real;
begin
clrscr;
km1:=8;
eta1:=0.91;
s:=-0.1;
f1:=0.6;
Rt:=57*1000;
Gt:=510*1000;
xi:=0.8;
dvdt:=-10;
km:=0.00014;
```

Tabelul nr.4

Nr. crt.	Tren	Tonaj [t]	Opriri	V1 [km/h]	Frânare ordinară	V2 [km/h]
1.	4301/2	500	14	90	14	85
2.	345/6	750	2	100	7	95
3.	4303/4	350	14	90	14	85
4.	4101/2	350	14	90	14	85
5.	429/30	350	1	90	7	85
6.	4111/10	450	6	90	12	85
7.	463/4	650	2	100	7	95
8.	4701/2	500	14	90	14	85
9.	341/2	600	2	100	7	95
10.	4305/6	350	14	90	14	85
11.	4103/2	350	14	90	14	85
12.	4097/4	650	14	90	14	85
13.	435/6	500	2	100	7	95
14.	655/6	750	2	100	7	85
15.	405/6	500	2	100	7	95
	MEDIE	510	117/8	94	149/10	88

{Calculul valorii tensiunii Ur}

Ur:= $k m l \cdot \eta t a l \cdot \sqrt{(s \cdot f_1 \cdot f_1 \cdot f_1) \cdot ((G t / x i) \cdot d v d t + R t) / k m}$;

{Afișarea pe ecran a valorii Ur}

writeln('');

writeln('');

writeln('');

writeln('');

```

writeln('          =====');
writeln('          :   Tensiunea recuperata Ur = ',Ur:5:2,' [V]
:');
writeln('          =====');
writeln('');
writeln('          Tinind cont ca pretul de cost al unui KW energie
electrica');
writeln('          de tractiune este de 73,10 lei, la cele 30 trenuri
/ 24 h');
writeln('          se obtine o economie lunara de 14.954.067 lei.');
```

{Afisarea la imprimanta a valorii Ur}

```

writeln(1st,'');
writeln(1st,'');
writeln(1st,'');
writeln(1st,'');
w r i t e l n ( 1 s t , '
=====');
writeln(1st,'          :   Tensiunea recuperata Ur = ',Ur:5:2,'
[V] :');
```

w r i t e l n (1 s t , '
=====');

```

writeln(1st,'');
writeln(1st,'          Tinind cont ca pretul de cost al unui KW
energie electrica');
writeln(1st,'          de tractiune este de 73,10 lei, la cele 30
trenuri / 24 h');
writeln(1st,'          se obtine o economie lunara de 14.954.067
lei.');
```

writeln(1st,' Calculul se poate extinde pe toate sectiile cu
tractiune electrica');

