

Ing. Dumitru Miron

ACIIONAREA ELECTRICA A TRAMVAIELOR  
FOLOSIND SCHEME CU TIRISTOARE

Teză de doctorat în vederea  
obținerii titlului științific  
de doctor inginer

BIBLIOTECA CENTRALĂ  
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"  
TIMIȘOARA

Conducător științific,  
Prof.Dr.ing. E. Seracin

TIMISOARA - 1 9 8 1

554563  
332 H

C U P R I N S  
=====

	Pag.
Capitolul 1. I n t r o d u c e r e	. . . 1 - 8
Capitolul 2. Considerații privind utilizarea schemelor cu tiristoare la acțio- narea electrică a tramvaiului. . . .	9 - 13
Capitolul 3. Variatorul de tensiune continuă și principalele lui utilizări apli- cabile schemelor de acționare cu mo- toare de curent continuu cu excita- ție serie. . . .	13 - 43
Capitolul 4. Contribuții privind studiul porni- rii, modificării turației și frî- nării electrice a motoarelor de curent continuu cu excitație serie comandate prin variator de tensiune continuă. . . . .	43 - 77
Capitolul 5. Prezentarea unor scheme cu variator de tensiune continuă utilizate în tracțiunea electrică urbană . . . .	77 - 87
Capitolul 6. Scheme cu variator de tensiune continuă propuse pentru acționarea electrică a tramvaiului la noi în țară. . . . .	86 - 116
Capitolul 7. Implicațiile tehnico-economice ale folosirii variatorului de tensiune continuă în schemele de acționare electrică a tramvaiului. . . .	116 - 122
Capitolul 8. Rezultate obținute	122 - 129
Capitolul 9. C o n c l u z i i	130 - 132
B i b l i o g r a f i e	16 pag.
A n e x e	7 pag.

## CAPITOLUL 1. - I N T R O D U C E R E

Introducerea tramvaiului acționat electric în transportul urban în comun a constituit un important pas în rezolvarea multor probleme tehnice referitoare la acționările electrice de mare putere. Experiența de aproape un secol în exploatarea acestui mijloc de transport întâlnit în toate marile orașe ale lumii nu a făcut decât să confirme o dată în plus utilitatea tramvaiului în rezolvarea necesităților legate de transportul urban în comun. Avantajele de necontestat ale tramvaiului: capacitate mare de transport, siguranța în funcționare, conducere ușoară, ușurința întreținerii, economicitatea transportului, au constituit argumentele principale prin care s-a combătut tendința semnalată cu ani în urmă de a se renunța la acest mijloc de transport în comun invocându-se nivelul ridicat al poluării sonore și au justificat intensificarea cercetărilor pentru realizarea de tramvaie silențioase, cu capacitate de transport mărită.

A fost generalizat și a devenit clasic sistemul de acționare cu motoare electrice de curent continuu cu excitație serie alimentate de la linia de contact de curent continuu, calea de rulare constituind conductorul de întoarcere a curentului electric.

Studiile întreprinse și realizările practice din diferite țări privind folosirea altor soluții de alimentare a motoarelor de acționare (rețea de curent alternativ monofazat sau trifazat), ca și folosirea altor tipuri

de motoare electrice (motorul serie cu colector de curent ondulat, motorul serie cu colector de curent alternativ, motorul asincron trifazat, motorul sincron și mai recent motorul liniar) nu au putut conduce încă la argumente care sub aspect tehnic și economic să justifice renunțarea la sistemul clasic.

Firme de renume din întreaga lume se preocupă intens pentru perfecționarea schemelor de comandă și acționare a tramvaiului care au condus la îmbunătățirea caracteristicilor de tracțiune și de frînare.

Perfecționările aduse schemelor clasice de acționare a tramvaielor nu au eliminat principalele dezavantaje generate de aceste scheme și anume: imposibilitatea folosirii depline a aderenței și pericolul de patinaj, consumul inutil de energie electrică în rezistențele de pornire, șocurile la pornire și frînare cu repercusiuni defavorabile asupra confortului călătorilor, numărul mare de contacte mecanice care constituie puncte slabe ale schemei de acționare, etc.

Dezvoltarea electronicii de putere și realizarea ventilelor semiconductoare cu performanțe ridicate a făcut posibilă introducerea schemelor cu tiristoare în acționarea electrică a mijloacelor de transport în comun urban care au condus la obținerea următoarelor efecte pozitive deosebit de importante:

- a) Îmbunătățirea caracteristicilor de tracțiune și frînare cu efecte favorabile asupra confortului călătorilor;
- b) Utilizarea deplină a aderenței ca urmare a înlăturării variațiilor în salturi ale forței de tracțiune și de frînare;
- c) Obținerea unor accelerații medii la pornire mai mari ca urmare a creșterii cuplului mediu de pornire;
- d) Posibilitatea realizării frînării electrice cu recuperare de energie utilizând scheme mai simple;
- e) Posibilitatea utilizării frînării electrice până la oprirea vehiculului;
- f) Economii importante de energie electrică la pornire ca urmare a lipsei reostatului de pornire;
- g) Diminuarea costului întreținerii vehiculului datorită existenței unui număr mai mic de contacte mecanice;
- h) Posibilitatea alimentării și comenzii individuale a motoarelor de tracțiune utilizând scheme simple;

..//..

- 1) Asigurarea unor condiții superioare pentru introducerea automatizării în conducerea vehiculelor electrice destinate transportului în comun urban.

Până în prezent firmele specializate în construcția de echipamente cu tiristoare pentru tracțiunea electrică urbană au ales soluția de a folosi variatorul de tensiune continuă pentru pornire, modificarea vitezei de mers și frânare în locul reostatului.

Primele vehicule de transport urban alimentate prin variator de tensiune continuă de la linia de curent continuu și acționate cu motoare de curent continuu au intrat în exploatare în 1967 la Chicago și San Francisco.

Preocupări intense și realizări remarcabile au înregistrat și firmele AEG și ACEC iar în fază avansată de experimentări se găsesc RSC, URSS, RSFJ.

Si în țara noastră cercetările aplicative în acest domeniu au fost începute în anul 1966 de către un colectiv de specialiști de la ICPE - București care a și realizat prototipurile echipamentelor de acționare cu variator de tensiune continuă pentru troleibuz și pentru tramvai. Incercarea echipamentelor cu tiristoare pe stand în laborator și pe vehicule de transport s-a desfășurat în perioada 1971-1975 de către un colectiv din care a făcut parte și subsemnatul.

Merită subliniate de asemenea, preocupările și realizările specialiștilor din cadrul institutelor politehnice din Timișoara și Iași privind variatoarele de tensiune continuă și studiul fenomenelor generate de utilizarea acestuia în tracțiunea electrică urbană.

Dat fiind faptul că problema utilizării schemelor, cu tiristoare în acționarea electrică a tramvaiului este de mare actualitate și are o importanță tehnico-economică deosebită mi-am propus ca în cadrul tezei de doctorat să dezvolt unele concluzii rezultate ca urmare a cercetărilor personale în acest domeniu și pe baza încercărilor

lor efectuate asupra echipamentelor cu variator de tensiune continuă realizate în institut pentru echiparea troleibuzului și a tramvaiului. Acest lucru a apărut cu atât mai necesar cu cât multe aspecte referitoare la fenomenele ce au loc în elementele schemei de acționare și în instalațiile electrice aferente nu sînt lămurite în suficientă măsură.

Dintr-o analiză succintă a posibilităților de acționare a tramvaiului folosind scheme cu tiristoare am evidențiat faptul că în condițiile existente la noi în țară se justifică soluția cu variator de tensiune continuă. Pe această bază, în cadrul lucrării am analizat din punct de vedere teoretic fenomenele ce au loc în procesul pornirii, funcționării și frînării tramvaiului și am verificat veridicitatea relațiilor deduse la o schemă de acționare originală pe care am modelat-o pe un calculator analogic tip MEDA 41 TC din dotarea ICPE.

Realizarea în cadrul ICPE a prototipurilor echipamentelor cu tiristoare pentru troleibuz și tramvai a impus stabilirea metodologiei și elaborarea unor scheme pentru încercarea acestora în condiții apropiate de cele din exploatare.

Cu ajutorul standului realizat, folosind baza materială existentă în institut, am efectuat încercarea echipamentelor cu variator de tensiune continuă evidențiind posibilitatea utilizării în condiții satisfăcătoare a motorului de tracțiune din fabricația IMEB.

În capitolul 2 am făcut un studiu asupra sistemelor de acționare electrică a tramvaielor folosind scheme cu tiristoare enumerînd mai întîi schemele ce pot fi aplicate în rezolvarea acestei probleme ținînd seama de motorul de acționare și de sistemul de alimentare cu energie electrică. Deoarece multe probleme tehnico-economice privind sistemul de alimentare au fost rezolvate stabilindu-se ca fiind cele mai indicate sisteme de alimentare în curent continuu și sistemul de alimentare în curent alternativ monofazt [18], am studiat variantele de mutatoare posibile de utilizat în această situație evidențiind avan-

tajele și dezavantajele fiecăruia în parte. Din această analiză critică a rezultat că este indicată folosirea variatorului de tensiune continuă (Chopper) păstrându-se sistemul de alimentare în curent continuu și motorul de curent continuu cu excitație serie.

În capitolul 3 am prezentat principiul de funcționare a variatorului de tensiune continuă și am analizat schemele mai semnificative propuse de diverși autori [18],[60],[35] care pot fi avute în vedere la acționarea tramvaiului și m-au interesat în mod deosebit. În continuare este tratată problema comenzii variatoarelor evidențindu-se avantajele și dezavantajele fiecărei metode folosite și se prezintă principalele utilizări ale variatorului în schemele de acționare cu motoare de curent continuu cu excitație serie (variația continuă a tensiunii, variația continuă a valorii rezistenței, respectiv inductanței). Se evidențiază influența frecvenței de lucru a variatorului asupra sarcinii (asupra motorului) asupra sursei de alimentare și asupra instalațiilor de telecomunicații și de semnalizare și căile de diminuare a acestei influențe [5],[13],[40],[51].

În capitolul 4 am analizat folosirea variatorului de tensiune continuă în schemele de pornire, modificarea turației și frînarea electrică a motoarelor de curent continuu cu excitație serie utilizate în tracțiunea electrică urbană.

Contribuția mea personală în tratarea acestor probleme constă în următoarele:

- am stabilit relațiile pe baza cărora se pot determina limitele de variație ale curentului prin motor în diferite regimuri de funcționare și valorile medii ale acestor curenți în funcție de parametrii circuitului și de durata relativă de conectare.

- am analizat din punct de vedere tehnico-economic poziția rezistenței de limitare a curentului de frânare electrică recuperativă (fig 35) și am stabilit curbele

din fig.35 pe baza cărora se poate stabili poziția acestei rezistențe în funcție de  $\delta$  și de parametrii circuitului de frînare.

- am făcut o analiză critică a schemelor cu variator de tensiune continuă ce pot fi folosite la pornirea, modificarea turației și frînarea electrică a motoarelor de curent continuu cu excitația serie evidențiind avantajele și dezavantajele uneia față de cealaltă cât și față de schemele clasice. Se evidențiază faptul că folosirea variatorului în schemele de frînare electrică este deosebit de indicată- Schemele de frînare dinamică cu variator pot fi folosite pînă la reducerea vitezei vehiculului la valori foarte mici (sub 5 km/h).

- De asemeni, frînarea electrică recuperativă se poate realiza și la turații mici ale motorului condiția  $E > U$  realizîndu-se ca urmare a tensiunii electromotoare induse în inductanțele circuitului datorită variațiilor foarte rapide ale curentului prin motor provocate de funcționarea variatorului [67] .

In capitolul 5 am prezentat unele scheme de acționare a mijloacelor de transport în comun urban folosind variatorul de tensiune continuă care au prezentat interes în studiul schemei pe care am conceput-o. Este prezentată schema tramvaiului folosită de firma ACEC (fig 38) schema troleibuzului Skoda Tr-T (fig 39), schema tramvaiului tip T și KT realizată de RSC (fig 40), două scheme realizate de firma Siemens (fig 43) precum și schema tramvaiului Timiș 1 realizată de ICPE București (fig 45).

- In capitolul 6 am studiat o schemă concepută de mine pentru acționarea electrică a tramvaiului la noi în țară (fig 46), care a fost brevetată [66] .

In capitolul 7 am analizat critic implicațiile tehnico-economice ale folosirii variatorului de tensiune continuă în schemele de acționare electrică a tramvaiului evidențiind ca efecte pozitive:

- caracteristica efort-viteză mai înclinată;
- reglajul continuu al efortului de tracțiune în tot domeniul (F,V);



- eliminarea șocurilor de curent la revenirea tensiunii după o întrerupere intempestivă de scurtă durată;
- absorbirea unui curent mai mic din rețeaua de alimentare în timpul pornirii;
- posibilitatea folosirii frânării electrice pînă la oprirea vehiculului;
- posibilitatea folosirii frânării electrice recuperative fără a complica schema;
- reducerea consumului de energie electrică.