```

readln;
end.
```

```
=====
; Energia recuperata Wr = 28979723.17 [W] ;
=====
```

Tinind cont ca pretul de cost al unui KW energie electrica de tractiune este de 73,10 lei, la cele 30 trenuri / 24 h se obtine o economie lunara de 1.906.575.976 lei. Calculul se poate extinde pe toate sectiile cu tractiune electrica

CAPITOLUL VI. CONCLUZII

Rezultatul studiilor și încercărilor făcute de autor pe o perioadă îndelungată de timp în ceea ce privește frâna de rețea în curent alternativ se concretizează în contribuția pe care o aduce asupra clarificării unor aspecte privind calculul de funcționare și aplicare a acestora pe locomotive:

Dintre rezultatele cuprinse în această lucrare, amintesc:

a.) S-au stabilit parametrii de funcționare ai motorului asincron trifazat în regim de generator cu recuperarea energiei.

S-au determinat parametrii de control pentru alunecarea s (numărul de poli statorici, frecvența statorică, turația rotorică). În regim de generator alunecarea este negativă.

b.) S-au determinat parametrii de funcționare ai generatorului asincron în regim dinamic autoexcitat.

S-au determinat caracteristica $L_m = f(s)$. Caracteristica induc-tivității funcție de alunecare este obligatorie pentru definirea sistemelor de reglare și comandă ale vehicolului feroviar. Domeniul de frânare ar putea fi extins dacă R_{fe} ar avea valori diferite de la valoarea maximă spre situația cu rezistență deconectată.

c.) Se cunosc și alte regimuri de frânare ale motorului asincron trifazat. Pentru tracțiunea electrică feroviară, motorul asincron trifazat prezintă interes doar în două regimuri de frânare: frânarea cu recuperare la rularea suprasincronă și frânarea în regim dinamic cu R_f în circuit (frânarea reostatică).

Frânarea în regim dinamic se utilizează în cazul în care rețeaua nu primește sau când există alte vehicule în stare de pornire sau mers.

d.) S-a proiectat și realizat un program original SIV.02 în limbaj Turbo Pascal pentru determinarea parametrilor motorului asincron la rulare suprasincronă. Datele de intrare ale programului sunt cele pe care firmele producătoare de mașini electrice le dau (n , p_1 , U_1 , m_s , r_1 , r_2 , a , X_1 , X_2). Se determină f_1 , C_g , C_{m0} , I_1 , P , η , Q . Condiționând limite pentru alunecarea s programul simulează grafic variația cuplului generator funcție de viteza locomotivei. Programul este util în faza de proiectare și

concepere.

e.) S-a stabilit metoda analitică pentru determinarea forței de frânare a locomotivelor electrice cu motoare asincrone trifazate. Punând condiția reală din exploatare $F_f = \text{constant}$, s-a determinat ecuația (63) care stabilește funcțiile $f_1 * U_1$ necesare comenzii regulatorului automat de frânare. Parametrii de reglaj la înfășurarea statorică se dau după (63).

f.) S-a proiectat și realizat un program original SIV.03 în limbaj Turbo Pascal pentru determinarea influenței parametrilor de exploatare asupra forței de frânare F_f . S-a determinat $F_f = f(s)$ la $U_1 = \text{variabil}$; $F_f = f(f_1)$ la $U_1 = \text{variabil}$; $F_f = f(U_1)$ la $f_1 = \text{variabil}$.

Se constată că forțe de frânare mari se obțin la: frecvențe mici (sub 0,5 Hz), tensiuni de fază mari (peste 260 V), alunecări mici (sub -0,6).

Programul este util în faza de proiectare și concepere în vederea evaluării limitelor de reglaj (U_1 , f_1 , s) și limitarea acestora de condițiile dielectrice și protecție ale motoarelor de tracțiune.

g.) S-a stabilit metoda analitică pentru determinarea tensiunii recuperate la linia de contact. La baza determinărilor a stat ecuația de mișcare a trenului în regim de frânare. S-a stabilit tensiunea statorică redată convertorului de frecvență de către generatorul asincron (70) și tensiunea reală redată liniei de contact U_r (75). Pentru condițiile de exploatare relația (72) stabilește valoarea de comandă a frecvenței statorice f_1 . Cunoscând frecvența f_1 necesară din (63), se stabilesc funcțiile $f_1 * U_1$.

h.) S-a proiectat și realizat un program original SIV.04 în limbaj Turbo Pascal pentru determinarea tensiunii recuperate U_r la linia de contact funcție de condițiile de mers (tren, tonaj, viteză, opriri, rezistență de înaintare, limitări de viteză). Programul permite prin simulare grafică determinarea caracteristicilor $f_1 = f(s)$ la $dv/dt = \text{variabil}$, $U_r = f(f_1)$; $U_r = f(G)$; $U_r = f(R_T)$; $U_r = f(V)$.

Programul este util în faza de proiectare în vederea evaluării limitelor impuse de tensiunea liniei de contact asupra

parametrilor de exploatare (G_t , R_T , V) și parametrilor de funcționare a motoarelor (U_1 , f_1 , s , k_m). Impunând o anumită tensiune recuperată (ex. 25 kV), la un tonaj dat și dV/dt impus se poate stabili în funcție de programul de mers, valori limită la f_1 , U_1 , s .

i.) Clarifică posibilitățile de reglare a generatorului asincron trifazat în funcție de posibilitățile uzuale de comandă din cadrul frânei de rețea.

Este definită metoda cu un interes practic pentru tracțiunea electrică feroviară:

- modificarea concomitentă a frecvenței și tensiunii sau curenților statorici, rotorul fiind în scurtcircuit.

j.) S-a determinat regimul dinamic și matricea de transfer a motorului asincron. S-a identificat practic modul de reglare: după curentul statoric și turație sau după tensiunea statorică și turație.

S-au determinat analitic funcțiile de transfer a elementelor de execuție regulator de frânare-motor asincron. S-au determinat schemele bloc de reglare după tensiune/curent statoric și turație.

k.) Aduce clarificări asupra sistemelor de convertoare statice și modul de funcționare în cadrul frânei de rețea. Sunt determinate elementele de reglare ale convertoarelor în regim de debitare în rețea.

Sunt definite tipurile de convertoare statice ce au posibilitatea de funcționare la curenți reversibili:

- cu tiristoare cu funcționare în patru cadrane;
- cu tiristoare cu stingere pe poartă de curent.

l.) S-a elaborat metodologia de calcul pentru dimensionarea principalelor elemente ale CSF funcție de parametrii impuși de frâna de rețea. S-a determinat valoarea tensiunii minime de alimentare $U_{i\min}$ în vederea determinării duratei relative de conectare minimă λ_{\min} .

S-au determinat analitic parametrii și modul de protecție din cadrul CSF în sistemul MA-CSF-rețea.

m.) S-a proiectat și realizat un program original SIV.05 pentru dimensionarea convertorului static de frecvență.

Programul permite determinarea: U_{lmin} , U_d , λ_{min} , L , C , L_p , i_p , I_T , $\cos \phi$

Prin simulare grafică se determină schema conectării induc-tanțelor de limitare la di/dt . Programul este util în faza de proiectare pentru determinarea elementelor CSF și îndeosebi a tiristoarelor și diodelor de putere în vederea verificării la suprasarcină.

Programul a impus crearea a două baze de memorii cu tiristoare respectiv diode de putere, aflate pe parte tehnologică.

n.) S-a proiectat și construit de către autor a unui stand pe care s-au realizat încercări experimentale și măsurători în regim de generator a unui motor asincron trifazat, având caracteris-ticile: $P = 4$ kW, $U_n = 380$ V, $I_n = 8,3$ A, $\cos \phi = 0,85$, $n = 3000$ rot/min, clasa de izolație E, rezistența ohmică de înfășurare 0,640 Mohm, rezistența de izolație minim 50 Mohm.

Pentru transferul energetic s-a utilizat un redresor tip 11 kVA și un inverter tip 5 kVA. Circuitul intermediar este asigurat de 5 acumulatori tip 12 Es 320.

Standul a permis analiza funcționării în regim de generator iar rezultatele experimentale au validat valorile analitice presupuse la capitolele anterioare.

Motorul asincron poate fi adus la alunecări negative la orice turație rotorică prin modificarea frecvenței statorice. Motorul asincron trece automat în regim de generator la rularea suprasincronă.

S-a debitat energie electrică pe R cu o toleranță de -7 % față de programul SIV.04, fapt ce atestă veridicitatea programului.

Pentru debitare motorul asincron în ambele situații are nevoie de energie reactivă. Experimental valoarea s-a stabilit la 2 mA/4 kW.

o.) S-au făcut încercări cu rama de metrou 023 în următoarele regimuri:

- regim lansat;
- regim de frânare recuperativă de la viteza maximă la viteza de 10-15 km/h și respectiv curenți de frânare maxim permis

energiei electrice de tracțiune.

Vehiculele prevăzute cu frână de rețea reduc cheltuielile în ceea ce privește aparatul de rulare și aparatajul auxiliar cu 46 %, din totalul cheltuielilor de întreținere de 7 %.