Am determinat relațiile care exprimă îmbunătățirea caracteristicile de tracțiune, îmbunătățirea condițiilor de pornire și funcționare din punct de vedere al curentului absorbit, reducerea consumului de energie electrică.

În capitolul 8 am prezentat pe larg rezultatele pe care le-am obținut atît prin experimentarea echipamentelor din componența schemelor de acționare cu variator de tensiune continuă realizate în ICPE cît și prin aplicare relațiilor de calcul deduse în lucrare asupra schemei propuse comparativ cu cele obținute prin modelare pe calculator.

În elaborarea lucrării am studiat un bogat material documentar prezentat în partea finală a acesteia, material deosebit de util pentru cei care lucrează în domeniul proiectării și realizării instalațiilor electrice pentru tracțiune. Consider ca o contribuție importantă și faptul că lucrarea, prin însăși structura ei, reprezintă o sinteză a principalelor probleme ce se pun la elaborarea unui sistem de acționare electrică a tramvaiului folosind scheme de tiristoare.

Valorificarea cercetărilor și a rezultatelor obținute prin dezvoltarea temei abordate în cadrul tezei de doctorat se caracterizează în brevetarea schemei de acționare a tramvaiului concepute și analizate, care a fost pusă la dispoziția întreprinderii de transporturi

Timișoara pentru aplicare [66] , în publicarea unor articole, reviste de specialitate [67],[109],[153],[154] și într-o serie de comunicări tehnico-științifice [68],[69],[155] .

## C A P I T O L U L 2

### CONSIDERATIILE PRIVIND UTILIZAREA SCHEMELOR CU TIRISTOARE LA ACTIONAREA ELECTRICA A TRAMVAIULUI.

Particularitățile schemelor cu tiristoare ce pot fi utilizate la acționarea electrică a tramvaiului sînt determinate de alimentare și de motorul de tracțiune.

Din considerente tehnice și economice, fundamentate teoretic în literatură, alimentarea tramvaielor se realizează prin linie de contact unifilară și sînele constituind calea de întoarcere a curentului electric.

În ceea ce privește motorul de tracțiune opiniile specialiștilor sînt împărțite, unii pledînd pentru motorul de curent continuu cu excitație serie, iar alții pentru motorul asincron trifazat.

O analiză mai amănunțită a acestei probleme pornind de la cerințele impuse motorului de tracțiune conduce la concluzia că, în condițiile schemelor cu tiristoare, pentru acționarea tramvaiului se pot utiliza cu rezultate bune motoare de curent continuu cu excitație serie, derivație sau mixtă, motoare serie de curent alternativ, motoare asincrone, motoare sincrone și motoare liniare. [18], [49],[61], [94], [121], [125], [141].

Luînd ca element de bază sistemul de alimentare rezultă:

- 2.1. Linie de contact în curent continuu. ✓
- 2.1.1. Linie de contact în curent continuu și motor de tracțiune de curent continuu.

Sistemul de tracțiune urbană cu linie de contact în curent continuu și vehicule acționate cu motoare de curent

continuu este cele mai răspândit datorită avantajelor bine cunoscute.

Introducerea schemelor cu tiristoare pentru acționarea tramvaielor funcționând în acest sistem se realizează în condiții avantajoase din punct de vedere al posibilității utilizării unei părți importante a echipamentului existent pe tramvai și îndeosebi a motorului de tracțiune.

Mutatorul cu tiristoare utilizat în cazul acționărilor cu motoare de curent continuu alimentate de la o sursă de curent continuu poartă denumirea de variator de tensiune continuă, Chopper sau reglor. [18], [35], [53], [60], [65], [66].

În [18], [35], [36], [60], [94], [114], [117], [131], [145] sînt prezentate diferite scheme de variatoare de tensiune continuă cu evidențierea avantajelor și dezavantajelor fiecăruia și a posibilităților de utilizare.

Intr-o schemă de acționare variatorul de tensiune continuă poate fi utilizat pentru variația continuă a tensiunii la bornele sarcinii, pentru modificarea continuă a valorii medii a unei rezistențe sau a unei inductanțe de circuit [18].

Folosind aceste posibilități numeroase firme au conceput, realizat și aplicat scheme cu variator de tensiune continuă pentru acționarea mijloacelor de transport în comun [34], [35], [43], [58], [94], [104].

#### 2.1.1.1. Schemă cu variator de tensiune continuă și motor de curent continuu cu excitație serie.

Primele vehicule de acest tip au fost realizate și au intrat în exploatare în deceniul trecut. Schemele respective justificau însă avantajul principal al variatorului și anume, economia de energie electrică [94].

Experiența acumulată și dezvoltarea cercetărilor pe această linie au condus la realizarea unor scheme îmbunătățite, care utilizează cât mai bine avantajele pe care le

oferă variatorul de tensiune continuă [4], [157], [17], [27], [38], [41], [43], [94], [114].

Se remarcă faptul că la acționarea tramvaielor se folosesc două soluții de bază și anume: un singur variator pentru comanda ambelor motoare (grupe de motoare legate în serie) de tracțiune: fiecare motor (grup de motoare) de tracțiune este comandat de câte un variator de tensiune continuă [18], [34], [104], [108], [114].

#### 2.1.1.2. Scheme cu variator de tensiune continuă și motor de curent continuu cu excitație separată.

Schemele de acționare de acest tip se pretează la tramvaie. O schemă optimală pentru astfel de echipament este prezentată în [94]. Se remarcă faptul că sînt necesare două variatoare: unul în circuitul indusului și unul în circuitul de excitație.

#### 2.1.1.3. Scheme cu variator de tensiune continuă și de motor de curent continuu cu excitație mixtă.

Folosirea motorului de curent continuu cu excitație mixtă în condițiile schemelor cu variator de tensiune continuă oferă avantaje superioare față de motorul de curent continuu cu excitație serie concomitent cu o simplificare apreciabilă a schemelor de frînare și o creștere a posibilităților de comandă.

#### 2.1.1.4. Scheme cu variator de tensiune continuă și motor de curent continuu cu excitație derivație.

Utilizarea variatorului de tensiune continuă într-o schemă de acționare cu motor de curent continuu cu excitație derivație conferă acestuia caracteristici mecanice care îl fac apt pentru a satisface cerințele impuse de tracțiunea electrică. Cu toate că pînă în prezent o schemă cu variator

de motor de curent continuu cu excitația derivație nu a fost utilizată pentru acționarea electrică a mijloacelor de transport în comun urban, la ICPE - București s-a realizat un vehicul pentru 1-2 persoane (Moped) acționat cu un motor cu întrefier axial, alimentat de la o baterie, comandat prin variator de tensiune continuă.

#### 2.1.2. Linie de contact în curent continuu și motor de curent alternativ.

Din punct de vedere teoretic problema poate fi rezolvată utilizând un invertor cu tiristoare [94].

Practic nu s-au realizat astfel de scheme pentru acționarea tramvaiului mai ales din considerente de ordin economic datorită complexității schemelor respective care conțin, pe lângă un număr apreciabil de ventile semiconductoare, și un transformator.

#### 2.2. Linie de contact în curent alternativ monofazat

##### 2.2.1. Linie de contact în curent alternativ monofazat și motor de curent continuu.

În [4], [65], [77], [78] sînt prezentate mai multe scheme de acționare folosind motoare de curent continuu și redresor comandat.

Principalul avantaj al schemelor de acest tip constă în faptul că pot funcționa și în regim de invertor permițînd frînarea electrică cu recuperare de energie cînd unghiul de aprindere a tiristoarelor este mai mare de  $90^\circ$ . Schemele prezintă însă inconvenientul apariției unui consum suplimentar de putere reactivă care duce la înrăutățirea factorului de putere. În plus, creșterea unghiului de comandă conduce la modificarea conținutului de armonici ale tensiunii și curentului atît în rețeaua de alimentare cît și în circuitul de sarcină de curent continuu.

##### 2.2.2. Linie de contact în curent alternativ monofazat și motor de curent alternativ serie cu colector.

La acest sistem de tracțiune utilizarea schemelor cu tiristoare este deosebit de avantajoasă din punct de vedere al posibilităților comenzii prin reglarea tensiunii aplicate la bornele motorului. Schemele cele mai simple utilizează convertizoare de curent alternativ fără circuit intermediar de curent continuu. Un astfel de convertizor se realizează prin conectarea în antiparalel a două tiristoare. Comanda tensiunii la bornele motorului se asigură prin modificarea unghiului de aprindere a tiristoarelor. În [3], [18], sînt prezentate scheme de acționare de acest fel. Realizarea triacurilor pentru puteri mari va conduce la o simplificare substanțială a acestor scheme [149].

### 2.2.3. Linie de contact în curent alternativ monofazat și motor de curent alternativ trifazat.

Dintre motoarele trifazate utilizate în tracțiunea electrică se remarcă motorul asincron cu rotorul în scurtcircuit și motorul sincron.

În cazul motorului asincron schemele cu tiristoare urmează să asigure reglarea simultană și continuă a tensiunii aplicate și a frecvenței. Sistemul este folosit pe vehicule de tracțiune doar de firma Westinghouse datorită prețului ridicat al elementelor schemei care nu este compensat nici de avantajele pe care le oferă motorul asincron.

Problemele privind utilizarea în general a schemelor cu tiristoare la acționările cu motoare asincrone sînt prezentate pe larg în literatură [122], [133], [135], [139], [140], [142]. În [120] este tratată o schemă cu motor asincron și convertizor static cu tiristoare pentru acționarea unui autobuz hibrid.

Motorul sincron comandat prin convertizor de frecvență (cu sau fără circuit intermediar de curent continuu) cu tiristoare oferă caracteristici mecanice de tip serie. Acest avantaj împreună cu cele privind puterea specifică ridicată, stabilitatea funcționării, etc., pledează pentru utilizarea

motorului sincron în schemele cu tiristoare pentru tracțiunea electrică [129], [130]. Pînă în prezent astfel de scheme nu s-au folosit în tracțiunea electrică urbană.

Din cele prezentate rezultă că alegerea unui sistem sau a altuia de acționare a tramvaiului folosind scheme de tiristoare presupune luarea în considerație a tuturor avantajelor și dezavantajelor ținînd seama în primul rînd de implicațiile de ordin tehnic și economic pe care le generează introducerea acestor scheme.

În țara noastră tramvaiele sînt alimentate prin linie de curent continuu și sînt acționate cu motoare de curent continuu cu excitație serie. Introducerea schemelor cu tiristoare presupune un efort financiar considerabil și luarea unei hotărîri în acest sens este condiționată de rezultatele ce se obțin prin testarea în exploatare a unui număr limitat de vehicule realizate cu astfel de scheme. Pornind de la aceste condirente în cadrul tezei de doctorat voi trata schemele cu variator de tensiune continuă care se pot aplica tramvaielor din țara noastră cu efort financiar minim.

### CAPITOLUL 3.- VARIATORUL DE TENSIUNE

#### CONTINUA SI PRINCIPALELE LUI UTILIZARI APLICABILE SCHEMELOR DE ACTIONARE CU MOTOARE DE CURENT CONTINUU CU EXCITATIE SERIE

##### 3.1. - Comutație forțată cu acumulator de energie capacitiv.

În tracțiunea electrică urbană folosind scheme cu variator de tensiune continuă s-au generalizat variatoarele care funcționează pe principiul comutației forțate

cu acumulator de energie captiv. În [60] este descris pe larg fenomenul comutației forțate folosind în acest scop un condensator.

Schema de principiu este prezentată în fig.1 iar variația în timp a curenților și tensiunilor în fig.2 [60].

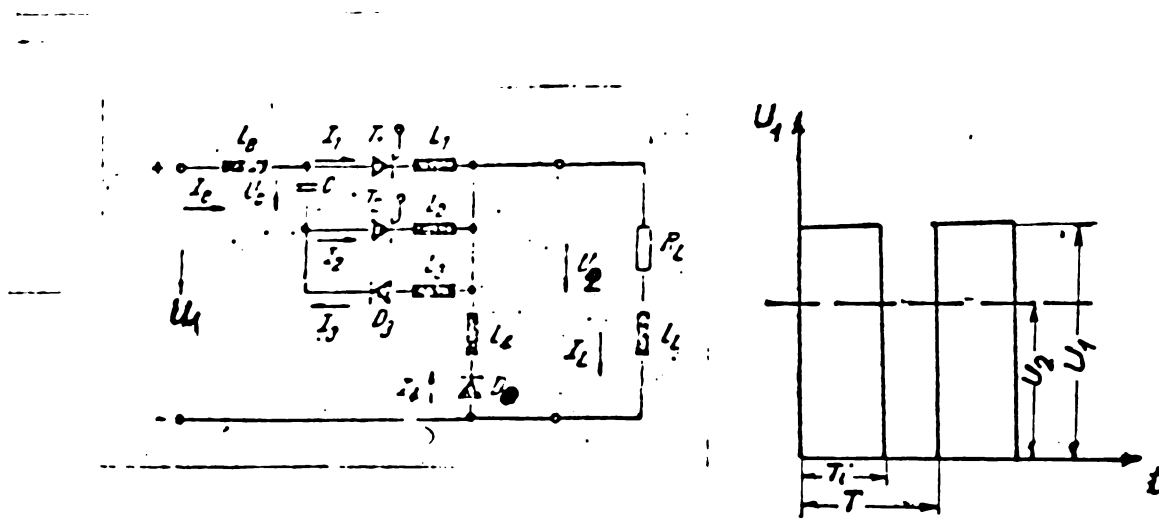


Fig.1 - Schema de principiu a părții de forță a unui variator de tensiune continuă alimentând o sarcină.

În figură s-au notat:

- T<sub>1</sub> - tiristor principal
- T<sub>2</sub> - tiristor de stingere
- C - condensator de stingere
- D<sub>4</sub> - dioda de roată liberă

Se definesc următoarele elemente :

T - perioada de reglare

T<sub>i</sub> - durata de conducție

$$\delta = \frac{T_i}{T} \quad \text{durata relativă de conducție sau raport ciclic}$$

La începutul intervalului de timp considerat tiristorul principal T<sub>1</sub> este aprins. Condensatorul C a fost încărcat anterior la tensiunea U<sub>c</sub> cu polaritate negativă. În momentul t



se aprinde tiristorul de stingere  $T_2$  și tensiunea condensatorului produce trecerea rapidă a curentului de sarcină de pe tiristorul principal  $T_1$  pe circuitul serie format de  $C$  și  $T_2$  producându-se stingerea lui  $T_1$ . Curentul a fost comutat de pe  $T_1$  pe circuitul de stingere cu ajutorul unui acumulator de energie capacitiv. Tensiunea condensatorului s-a aplicat tiristorului  $T_1$  ca tensiune de blocare.

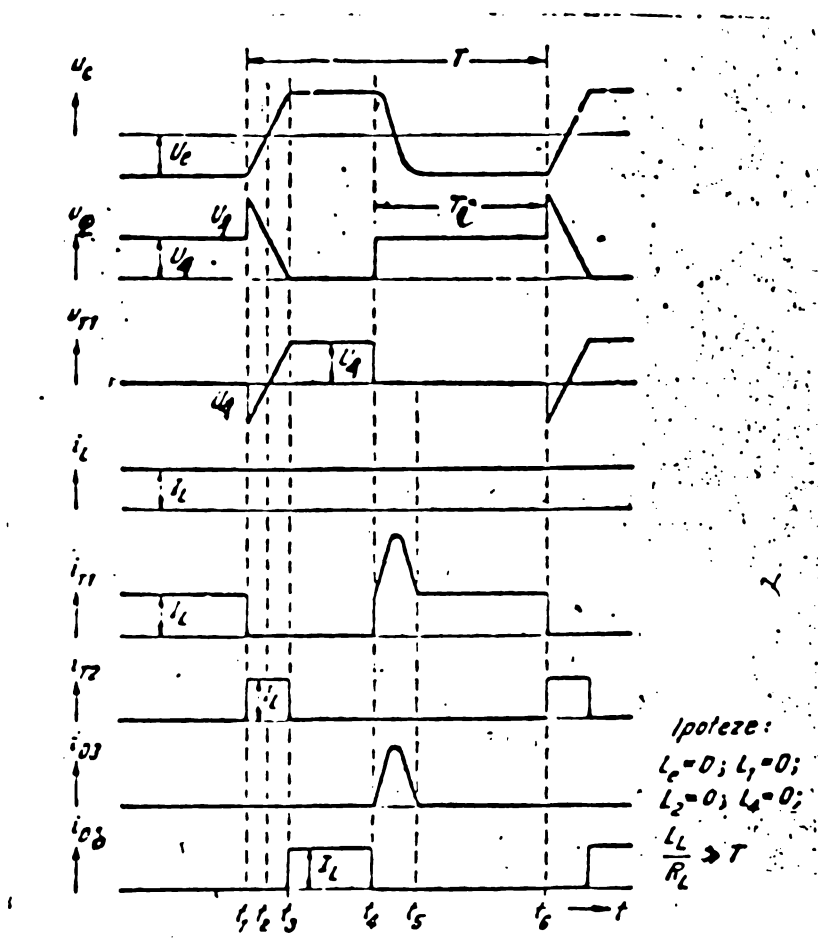


Fig.2 - Variația în timp a curentilor și tensiunilor.  
 Deoarece curentul de sarcină circulă acum prin condensator acesta se va reîncărca.

La momentul  $t_2$  trec prin zero concomitent, tensiunea pe condensator și tensiunea pe tiristorul principal. Pe măsură ce condensatorul se reîncarcă, tensiunea de ieșire, care în momentul  $t_1$  este  $2 U_e$  scade, astfel că în

momentul  $t_3$  cînd tensiunea pe condensator este egală cu tensiunea sursei, se anulează. Prezența diodei de sursare  $D_4$  este absolut necesară în cazul unei sarcini inductive sau rezistiv-inductive deoarece tensiunea de ieșire nu poate să-și schimbe semnul.

În momentul  $t_3$  curentul de sarcină se comută de pe circuitul de stingere pe dioda de descărcare  $D_4$ . În acest moment procesul de comutație forțată s-a încheiat.

Din cele prezentate rezultă că ciclul de funcționare a unui variator cu comutație forțată folosind un condensator cuprinde următoarele faze principale:

- aprinderea tiristorului principal stabilindu-se conectarea sarcinii la sursa de alimentare și comutarea curentului de sarcină de pe dioda  $D_4$  pe tiristorul  $T_1$ ;
- încărcarea condensatorului de stingere la o tensiune de valoare și polaritate corespunzătoare;
- conectarea condensatorului de stingere cu polaritate corespunzătoare aplicării unei tensiuni de blocare la bornele tiristorului principal;
- stingerea tiristorului principal prin descărcarea condensatorului prin circuitul de sarcină;
- comutarea curentului de sarcină din circuitul de stingere prin dioda  $D_4$ .

Pe baza diagramelor din fig.2 se pot stabili condițiile care asigură o funcționare corespunzătoare a schemelor cu comutație prin condensator și anume:

$$t_{\text{blocare}} = t_2 - t_1 = \frac{U_1 \cdot C}{I_L} \gg t_r \quad (1)$$

$$t_k = t_3 - t_1 = 2U_1 \frac{C}{I_L}$$

unde:

- $T_{\text{blocare}}$  - timpul în decursul căruia la bornele tiristorului principal se aplică tensiunea de blocare.
- $T_k$  - timpul de comutație;
- $t_1$  - timpul de revenire al tiristorului principal.

- $t_2$  - timpul după care tensiunea la bornele condensatorului se anulează;
- $t_3$  - timpul după care condensatorul s-a reîncărcat avînd polaritatea inversată.
- $U_1$  - tensiunea sursei de alimentare
- $I_L$  - curentul de sarcină.

- Prezența în circuit a inductanțelor proprii micșorează panta de creștere a curentului și conduce la modificări esențiale în desfășurarea procesului de comutație forțată și anume:

a) în momentul aprinderii tiristorului de stingere tensiunea condensatorului este inferioară tensiunii de alimentare;

b) condensatorul se descarcă parțial chiar în timpul comutării curentului de pe tiristorul principal pe tiristorul de stingere;

c) timpul de blocare al tiristorului principal scade odată cu creșterea curentului de sarcină;

d) tensiunea de blocare pozitivă a tiristorului principal crește peste valoarea tensiunii de alimentare;

e) datorită oscilației tensiunii condensatorului, prin sursa de alimentare circulă un curent invers;

f) tensiunea pe condensator scade ca urmare a acestei oscilații, sub tensiunea de alimentare.

- Procesul de aprindere și stingere a tiristoarelor este însoțit de importante pierderi de energie care depind de panta curentului la aprinderea și stingerea tiristorului. Valoarea lor poate fi redusă folosind bobine saturabile.

### 3.2. Scheme de bază ale variatorului de tensiune continuă ce pot fi utilizate în acționarea electrică a tramvaiului.

Literatura de specialitate tratează o mulțime de scheme de variatoare de tensiune continuă care pot fi clasificate din mai multe puncte de vedere și anume :

..//..

554503  
332 H

- În funcție de modul de conectare a circuitului de stingere cu sarcina ce deosebesc variatoare cu circuitul de stingere în serie cu sarcina și variatoare cu circuit de stingere în paralel cu sarcina.

- În funcție de modul de comandă al lor deosebim variatoare care acționează asupra mărimii tensiunii de ieșire prin comandă prin lățimea impulsurilor, prin comandă, prin frecvența impulsurilor și prin comandă mixtă.

În cele ce urmează voi prezenta cele mai semnificative scheme de variatoare întâlnite în literatură care pot fi aplicate în schemele de acționare electrică a tramvaiului evidențiind avantajele și dezavantajele fiecăreia în parte.

Una din schemele variatoarelor este cea prezentată deja în fig.1 [60] .

Schema funcționează cu frecvența de lucru constantă-

$$U_2 = \frac{1}{T} \int_0^T U_1 dt = \sigma U_1 \quad (2)$$

Dezavantajul acestei scheme constă în faptul că la stingerea tiristorului principal condensatorul de comutație este inițial încărcat la o tensiune mai mare și apoi descărcat la o tensiune mai mică decât tensiunea de alimentare. La creșterea curentului de sarcină tensiunea disponibilă pe condensator scade, deci timpul de blocare depinde substanțial de valoarea curentului de sarcină, fiind direct proporțională cu sarcina electrică disponibilă pe condensator și invers proporțională cu curentul de sarcină.

Prin  $T_1$  va circula nu numai curentul constant de sarcină, ci și curentul de basculare a condensatorului C, curent care se închide prin circuitul care cuprinde inductanța  $L_3$  și dioda  $D_3$ . Deoarece prin condensator, în regim tranzitoriu trebuie să treacă un curent alternativ, rezultă

$$\int_{t_1}^{t_3} i_{T_2} dt = \int_{t_4}^{t_5} i_{D_3} dt \quad (3) \quad [60]$$

..//..

- schema prezentată nu și-a găsit o utilizare largă datorită faptului că tensiunea pe condensator pentru ambele stări ale tiristorului principal este egală cu tensiunea sursei de alimentare și își schimbă semnul la fiecare aprindere și stingere.

În plus, curentul minim de sarcină este determinat de durata minimă de conducție a tiristorului principal și de timpul de încărcare a condensatorului.

În fig.3 este prezentată o schemă care se deosebește de cea precedentă prin faptul că dioda  $D_3$  din circuitul de inversare a polarității tensiunii pe condensator este înlocuită prin tiristorul  $T_3$ . Variația în timp a curentilor și tensiunilor este prezentată în fig. 4 [60].

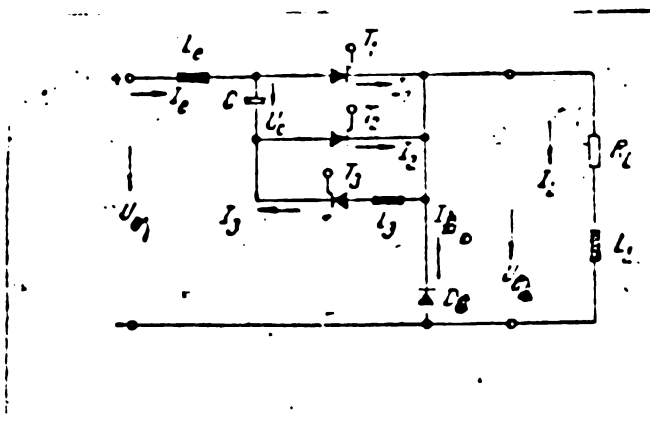


Fig.3 - Variator de tensiune continuă cu tiristor în circuitul de inversare a polarității tensiunii pe condensator.

..//..

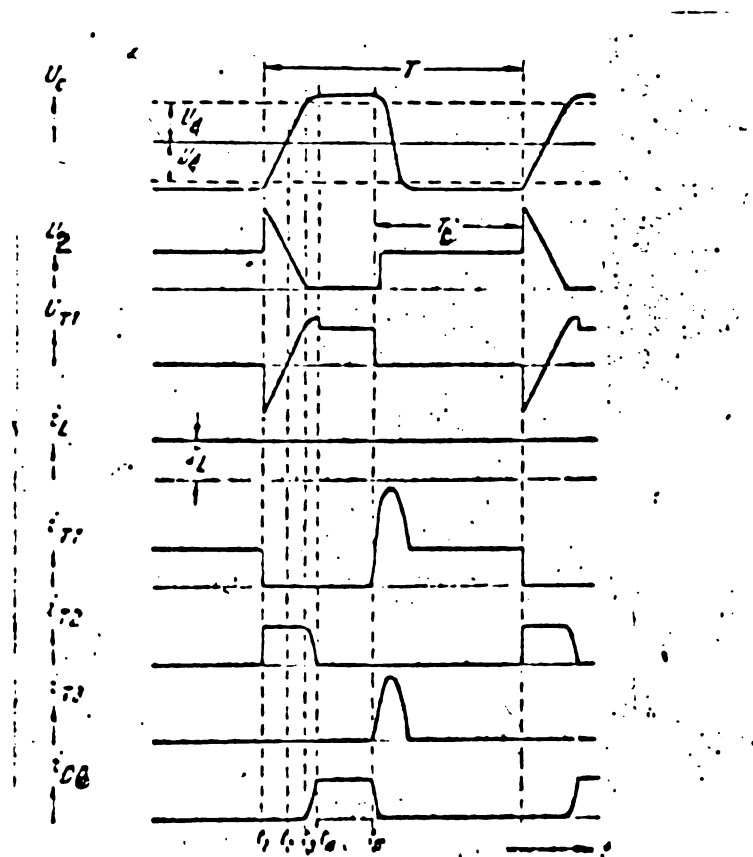


Fig.4. - Variația în timp a curenților și tensiunilor variatorului din fig.3.