Energia economisită la exploatare cu motoare asincrone față de motoarele de c.c. este de 25 %.

g.) S-a proiectat și realizat un program original SIV.06 pentru determinarea energiei recuperate în rețea pe o secție dată. Pentru exemplificare s-a rulat programul pe secția Dej Călători - Cluj Napoca. La cele 30 trenuri de călători cu un tonaj mediu de 510 tone la un total de 117 frânări la punct fix / 24 ore și 148 frânări de menținerea vitezei / 24 ore, se obține la 227.291 V respectiv o economie lunară de 1.906.575.976 lei.

Pentru continuarea cercetărilor sunt necesare experiențe complexe sistematic conduse pe locomotive, care nu pot sta la dispoziția autorului, motiv pentru care se sugerează ideea preluării acestor probleme în cadrul concernului Electroputere Craiova sau de către REFER București.

Este necesar să se continue cercetările privind comportarea instalațiilor de reglare în cazul apariției supratensiunilor de comutare și analiza efectelor la suprapunerea frânei de rețea cu cea pneumatică.

BIBLIOGRAFIA PRINCIPALĂ UTILIZATĂ

- [1] Hoancă, V.,
Simuț, V. Metoda de analiză a procesului de frânare electrică recuperativă în tracțiunea feroviară cu motoare asincrone, Revista CFR, Nr.2, București, 1994.
- [2] Krumbiegel, H. Energieruckgewinn durch Netzbremser elektrischer Triebfahrzeuge, Schienenfahrzeuge, Nr.6, Germania, 1990.
- [3] Harpsecht, W. Visionen über zukünftige elektrische Triebfahrzeuge, ZEV+DET, Nr.11-12, Germania, 1990.
- [4] Boiteux, M. Influence de la vitesse et de différents paramètres constructifs sur l'adhérence en freinage, Revue Generale des Chemins de Fer, Nr.7-8, Franța, 1990.
- [5] Martin, A.,
Garcia, M. Elektrische Hochleistungs - Universallokomotive S.252 mit Drehstromantriebstechnik ETR, Nr.12, Germania, 1980.
- [6] Pawelek, I. Tehnici de frânare pentru vehicule de mare viteză, Der Eisenbahn Ingenieur, Nr.7, Germania, 1993.
- [7] Popa, A. Comanda și reglarea automată a vehiculelor de tracțiune feroviară, Editura MTTc, București, 1974.
- [8] Mihăilescu, D.,
Lie, A. Considerații privind funcționarea vehiculelor feroviare cu transmisie în curent alternativ cu motoare asincrone de tracțiune, Revista Transporturilor și Telecomunicațiilor, Nr.1, București, 1984.
- [9] Berte, F. "Motoasincrono" per asionamenti a fregvenza variabile, Elektrificasione, Nr.1, Roma, 1990.
- [10] Simuț, V. Funcționarea locomotivelor electrice cu motoare asincrone trifazate în regim de frânare electrică recuperativă, Revista

- CFR, Nr.2, București, 1993.
- [11] Simuț, V. Funcționarea generatorului asincron trifazat în ansamblul frânei electrice de rețea, Revista CFR, Nr.3, București, 1993.
- [12] Simuț, V. Tendințe în utilizarea frânei de rețea la locomotivele electrice, Revista CFR, Nr.4, București, 1993.
- [13] Simuț, V. Comanda și reglarea automată a locomotivelor și trenurilor electrice cu motoare asincrone trifazate, Revista CFR, Nr.6, București, 1993.
- [14] Simuț, V. Cercetări experimentale privind frânarea electrică recuperativă, Referat 2, Catedra de Material Rulant CF, Timișoara, 1994.
- [15] Simuț, V. Frâna de rețea - stadiul actual și perspective, Sesiunea de Comunicări Științifice, A.I.F.E., Brașov, 1994.
- [16] Măgureanu, R.,
Micu, D. Convertizoare statice de frecvență în acționări cu motoare asincrone, Editura Tehnică, București, 1986.
- [17] Dordea, T. Proiectarea mașinilor electrice, Vol.1-2, Editura Universitatea Tehnică, Timișoara, 1992.
- [18] Jerve, G.K. Încercările industriale ale mașinilor electrice, Editura Tehnică, București, 1961.
- [19] * * * Eficiența frânării electrice recuperative, Elektriceskaia Teplavnaia, Tiaga, Nr.11, U.R.S.S., 1990.
- [20] * * * Mașini și acționări electrice - tendințe actuale, Editura Tehnică, București, 1988.
- [21] * * * O nouă serie de locomotive reversibile BB-9600 vor fi date în exploatare în traficul de mărfuri, Lavieduraie,

- Nr.2297, Paris, 1991.
- [22] Popa, G. Contribuții privind studiul regimurilor de funcționare ale vehiculelor electrice de tracțiune monotrifazice în condiții de exploatare, teza de Doctorat, Facultatea de Transporturi, București, 1994.
- [23] Duscheck, I.,