Schema prezintă două avantaje principale și anume: tensiunea pe condensatorul de stingere este mărită datorită energiei magnetice acumulate în inductanța de intrare  $L_e$  în momentul  $t_3$  rămânând apoi la valoarea atinsă, și nu mai apare curentul care circula prin sursă în sensul invers și care conduce la descărcarea parțială a condensatorului.

În fig.5 este prezentată schema cu circuit auxiliar de reîncărcare [60].

Prezența circuitului auxiliar de reîncărcare format din dioda  $D_5$  și inductanța  $L_5$  înlătură unele dezavantaje menționate la schema precedentă asigurând o descărcare rapidă a condensatorului de stingere. În felul acesta, chiar în cazul existenței unei sarcini care conține o tensiune electromotoare, există posibilitatea de a lucra cu durata relative de conducție ridicate.

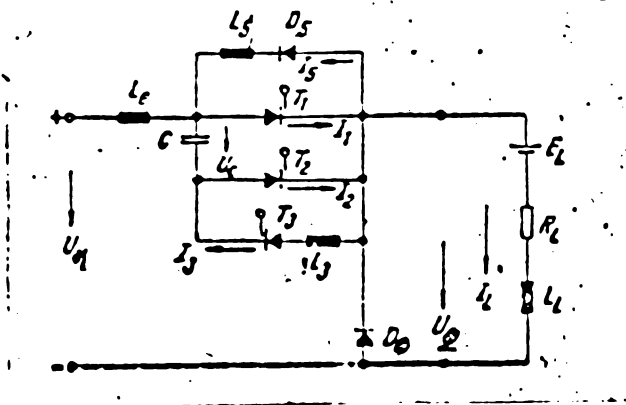


Fig.5 - Variator de tensiune continuă cu circuit auxiliar de reîncărcare.

Cînd tiristorul de stingere  $T_2$  este aprins, condensatorul se descarcă parțial prin circuitul auxiliar de reîncărcare. Curentul de reîncărcare se repartizează în funcție de curentul de sarcină între circuitul de sarcină și circuitul auxiliar de reîncărcare.

Datorită circuitului auxiliar de reîncărcare rezultă și o valoare micșorată a curentului de sarcină corespunzător duratei relative de conducție minime, deoarece după aprinderea tiristorului de stingere și în acest punct de funcționare o parte din curentul condensatorului este derivată de pe circuitul de sarcină pe circuitul de reîncărcare.

Cu toate că și această schemă are dezavantajul că încărcarea condensatorului de stingere se face prin sarcină și că întotdeauna la pornirea variatorului trebuie să se asigure mai întîi aprinderea tiristorului de stingere, ea se înscrie printre schemele cu încărcarea condensatorului prin sarcină care se folosesc cu rezultate bune în acționarea mijloacelor de transport în comun.

O variantă îmbunătățită a schemei în fig.5 este schema cu circuite separate de reîncărcare și de inversare a polarității tensiunii pe condensator prezentată în fig.6 [60].

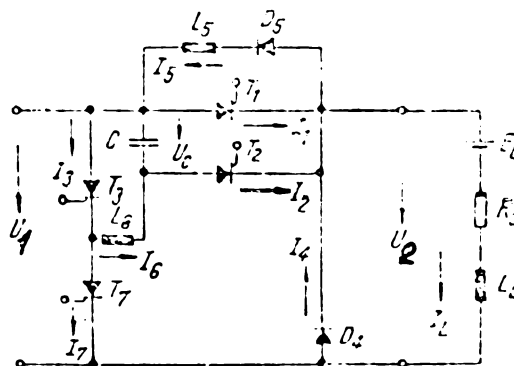


Fig. 6 - Variator de tensiune continuă cu circuite separate de reîncărcare și de inversare a polarității tensiunii pe condensator.

Variatorul realizat după această schemă poate să funcționeze și când curentul de sarcină este zero, condensatorul putând fi încărcat prin circuitul  $T_7, L_6$ , iar schimbarea polarității are loc prin circuitul  $T_5, L_6$ . Spre deosebire de schemele prezentate anterior, tiristorul principal este descărcat de curentul condensatorului ceea ce reduce solicitarea sa în regim dinamic. Durata relativă de conducție poate fi scăzută pînă la zero ceea ce înseamnă că tiristorul principal și cel de stingere pot fi aprinse concomitent. Prezența circuitului separat de reîncărcare permite ca procesul de reîncărcare a condensatorului să fie întrerupt oricînd, iar curentul recomutat de pe tiristorul de stingere pe cel principal. Completarea sarcinii electrice necesare pentru reîncărcarea completă a condensatorului este efectuată de circuitul de reîncărcare în timpul intervalului de conducție a tiristorului principal.

Datorită faptului că schema conține un număr mare de tiristoare și diode de putere, este mai scumpă comparativ cu cea prezentată anterior. În plus, schema de comandă este mai complicată datorită faptului că impulsurilor de comandă trebuie date în trei etape: aprinderea lui  $T_1$  și  $T_7$ , aprinderea lui  $T_3$ , aprinderea lui  $T_2$ .

În schemele de acționare a tramvaiului realizate de ACEC s-a extins variatorul de tensiune continuă cu circuit de stingere conectat în paralel cu sarcina pe catodul ti-



ristorului principal fapt pentru care astfel de variatoare poartă denumirea improprie de variatoare cu circuit de stingere pe catod.

Schema de principiu a unui astfel de variator este prezentată în fig.7. În [35] este descris, pe larg modul de funcționare a acestei scheme la care se evidențiază următoarele avantaje:

- Nu există nici o restricție privind ordinea aprinderii tiristoarelor  $T_1$  și  $T_2$ ;

- Tensiunea de ieșire din variator poate fi modificată într-o gamă largă indiferent de valoarea curentului de sarcină și de tipul acesteia.

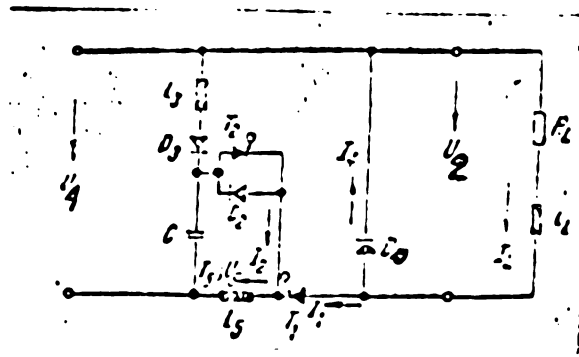


Fig.7 - Variator de tensiune continuă cu circuit de stingere în paralel cu sarcina.

- variatorul poate funcționa în condiții bune chiar și în absența curentului de sarcină;
- se evită solicitarea suplimentară a sarcinii în perioadele de încărcare a condensatorului de stingere;
- se folosesc condensatoare de capacitate mai redusă.

Printre principalele dezavantaje ale schemelor de acest tip se menționează :

- ventilele semiconductoare sînt solicitate la tensiuni duble față de tensiunea sursei de alimentare și trebuie alese corespunzător acestei valori;

- în cazul folosirii variatorului pentru acționarea tramvaiului, avînd în vedere că polaritatea minus este legată la pămînt este necesar un contactor pentru deconectarea motorului de tracțiune cînd variatorul rămîne blocat [92] .

In fig.8 este prezentată schema de principiu a variatorului realizat de ACEC pentru comanda schemelor de acționare în tracțiunea electrică [35] .

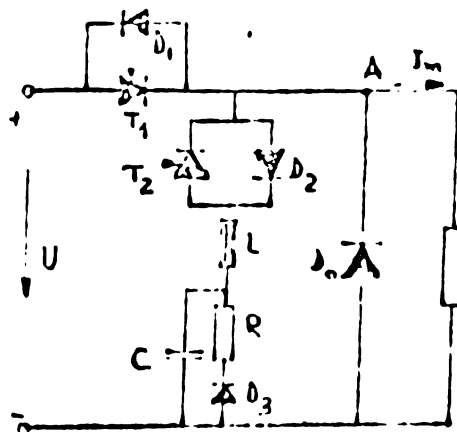


Fig.8 - Variator de tensiune continuă realizată de ACEC

La aprinderea tiristorului principal  $T_1$  cu ajutorul unui impuls aplicat pe grila sa de comandă, tensiunea sursei se aplică pe de o parte la bornele sarcinii și pe de altă parte la bornele circuitului oscilant  $L C$  prin intermediul diodei  $D_2$ . Condensatorul  $C$  se va încărca la tensiunea  $U$ . Cînd se dă comanda de aprindere a tiristorului de stingere  $T_2$ , tensiunea condensatorului se aplică ca tensiune de blocare pe  $T_1$  iar sarcina acumulată va fi descărcată prin circuitul de sarcină. Tiristorul principal se stinge cînd condensatorul este descărcat, pe tiristorul principal se aplică tensiunea pozitivă egală cu tensiunea sursei de alimentare.

Schema descrisă prezintă următoarele avantaje:

- tiristoarele nu sînt solicitate la tensiuni mai mari decît

tensiunea de alimentare, a dispărut circuitul pentru inversarea polarității tensiunii pe condensator, poate funcționa și la curent de sarcină zero, poate fi folosită și la sarcini care conțin t.e.m. permițând durata relativă de conducție de la zero la 1.

În fig.9, lo sînt prezentate schemele variatoarelor de tensiune continuă elaborate de ICPE București [ 94 ] .

Aceste scheme se caracterizează printr-o funcționare sigură urmărindu-se protejarea ventilelor semiconductoare la variațiile rapide ale curentului și tensiunii prin conectarea în serie cu tiristorul principal și cu dioda de roată liberă a unor inductanțe de limitare a lui  $\frac{di}{dt}$  .

Aceste lucru a fost necesar deoarece s-a constatat că inductanțele realizate de conductoarele de legătură nu sînt suficiente pentru limitarea solicitărilor dinamice ale elementelor semiconductoare.

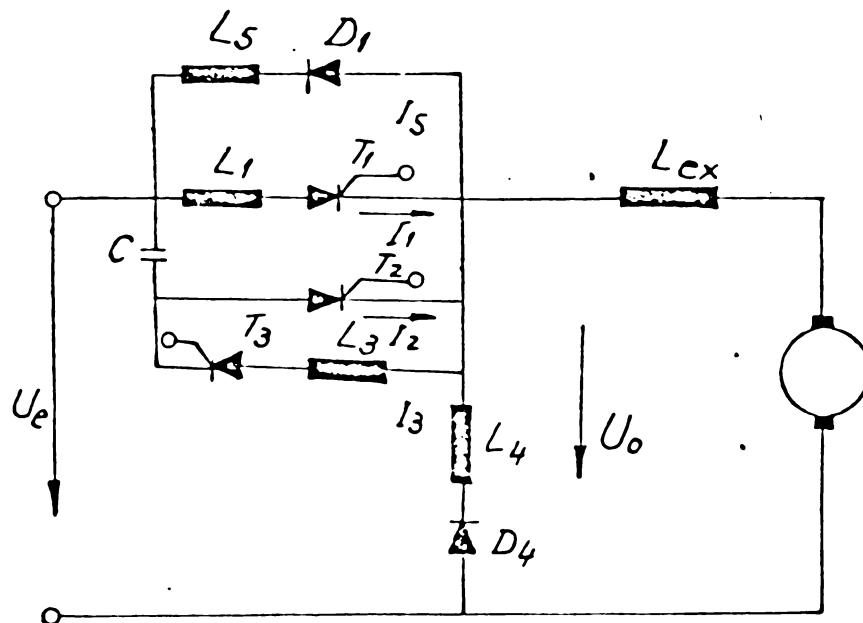


Fig.9 - Schema variatorului de tensiune continuă cu încărcarea condensatorului în serie în sarcina realizată de ICPE București.

..//..

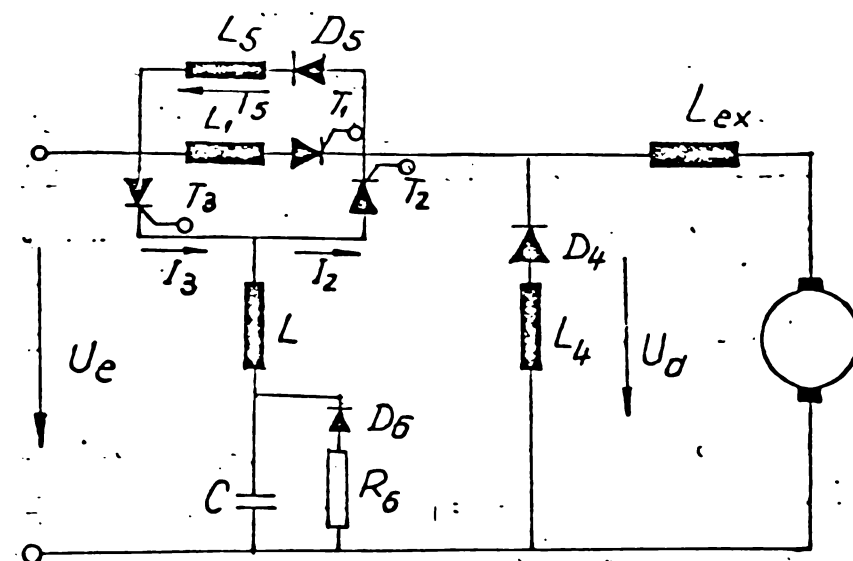


Fig.10 - Schema variatorului de tensiune continuă cu încărcarea condensatorului independent de sarcină realizată de ICPE.

### 3.3. Comanda variatoarelor

Schema de comandă este prezentată principal în fig.11 în care pentru simplificare variatorul e reprezentat printr-un întrerupător electronic, V și o diodă de descărcare D [60].

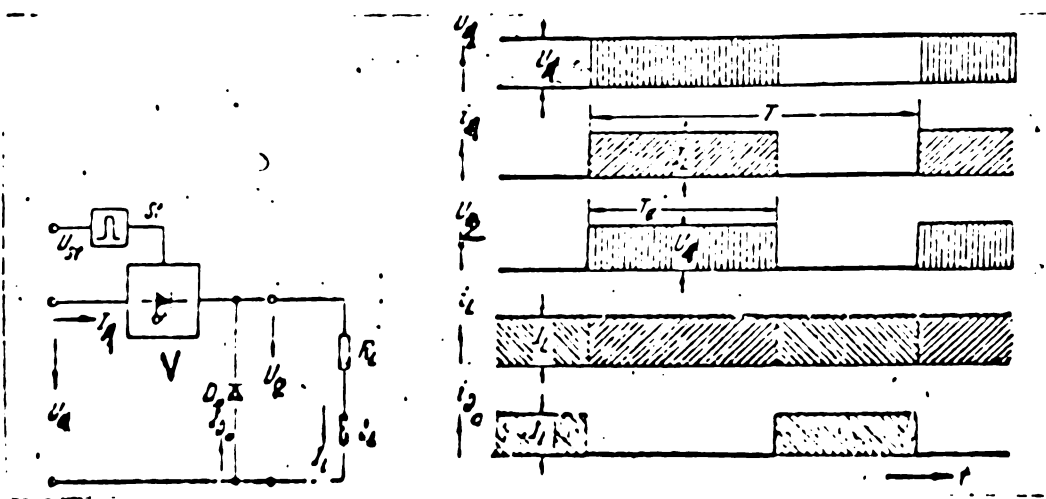


Fig.11 - Variator de tensiune continuă idealizat.

Variația în timp a tensiunilor și curenților.

Intrerupătorul va fi închis printr-un impuls de comandă și va fi deschis prin impulsul următor. Se presupune că proprietățile întrerupătorului sînt ideale, timpul de comu-

...//...

tație infinit mic iar constanta de timp a circuitului de sarcină este mai mare decât perioada T.

În condițiile unei tensiuni de alimentare constante valoarea medie a tensiunii de ieșire poate fi variată continuu între zero și  $U_e$  prin variația duratei relative de conducție  $\delta$  care reprezintă <sup>raportul între</sup> intervalul de conducție  $T_1$  și perioada T. Variația sub forma de impulsuri a tensiunii de ieșire  $U_a$  conduce în general la un curent de sarcină  $I_L$  avînd un conținut de armonici superioare. La ipoteza  $T \ll \frac{L}{R_L}$  curentul va fi bine filtrat de inducțanța circuitului de sarcină. Prin sarcină va circula un curent practic continuu, Curentul prin sursa de alimentare va fi pulsatoriu avînd valoarea medie.

$$I_e = \delta I_L \quad (4)$$

Durata relativă de conducție  $\delta$  poate fi variată în două feluri: prin lățimea impulsurilor (variația intervalului de conducție la perioadă constantă), prin frecvența impulsurilor (variația perioadei la interval de conducție constant).

Comanda prin lățimea impulsurilor este deosebit de avantajoasă în special la alimentarea acționărilor prevăzute cu circuit de reglare.

Faptul că raportul între constanta de timp a sarcinii și perioadă este constant, permite menținerea conținutului de armonici a circuitului de sarcină în limite determinate.

Comanda prin frecvența impulsurilor are avantajul unor circuite de comutație mai simple iar pierderile de comutație care depind de frecvență apar în întregime numai la frecvența maximă.

Dacă variatorul este inclus într-un circuit de reglare a curentului așa cum se arată în fig.12 se poate aplica o comandă bipozițională a curentului de sarcină. În acest caz nici intervalul de conducție și nici frecvența nu sînt constante.

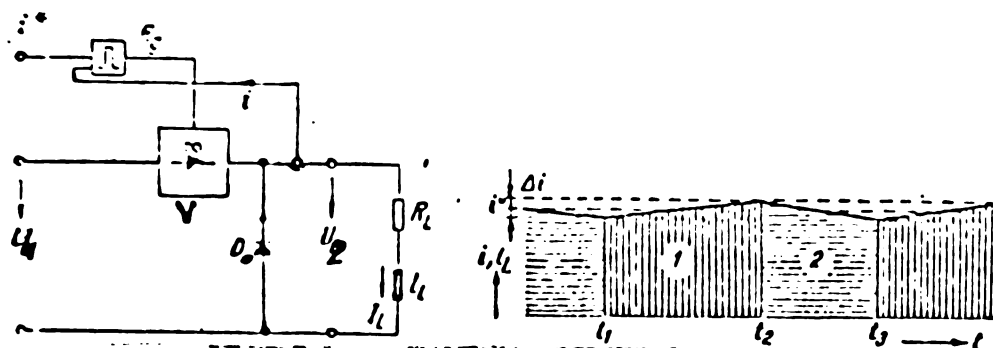


Fig.12 - Variator de tensiune continuă idealizat, cu reglare bipozițională. Variația în timp a curentului prin sarcină.

Reglarea bipozițională conduce la o variație în timp a curentului, care presupune o componentă de curentă alternativă.

Frecvența de lucru depinde de lățimea benzii de toleranță  $\Delta i$ , de constanta de timp a sarcinii și de mărimea valorii impuse a curentului (fig.13) [60] .

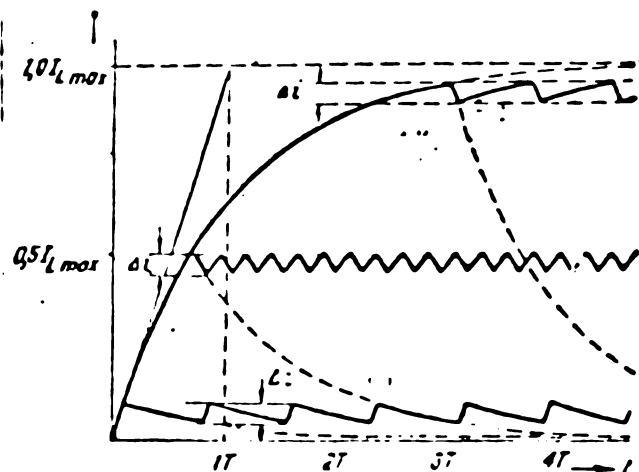


Fig.13 - Variația în timp a curentului pentru trei valori diferite ale valorii impuse ale curentului de sarcină.

Frecvența cea mai ridicată rezultă la mijlocul domeniului de funcționare iar cea mai scăzută la extremități.

Pentru a folosi avantajele ambelor metode la variatoarele folosite în tracțiunea electrică se lucrează cu două frecvențe fixe: o frecvență mai scăzută pentru  $\delta \leq 0,1$  și  $\delta \geq 0,9$  și a frecvență mai ridicată pentru  $0,1 \leq \delta \leq 0,9$  [35].

Reglarea bipozițională permite o reglare de curent relativă simplă fiind în multe cazuri avantajoasă față de schemele de comandă obișnuite, care necesită închiderea unui circuit suplimentar de reglare a curentului. Metoda este dezavantajoasă în schemele care conțin un filtru în circuitul de alimentare.

### 3.4. Utilizarea variatorului de tensiune continuă în schemele de acționare cu motoare de curent continuu cu excitație serie.

Variatorul de tensiune continuă poate fi folosit în schemele de acționare cu motoare de curent continuu cu excitație serie pentru pornire, modificarea turației și frînarea electrică reostatică sau cu recuperare de energie.

Aceste utilizări sînt determinate de funcțiile pe care variatorul poate să le îndeplinească într-o schemă și anume:

- Variația continuă a tensiunii la bornele motorului între zero și valoarea tensiunii rețelei;
- Variația continuă a rezistenței;
- Variația continuă a inductanței;

#### 3.4.1. Variația continuă a tensiunii la bornele motorului.

Variatorul de tensiune continuă se conectează în serie cu motorul de acționare (fig.14).



Fig. 14. Variația prin impulsuri a tensiunii de alimentare.

Tensiunea de ieșire poate fi variată cu ajutorul modificării raportului ciclic  $\sigma$  egal cu raportul dintre timpul de conducție și perioada impulsurilor.

Domeniul de reglare este cuprins între zero ( $\sigma = 0$ ) și  $U_a$  (cînd  $\sigma = 1$ ).

Dioda D conectată în paralel cu motorul asigură circulația curentului prin motor în perioada cînd variatorul de tensiune este blocat.

Prin motor va circula un curent ondulat, iar tensiunea la bornele acestuia este sub formă de impulsuri.

În scopul reducerii ondulațiilor curentului de sarcină, comutarea acestuia de la sursa de alimentare pe circuitul de roată liberă și invers, trebuie să se facă cu o frecvență a cărei perioadă să fie mică față de constanta de timp a circuitului de sarcină.

Condensatorul a cărui prezență este necesară în cazul cînd circuitul conține inductanțe are rolul de înmagazinare a energiei în perioadele în care alimentarea sarcinii este întreruptă ( $T - T_1$ ) cedînd-o sarcinii cînd variatorul conduce ( $0 - T_1$ ). În acest fel este compensat efectul inductanței rețelei care limitează valoarea curentului absorbit de sarcină de la sursa de alimentare.

Variînd în acest fel tensiunea aplicată la bornele motorului serie de curent continuu se va obține o familie de caracteristici mecanice similare celor obținute prin orice metodă clasică de variație a tensiunii de alimentare.

#### 3.4.2. Variația prin impulsuri a rezistenței.

Conectînd variatorul de tensiune continuu în derivație pe o rezistență R se va obține o variație a valorii acesteia conform relației:

$$R_{ef} = (1 - \sigma) R \quad (5)$$

de la zero ( $T_1 = T$ ) pînă la R ( $T_1 = 0$ )

Dacă rezistența R este înseriată în circuitul de sarcină (fig. 15) variația tensiunii la bornele acesteia se realizează variînd prin impulsuri valoarea rezistenței R.



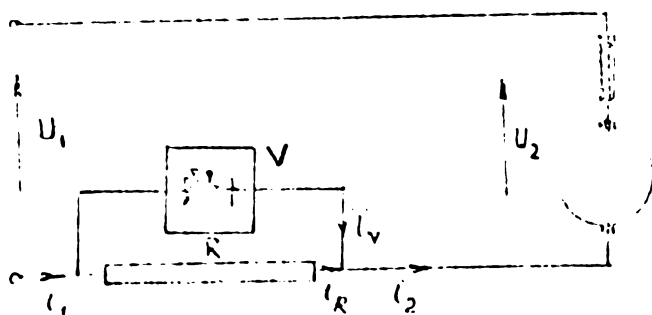


Fig-15 - Variația prin impulsuri a valorii rezistenței.

Curentul de sarcină  $i_2$  va rezulta prin însumarea curentului ce străbate variatorul ( $i_T$ ) în perioadele de conducție ( $0 \leq t \leq T_1$ ) cu curentul ce străbate rezistența ( $i_R$ ) în perioadele când variatorul este blocat ( $T_1 \leq t \leq T$ ). Introducerea rezistenței în circuit va corespunde unei diminuări a valorii curentului  $i_2$ , în timp ce scurtcircuitarea, ei va determina o creștere a lui  $i_2$ , sarcina fiind parcursă de un curent ondulat.

Dacă se dimensionează corespunzător rezistența  $R$  poate fi folosită atât pentru pornire cât și pentru modificarea turației motorului.