Shaarschmidt, I. Simulation moderner elektrischer Triebfahrzeuge in Drehstromantriebstechnik, Elektrische Bahnen, Nr.8, Germania, 1992.
- [24] * * * Bucharest Metro, SFG, Westinghouse, Transport-Systeme GmbH, București, 1991.
- [25] Drăgănescu, O. Încercările mașinilor electrice rotative Editura Tehnică, București, 1987.
- [26] Zuev, V.M., c.a. Modelarea matematică a unui sistem de alimentare independent, Elektricesstvo, Nr.6, Rusia, 1993.
- [27] Marcu, M. Contribuții la utilizarea curentului alternativ la transmisia locomotivelor cu motoare termice, Teza de Doctorat, Facultatea de Transporturi, București, 1985.
- [28] Fransua, A.,
Măgurean, R. Mașini și acționări electrice - Elemente de execuție, Editura Tehnică, București, 1986.
- [29] Boiteux, M. La frein pneumatique ferroviaire, a III-partie: organes de commande, frâna pneumatică feroviară, Revista Assoc.Franc. Amis Chemins Fer, Nr.412, Franța, 1992.
- [30] Mangini, S. L'automazione nelle prove freno al treni Tehnica Profesionala, Nr. 7/8, Italia, 1993.
- [31] Juncu, M., s.a. Rama de metrou acționată de motoare asincrone rotative, E.E.A. - Electrotehnica, Nr.36, București, 1988.

- [32] Leonhard, W. Control of electrical drives, Spsinger Vestag, Berlin, 1985.
- [33] Păpușoiu, Gh. Contribuții la modificarea și reglarea vitezei motoarelor asincrone utilizate în tracțiune, Teza de Doctorat, I.P.Timișoara, 1987.
- [34] Popovici, D. Frânarea recuperativă cu variatoare de tensiune continuă la mașinile de curent continuu, Teză de Doctorat, I.P.Timișoara, 1981.
- [35] Yamaya, T., s.a. 25 kV thyristor - controlled electric locomotives for TCDD, toshiba Reviem, Nr.161, Japonia, 1987.
- [36] Văzdăuțeanu, V. Tracțiunea electrică, I.P.Timișoara, 1984.
- [37] Păpușoiu, Gh. Acționare cu mașină de inducție alimentată prin invertor de tensiune cu menținerea frecvenței rotorice constante, Buletin Științific și Tehnic al Institutului Politehnic "Traian Vuia", Timișoara, seria Electrotehnică, Nr.30, 1985.
- [38] Boldea, I. Parametrii mașinilor electrice, Editura Academiei Române, București, 1991.
- [39] Mihoc, D., s.a. Teoria și elementele sistemelor de reglare automată, editura Didactică și Pedagogică, 1980.
- [40] Alexa, D.,
Micu, D. Invertoare și redresoare cu parametri energetici ridicați, Editura Tehnică, București, 1986.
- [41] Villemandg, A. Un mod de transport bie ecologique, Rev.Assoc.Franc., Amis Chemins Fer, Nr.414, Franța, 1992.
- [42] Bromberger, I. Comment faire L'Europe des trains, Vie du Rais, Nr.2301, Franța, 1991.
- [43] Kotelinikoy, A.V. Influența electromagnetică a rețelelor de tracțiune în curent alternativ pe

- liniile cu bransament electric din metal, Elektricesstvo, Nr.9, Rusia, 1992.
- [44] Mirzabekicm, G.Z., s.a. Efectul descărcării de tip Corona asupra profilului ce rezultă la frânarea electrică de mare rezistență în filtrul electrostatic, Elektricesstvo, Nr.10, Rusia, 1992.
- [45] Silard, A.P. Tiristoare cu blocare pe poartă GTO, Editura Tehnică, București, 1990.
- [46] Banu, C. Aspecte privind sistemele de comandă și reglare automată la trenurile electrice de curent monofazat cu redresoare comandate, Revista Transporturilor și Telecomunicațiilor, Nr.7-10, București, 1990.
- [47] Manea, Tr. Evidențierea și analiza unor factori perturbatori ai capacității de muncă a mecanicului de locomotivă, Revista Transporturilor și Telecomunicațiilor, Nr.10, București, 1985.
- [48] Păpușoiu, Gh. Contribuții la modificarea și reglarea turației motoarelor asincrone, Teza de Doctorat, Timișoara, 1987.
- [49] Etienne, M. Sisteme de traction utilisant le moteur asynchrone alimente en frequence variable, In Revue Generale de Chemins de Fer, Franța, Nr.7/8, 1977.
- [50] Mihăilescu, D. Contribuții cu privire la utilizarea transmisiilor în curent alternativ la locomotive cu motoare termice, Teza de Doctorat, București, 1977.
- [51] Măgureanu, R., Totoiu, V. Program pentru determinarea funcțiilor de transfer și a comportării dinamice a motorului asincron trifazat utilizat în sistemele de acționări electrice, Revista Electrotehnica, Vol.26, Nr.2, 1978, p.41-45.

[52] Turic, L.

Contribuții la comanda de frecvență a motoarelor asincrone cu invertoare care funcționează pe principiul M.I.D., Teza de Doctorat, I.P.I., 1970.