Variația rezistenței din circuitul motorului se poate efectua într-un număr infinit de trepte, finețea reglajului fiind astfel maxim posibilă.

Din punct de vedere al pierderilor de energie metoda nu aduce o ameliorare sensibilă față de metoda clasică de reglaj reostatic.

Variația prin impulsuri a rezistenței este justificată în schemele de frînare reostatică.

Caracteristicile mecanice artificiale astfel obținute sînt similare celor rezultate în cazul reglajului reostatic clasic. În aceste scheme variatorul asigură reducerea valorii rezistenței de frînare pe măsură ce turația motorului scade.

### 3.4.3. Variația prin impulsuri a inductanței.

Cuplînd un variator de tensiune continuă în paralele cu o inductanță se obține o variație a valorii acesteia în funcție de durata relativă de conducție (fig.16).

$$L_{ef} = (1 - \delta) L \quad (6).$$

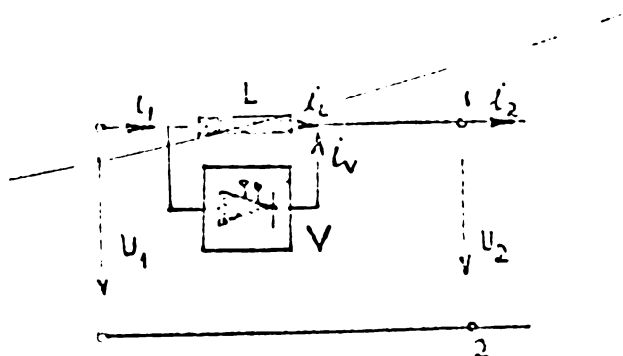


Fig. 16 - Variația prin impulsuri a valorii inductanței.

Domaniul de variație este cuprins între  $L_{ef} = 0$  (pentru  $\delta = 1$ ) și  $L_{ef} = L$  (pentru  $\delta = 0$ ).

Față de schema folosită pentru variația rezistenței, prezența inductanței va face ca la aprinderea variatorului curentul prin inductanță să fie menținut pe seama energiei acumulate în inductanță așa încât prin variator va circula diferența dintre curentul de sarcină și curentul prin inductanță.

$$i_1 = i_2 - i_L \quad (7).$$

După stingerea variatorului ( $i_T = 0$ ) tot ca urmare a efectului inductanței are loc o diminuare a curentului de sarcină la valoarea

$$i_2 = i_L$$

Cu cât durata relativă de conducție  $\delta$  și perioada de funcționare  $T$  sînt mai mari cu atât curentul  $i_T$  va avea o valoare mai mare iar  $i_L$  o valoare mai mică.

Această conduce la oscilații inadmisibil de mari ale curentului de sarcină. Pentru a preveni această situație trebuie compensat efectul inductanței printr-o capacitate temporară conectată în paralel la bornele inductanței (fig. 17)

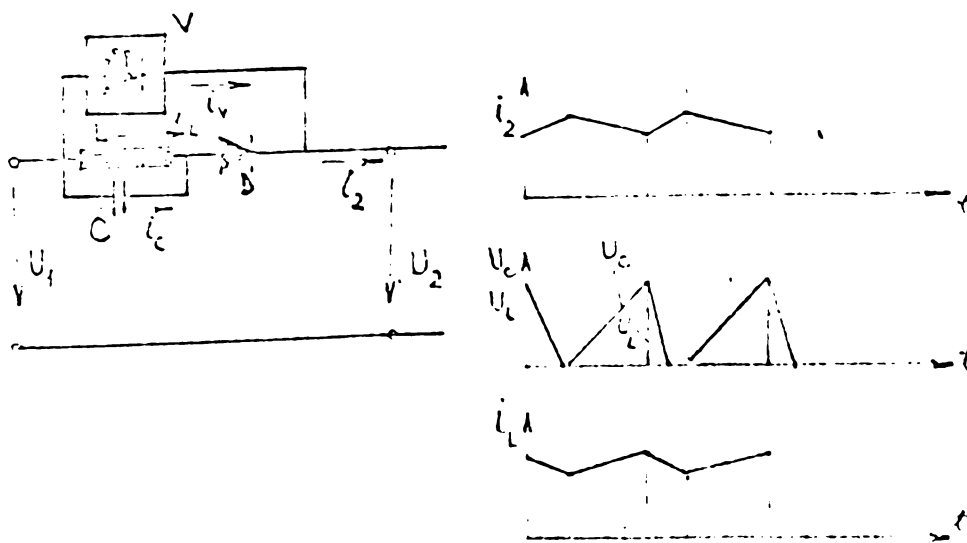


Fig.17 - Compensarea efectului inductanței printr-o capacitate tempon.

La întreruperea variatorului, datorită inductanței care se opune creșterii curentului  $i_L$ , curentul condus inițial de variator va circula prin capacitatea C, și dioda de blocare D. Condensatorul C se va încărca pînă ce tensiunea sa atinge valoarea tensiunii de la bornele inductanței. În acest timp curentul  $i_e$  se anulează, iar curentul de sarcină va circula numai prin inductanța L.

La aprinderea variatorului, pe dioda D este aplicată tensiunea negativă a condensatorului; curentul de sarcină fiind preluat de variator se va produce descărcarea condensatorului C pe inductanță. După inversarea polarității de la bornele condensatorului, curentul de sarcină va putea circula și prin dioda D.

Prin variator va circula numai diferența curenților. Variația prin impulsuri a inductanței se folosește în schemele de subexcitație a motoarelor de curent continuu cu excitație serie.

### 3.5. Influența frecvenței de lucru a variatorului.

Frecvența de lucru a variatorului are influență asupra funcționării variatorului însuși, asupra sarcinii, asupra sursei de alimentare și asupra instalațiilor de telecomunicații și de semnalizare.

#### 3.5.1. Influența frecvenței asupra variatorului [18],[35]

Pentru a realiza o comutare sigură este necesar ca timpul de aplicare a tensiunii negative de blocare pe tiristorul prin-

cipal să fie cel puțin egal cu  $4 - 5 t_i$  ( $t_i$  fiind timpul de inversare al tiristorului). Durata de conducție minimă este dată de timpul necesar încărcării sau descărcării condensatorului. Aceste limite minime stabilesc frecvența maximă de lucru a variatorului ca și limitele superioare și inferioare ale raportului ciclic.

Dacă pentru mișcarea frecvenței se mărește limita minimă a timpului de blocare, o parte importantă din energia sursei nu poate fi transmisă sarcinii. Din contră, dacă se mărește limita minimă a timpului de conducție, tensiunea minimă de ieșire poate fi foarte ridicată constituind un dezavantaj pentru pornirea motorului.

Un alt factor care pledează pentru o frecvență nu prea ridicată este valoarea pierderilor de energie în elementele variatorului. Se pot distinge trei categorii de energie disipată în variator care sînt proporționale cu frecvența de reglare: pierderile la comutație în semiconductoare, pierderile în circuitele (R.C) de protecție a semiconductoarelor, pierderile în rezistența de amortizare.

### 3.5.2. Influența frecvenței asupra sarcinii [18]

S-a arătat anterior că la alimentarea unei sarcini inductive sau rezistive - inductive prin variator de tensiune continuă, tensiunea aplicată la bornele sarcinii este sub formă de impulsuri iar curentul este ondulat.

Este necesar ca ondulațiile curentului să nu depășească limitele admise ținînd seama de pierderile prin încălzire date de componenta alternativă a curentului.

În regim stabil de funcționare se poate calcula ondulația curentului de sarcină așa cum rezultă din fig.18 unde sarcina este reprezentată de un motor cu rezistența  $R_m$  și inductanța  $L_m$ .

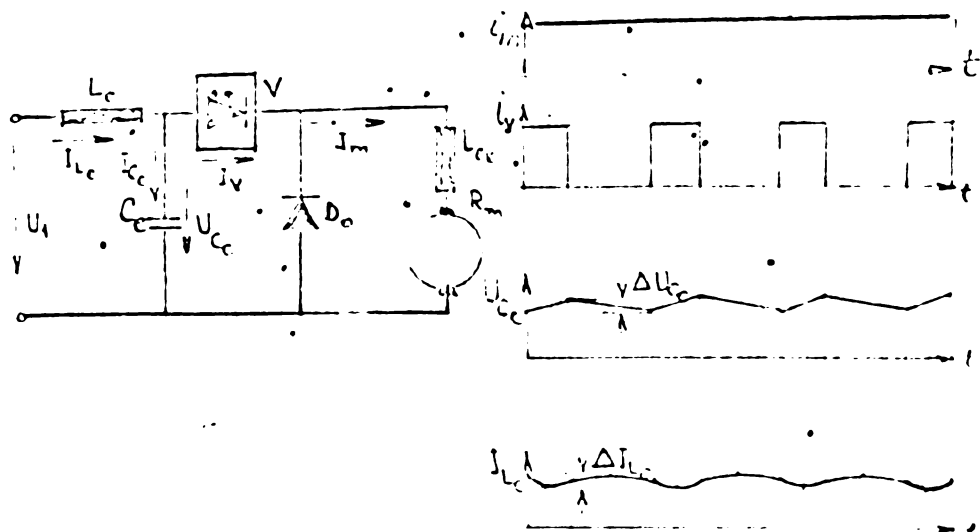


Fig.18 - Influența frecvenței variatorului asupra sarcinii.

Se poate ușor constata că ondulara este nulă pentru  $\delta = 0$  și  $\delta = 1$  și este maximă pentru  $\delta = 0,5$ . Ondulara maximă este dată de relația:

$$(\Delta I_m)_{\max.} = \frac{U}{R_m} \operatorname{th} \frac{R_m \cdot T}{4 L_m} \approx \frac{U \cdot T}{4 L_m} \quad (8).$$

Ondulara maximă a curentului de sarcină este cu atât mai mare cu cât frecvența de reglare este mai scăzută.

Rezultă că dacă reglarea se face la o frecvență mică pentru reducerea ondulației trebuie să se înscrie în circuitul de sarcină o inductanță mare.

### 3.5.3. Influența frecvenței asupra sursei de alimentare.

În cazul alimentării de la sursa cu rezistență internă nulă (baterie) nu se pun probleme din acest punct de vedere. În cazul general al alimentării de la rețea este necesar să se prevadă un filtru între variator și rețea format dintr-o inductanță  $L_0$  și un condensator  $C_0$  (pentru ca filtrul să nu introducă pierderi). Trebuie evitat ca frecvența vreunei armonici a curentului absorbit de condensatorul de filtrare să se afle în apropierea frecvenței de rezonanță a circuitului de filtrare  $L_0 C_0$  deoarece în acest caz rezultă supra-tensiuni de valoare ridicată.

Condensatorul  $C_0$  face posibilă trecerea curentilor pulsa-tori, cu toată prezența inductanței de rețea, și pe lângă rolul de rezervor de energie (este vorba de energia magnetică din inductanțele circuitului ce ia naștere în procesul co-mutației variatorului) el reduce supra-tensiunile pe variator

la un nivel acceptabil. Aceste supratensiuni pot fi provocate de manevre din rețea, de întreruperile curentului de sarcină de către tiristorul principal și de funcționarea normală a variatorului.

Supratensiunile provocate de manevrele din rețea au o variație relativ lentă și nu duc la amplitudini periculoase. Aceasta face ca pe de o parte filtrul să nu aibă influență asupra lor și pe de altă parte, ele să nu influențeze buna funcționare a semiconductoarelor.

Intreruperile curentului de sarcină de către tiristorul principal al variatorului se realizează foarte rapid. Energia magnetică acumulată în inductanța de linie și în cea a filtrului de intrare se transformă în energie potențială la bornele condensatorului. Din această cauză, la bornele condensatorului de intrare tensiunea maximă ce apare este dată de relația:

$$(U_c)_{\max.} = \sqrt{\frac{L_e}{C_e}} (I_1)_{\max.} \quad (9)$$

Intreruperile provocate de funcționarea normală a variatorului se deosebesc de cazul anterior prin durată scurtă a perioadelor de cuplare și de decuplare. Aceste întreruperi determină suprapunerea unei componente alternative peste tensiunea continuă a rețelei. Pentru dimensionarea montajului este importantă amplitudinea maximă  $(\Delta U_c)_{\max.}$  a acestei componente deoarece solicitarea maximă la tensiune a ventilelor semiconductoare este determinată de suma  $[U_1 + (\Delta U_c)_{\max.}]$ .

Presupunând că curentul de sarcină este perfect constant se poate determina ondulara maximă a tensiunii la bornele condensatorului a cărei valoare depinde de durata relativă de conducție :

$$(\Delta U_{c_e})_{\max.} = \delta \frac{I_m}{\omega_o C_e} \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_o}{f} \right) \quad (10) \quad [18]$$

unde:  $\delta$  - raportul ciclic  
 $I_m$  - curentul prin sarcină

$$\omega_o = 2\pi f_o = \frac{1}{\sqrt{L_e C_e}}$$

$f$  - frecvența de lucru a variatorului

$$L_t = L_{re\text{țea}} + L_e$$

Ecuția prezintă un punct de rezonanță în care amplitudinea maximă a tensiunii tinde către infinit pentru  $f = f_0$ . Evitarea acestui punct se poate face acționînd fie asupra frecvenței de rezonanță, fie asupra frecvenței de lucru a variatorului.

Din considerentele menționate anterior privind comanda variatorului rezultă că este mai comod să se păstreze constantă frecvența de lucru a variatorului și să se acționeze asupra frecvenței de rezonanță astfel ca raportul

$$\frac{f_0}{f} \neq 1$$

Cum frecvența de rezonanță a circuitului de filtrare depinde și de inductanța liniei de contact a cărei valoare variază în funcție de poziția vehiculului rezultă că variația raportului  $\frac{f_0}{f}$  într-o gamă de valori care să evite punctul de rezonanță, ar impune reglarea capacității de intrare  $C_e$  în timpul funcționării, ceea ce practic este imposibil. De aici derivă stabilirea unor criterii pentru dimensionarea economică a filtrului și alegerea frecvenței de lucru a variatorului.

Din relația (10) rezultă că dacă  $f \ll f_0$  într-o perioadă de reglare vor apare mai multe puncte extreme ale tensiunii pe condensator iar ondulara maximă a tensiunii va fi:

$$(\Delta U_{C_e})_{\max.} = \frac{2 I_m}{\omega_0 C_e} \frac{1}{\sin \pi \frac{\omega_0}{\omega}} \quad (11) \quad [35]$$

Dacă  $f \gg f_0$  ondulara este maximă pentru  $\delta = 0,5$

$$(\Delta U_{C_e})_{\max} = \frac{I_m}{\omega_0 C_e} \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{2} \frac{\omega_0}{\omega} \right) \quad (12) \quad [35]$$

Tot în fig.18 se prezintă variația în timp a curenților prin elementele circuitului și a tensiunii la bornele condensatorului.

Din cele prezentate rezultă că pentru a limita supra-tensiunile determinate de funcționarea variatorului la

valori rezonabile trebuie să se aleagă  $f > f_0$ . În general pentru dimensionarea economică a elementelor filtrului de intrare se cere îndeplinită condiția

$$f \geq (2 - 3)f_0 \quad (13) \quad [18]$$

relație care corespunde și condiției de limitare a oscilațiilor curentului din linia de contact a căror amplitudine maximă este dată de relația :

$$(\Delta I_l)_{\max.} = \hat{I}_m \left[ \frac{1}{\cos \left( \frac{\pi}{2} \frac{f_0}{f} \right)} - 1 \right] \quad (14) \quad [18]$$

În plus frecvențele  $f$  și  $f_0$  trebuie să țină seama și de alte cerințe ale instalației și sursei de alimentare. Alegerea frecvenței de rezonanță a filtrului este legată de valorile  $L_e$  și  $C_e$  precum și de condiția de independență minimă față de armonica de 50 Hz din curentul liniei de contact.

Frecvența de lucru a variatorului este legată la rîndul ei de calitatea tiristoarelor, de soluția adoptată pentru pornire și de metoda de comandă utilizată. Rezultă deci că frecvența proprie de oscilație  $f_0$  trebuie să aibă valoarea minimă care rezultă din condiția (13) și în același timp să corespundă unor dimensiuni minime pentru elementele filtrului. Astfel frecvența optimă de oscilație corespunde valorii maxime obținute în condiția că inductanța liniei de contact este minimă.

Experiența a arătat că pentru tot domeniu  $f_0/f > \frac{1}{2}$  apar supratensiuni foarte sensibile la variația inductanței  $L_t$ . Această inductanță conține inductanța rețelei care este un parametru variabil în tracțiunea electrică în funcție de distanța care separă vehiculul de stația de alimentare.

Dacă  $\frac{f_0}{f} < \frac{1}{3}$ , din relația (16), înlocuind tangenta prin argumentul său rezultă o relație simplificată a amplitudinii maxime a ondulației tensiunii pe condensator.

$$(\Delta U_{C_e})_{\max.} = \frac{I_m \cdot T}{4 C_e} \quad (15) \quad [35]$$

Se constată că pentru aceeași ondulare a tensiunii capacitarea condensatorului va fi cu atît mai mică cu cît frecvența



de reglare va fi mai mare.

Inductanța  $L_e$  a filtrului de intrare reduce ondulara curenților în linia de contact la o amplitudine suficient de joasă pentru a nu perturba alți utilizatori. Acest lucru este deosebit de important în tracțiunea electrică unde prezența curenților alternativ care circulă în rețea poate perturba circuitele de semnalizare sau de telecontrol.

Dacă se ia  $\frac{f_0}{f} < \frac{1}{3}$  și se înlocuiește în relația (14) știind că amplitudinea maximă a ondularii se obține pentru  $\tilde{\sigma} = 0,5$  rezultă:

$$(\Delta I_1)_{\max.} = \frac{I_m \cdot T^2}{32 L_t C_e} \quad (16) \quad [35]$$

Deci pentru aceeași ondulare a curenților, valoarea inductanței  $L_e$  va fi cu atât mai mică cu cât frecvența de reglare va fi mai mare.

#### 3.5.4. Influența frecvenței asupra instalațiilor de telecomunicații și de semnalizare [13],[40],[55],[56],[75]

Este ușor de înțeles că și din acest punct de vedere schemele de comandă prin lățimea impulsurilor sînt mai avantajoase.

În toate cazurile, estimarea efectului perturbator asupra instalațiilor de semnalizare și de telecomunicații este dificilă deoarece redresoarele produc armonici care sînt multiplii ale frecvenței rețelei trifazate de alimentare. Deoarece majoritatea redresoarelor folosite în tracțiunea electrică urbană sînt hexapulsative, pentru frecvența rețelei de 50 Hz rezultă în rețeaua de curent continuu armonica de  $50 \times 6 = 300$  Hz,  $50 \times 12 = 600$  Hz,  $50 \times 18 = 900$  Hz. etc.

Pentru a obține cele mai mici tensiuni necesare la pornire și la frînare, este necesar să se reducă frecvența de lucru a variatorului deoarece s-a arătat anterior că nu poate fi redus sub o anumită limită. Această frecvență

nu se alege la întâmplare ci se obține prin divizarea frecvenței de bază. Fie  $\frac{f}{P}$  noua valoare a frecvenței de funcționare a unui variator. Dacă vehiculul comportă  $K$  variatoare decalate din punct de vedere al comenzii, în curentul de linie vor apare armonici cu frecvența  $\frac{kf}{P}$  și multiplii acesteia.

Datorită dezechilibrelor de curent, inevitabile între variatoare, în descompunerea formei de undă a curentului va apare și frecvența  $\frac{f}{P}$  și armonicile sale.

Rezultă deci că în cazul comenzii decalate curentul din linie va conține pe lângă armonicile produse de stațiile de redresare și frecvențele datorate funcționării variatoarelor  $\frac{kf}{P}$ ,  $2k \frac{f}{P}$ ,  $3k \frac{f}{P}$  etc. (armonicile  $aI^a$ ,  $aII^a$ ,  $aIII^a$ , etc. ale frecvenței rezultante intercalate),  $\frac{f}{P}$ ,  $2 \frac{f}{P}$ ,  $3 \frac{f}{P}$  etc. (armonicile  $aI^a$ ,  $aII^a$ ,  $aIII^a$ , etc. ale frecvenței divizate).

Din punct de vedere al influenței asupra instalațiilor de telecomunicații este convenabil să se aleagă frecvențele de pornire pentru care termenii  $K \frac{f}{P}$  și  $\frac{f}{P}$  ca și armonicile lor să nu coincidă cu frecvența utilizată în instalațiile respective. Din practică s-a constatat că alegerea divizorilor 27, 9, 3 răspunde acestor condiții.

Un caz particular îl constituie influența frecvenței de 50 Hz care se găsește în curentul din linie asupra circuitelor de semnalizare în curent alternativ de 50 Hz. Din acest punct de vedere pentru filtrul de intrare se impune o valoare limită maximă a impedanței la frecvența de 50 Hz inclusiv pentru cazul când vehiculul se găsește lângă stația de alimentare (inductanța liniei, minima). Problema poate fi rezolvată fie prin dimensionarea filtrului de intrare pentru o frecvență proprie mai mică sau mai mare de 50 Hz, fie prin instalarea pe vehicul a unui filtru de intrare suplimentar care să aibă o impedanță suficient de mare pentru frecvența de 50 Hz. Dimensionarea filtrului pentru frecvența propriei mai mici de 50 Hz este neeconomică și conduce la gabarite mari ale filtrului.

Dimensionarea filtrului pentru frecvențe proprii mai mari de 50 Hz prezintă inconvenientul că trebuie să se aleagă o frecven

prea mare de lucru a variatorului. Ultima soluție pare cea mai avantajoasă mai ales pentru puteri nu prea mari.

Din cele prezentate se trage concluzia că alegerea frecvenței de lucru a variatorului rezultă ca un compromis între imperativele variatorului, ale sarcinii, ale sursei de alimentare și ale altor instalații electronice a căror funcționare poate fi perturbată și cele legate de dimensiunile și prețul celulei filtrului de intrare.

O soluție foarte interesantă a problemei de alegere a frecvenței este folosirea comenzii decalate. Aceasta constă în utilizarea a două sau mai multe variatoare care funcționează la aceeași frecvență dar la care comenzile sînt decalate în mod judicios.

Schemele sînt diferite pentru cazul vehiculelor cu un singur motor față de cel al vehiculelor cu două sau mai multe motoare.

În fig.19 se prezintă schema comenzii decalate în cazul unui singur motor de tracțiune [60].

Bobina de absorbție  $L_g$  care lucrează în regim nesaturat joacă rol de divizor de tensiune, potențialul punctului D fiind menținut la mijlocul diferenței de potențial dintre punctele A și B. Cele două variatoare funcționează cu aceeași frecvență dar sînt comandate defazat unul față de celălalt cu o semiperioadă. Variația în timp a tensiunilor între punctele AB și BC reprezintă forma cunoscută a tensiunii de ieșire a variatoarelor de tensiune continuă componente. Tensiunea de ieșire a schemei compuse va fi menținută de bobină la valoarea medie între tensiunile  $U_{AC}$  și  $U_{BC}$ . Frecvența curentului în linia de contact și în sarcină este egală cu dublul frecvenței de lucru a unui variator.

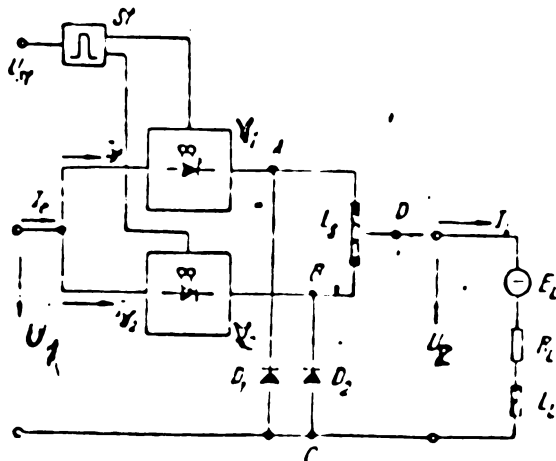


Fig.19 - Schema de principiu a comenzii decalate în cazul unui singur motor de tracțiune.

În cazul unui vehicul cu două sau mai multe motoare [60] (fig.20) fiecare motor este alimentat prin câte un variator de tensiune continuă. Dacă frecvența de lucru a variatorului este identică iar duratele lor de conducție sînt egale, dar decalate în timp cu  $\frac{T}{K}$  mărimile de intrare ( $I_1$  și  $U_{ce}$ ) vor oscila cu frecvența  $K.f$ . În această situație

$$(\Delta U_{ce})_{max.} = \frac{I_m \cdot T}{4 K C_e} \quad ; \quad I_1 = K \int I_m$$

și amplitudinile maxime se obține pentru  $\delta = 1/2K, 3/2K, etc.$

Rezultă că pentru o aceeași ondulare, schema cu  $K$  motoare acționate individual prin variator de tensiune continuă comandat decalat cu  $\frac{T}{K}$  față de celelalte variatoare conduce la o scădere a valorii capacității și inductanței filtrului de  $k$  ori

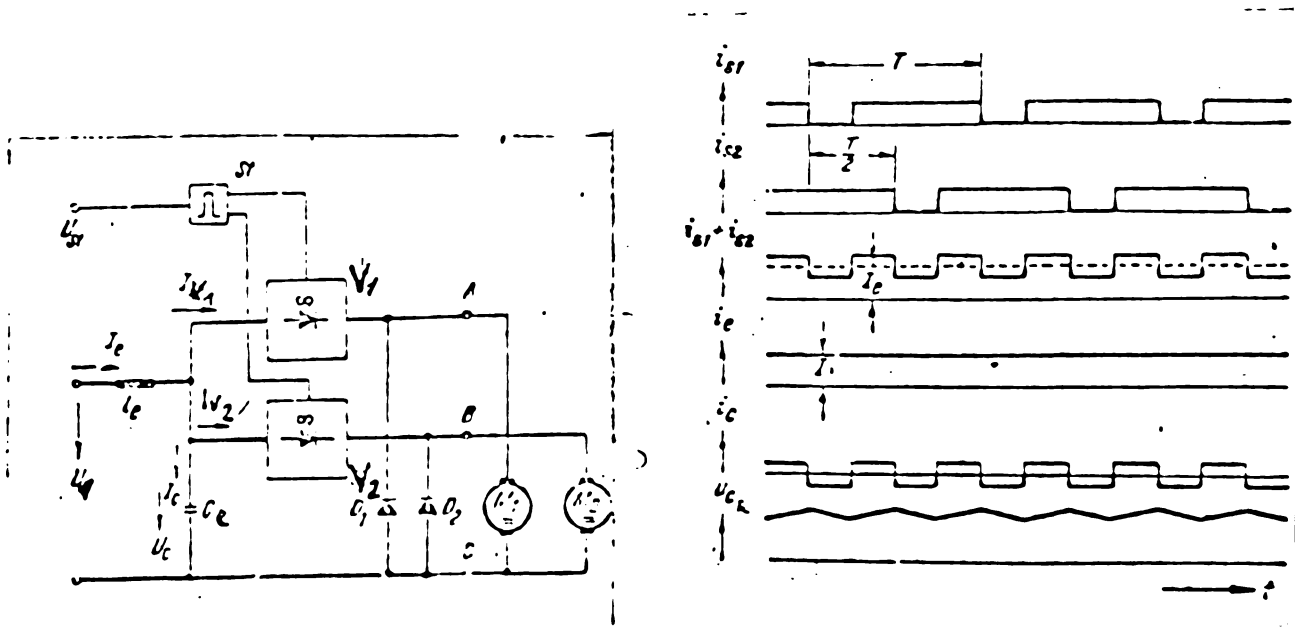


Fig.20 - Schema de principiu a comenzii decalate cu două variatoare de tensiune continuă în cazul unui vehicul cu două sau mai multe motoare.

### 3.6. Condiții pentru asigurarea continuității funcționării schemelor cu variator

Curentul de încărcare a condensatorului filtrului de intrare, poate provoca deolângarea întrerupătorului automat dacă

nu se asigură o reducere a raportului  $\frac{di}{dt}$ . Acest lucru se realizează pe de o parte conectînd inductanța filtrului de intrare înaintea condensatorului și pe de altă parte prin intercalarea unei rezistențe de preanclanșare imediat după întrerupător, rezistență care se scurtcircuitează imediat după încărcarea condensatorului. Rezistența de preanclanșare este indicată atuncînd cînd pentru limitarea raportului menționat mai sus ar fi necesar supradimensionarea inductanței filtrului.

Intreruperea alimentării variatorului fie ca urmare a declanșării întrerupătorului automat fie datorită unui contact necorespunzător între captator și linia de contact sau între roată și gîină fie la trecerile prin macaze perturbă buna funcționare a variatorului. Este știut faptul că stingerea tiristorului principal al variatorului se poate produce numai dacă condensatorul de stingere este încărcat la o tensiune cu o anumită polaritate. În caz contrar tiristorul rămîne aprins și curentul prin sarcina va crește similar unui scurtcircuit. Deci pentru buna funcționare a variatoarelor este necesar ca la bornele lor să fie asigurată în permanență o tensiune minimă. Acest lucru se realizează printr-un dispozitiv de control al tensiunii de alimentare care să blocheze impulsurile tiristorului principal la scăderea tensiunii sub limita admisă.

CAPITOLUL 4. CONTRIBUTII PRIVIND STUDIUL PORNIRII  
MODIFICARII TURATIEI SI FRINARII ELECTRICE A MOTOA-  
RELOR DE CURENT CONTINUU CU EXCITATIE SERIE COMAN-  
DATE PRIN VARIATOR DE TENSIUNE CONTINUA.

4.1. Studiul pornirii motorului.

Pornirea motorului serie de curent continuu folosind variatorul de tensiune continuă poate fi realizată ca și în schemele clasice tensiunea la bornele motorului fiind modificată conform schemelor din fig.21 și 22.

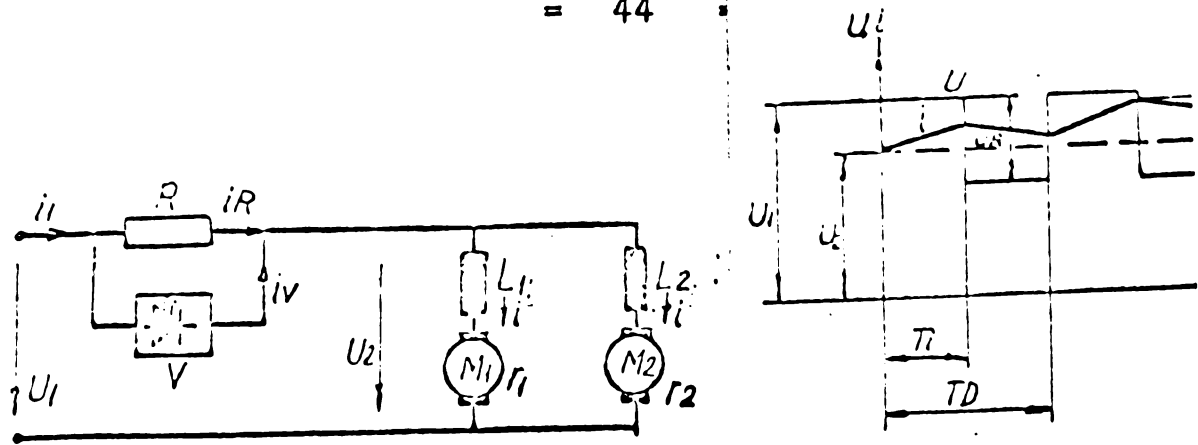


Fig.21 - Pornirea motorului de curent continuu cu excitație serie prin comandă prin impulsuri a valorii rezistenței.

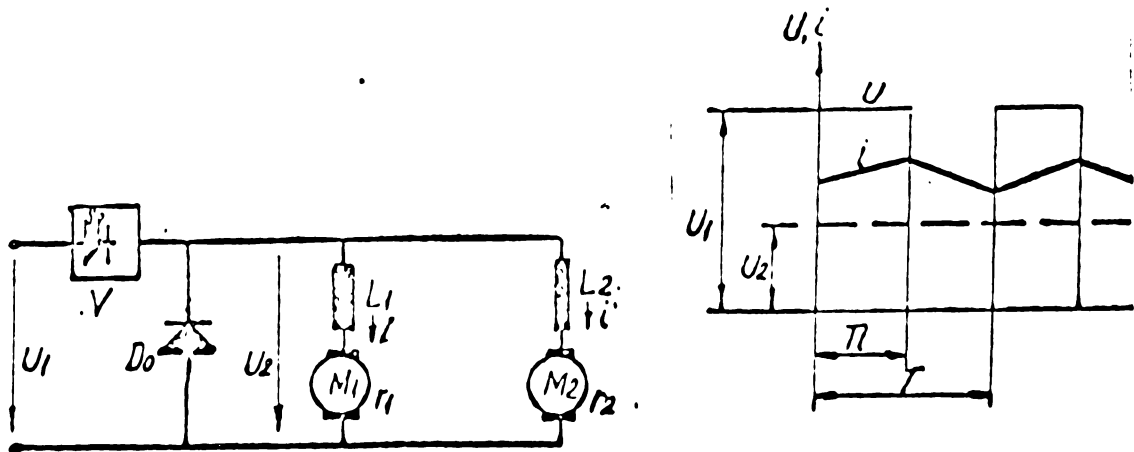


Fig.22 - Pornirea motorului de curent continuu cu excitație serie prin comandă prin impulsuri a tensiunii de alimentare a motorului.

În schema din fig.21 modificarea valorii tensiunii la bornele motorului se realizează prin variația continuă a rezistenței de pornire  $R$  înseriată în circuitul motorului.

Variația tensiunii la bornele motorului și a curentului prin motor într-o perioadă de reglare în ipoteza  $T \ll \frac{L}{r}$

este prezentată în fig.23

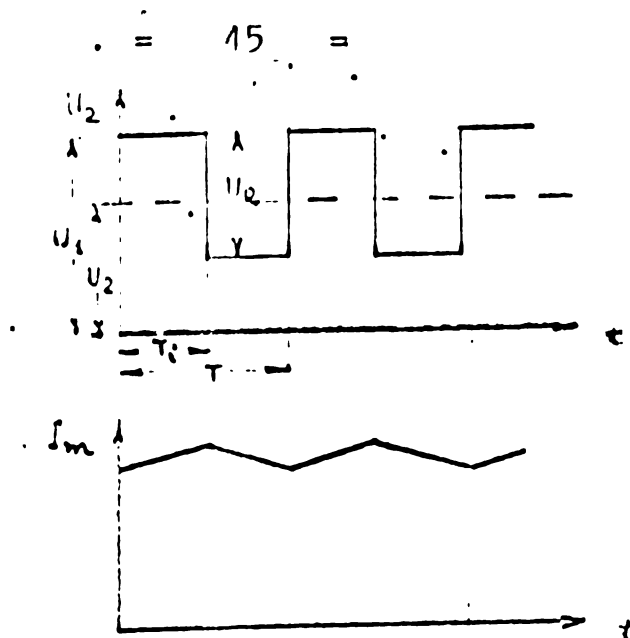


Fig.23 - Variația tensiunii la bornele motorului și a curentului prin motor în perioada pornirii cu schema din fig.21.

Intr-o perioadă de reglare tensiunea medie la bornele motorului este dată de relația:

$$U_2 = U_1 - (1 - \alpha) R I_m \quad (17)$$

$I_m$  fiind valoarea medie a curentului prin motor.

Variația curentului prin motor datorită funcționării variatorului este dată de relațiile:

- pentru cazul când variatorul conduce ( $0 \leq t \leq T_i$ )

$$U_1 = E + i_1 r + L \frac{di_1}{dt} \quad (18)$$

- pentru cazul când variatorul este blocat ( $T_i \leq t \leq T$ )

$$U_1 = E + (r + R) i_2 + L \frac{di_2}{dt} \quad (19)$$

Din relațiile (18), (19) se determină legea de creștere, respectiv de scădere a curentului de pornire într-o perioadă de reglare.

$$i_1 = \frac{U_1 - E}{r} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) + I_{\min} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (20)$$

$$i_2 = \frac{U_1 - E}{r + R} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) + I_{\max} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (21)$$

unde:

$U_1$  - tensiunea sursei de alimentare

$E$  - t.e.m. a motorului

$r$  - rezistența înfășurărilor motorului

R - rezistența de pornire

$$\tau_1 = \frac{L}{r}$$

$$\tau_2 = \frac{L}{r + R}$$

$I_{max.}, I_{min.}$  - limitele între care variază curentul de pornire.

Tinând seama de faptul că la  $t = T$   $i = I_{min.}$

$i_1 = I_{max.}$  iar la  $t = T$ ,  $i_2 = I_{min.}$ , se pot determina valorile

$I_{min.}, I_{max.}$

$$I_{max.} = \frac{U_1 - E}{r} (1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}}) + I_{min.} e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}} \quad (22)$$

$$I_{min.} = \frac{U_1 - E}{r + R} (1 - e^{-\frac{1-\delta}{\tau_2} T}) + I_{max.} e^{-\frac{1-\delta}{\tau_2} T} \quad (23)$$

care conduc la

$$I_{max.} = \frac{\frac{U_1 - E}{r} (1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}}) + \frac{U_1 - E}{r + R} e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}} (1 - e^{-\frac{1-\delta}{\tau_2} T})}{1 - e^{-\frac{1-\delta}{\tau_2} T} \cdot e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}}} \quad (2)$$

$$I_{min.} = \frac{\frac{U_1 - E}{r} e^{-\frac{1-\delta}{\tau_2} T} (1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}}) + \frac{U_1 - E}{r + R} (1 - e^{-\frac{1-\delta}{\tau_2} T})}{1 - e^{-\frac{1-\delta}{\tau_2} T} \cdot e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}}} \quad (2)$$

Din aceste relații se pot determina, pentru circuitul dat, variația raportului cîrcii  $\delta$  în funcție de t.e.m. respectiv, de turația motorului. Știind că în perioada pornirii, motorul funcționează pe porțiunea saturată a caracteristicii de magnetizare se poate considera  $E = K n$  și

$$I_{max.} = \frac{\frac{U_1 - Kn}{r} (1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}}) + \frac{U_1 - Kn}{r + R} e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}} (1 - e^{-\frac{1-\delta}{\tau_2} T})}{1 - e^{-\frac{1-\delta}{\tau_2} T} \cdot e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}}} \quad (26)$$

...//...



= 47 =

$$I_{\min.} = \frac{\frac{U_1 - k n}{r} (1 - e^{-\frac{dT}{z_1}}) e^{-\frac{t-dT}{z_2}} + \frac{U_1 - k n}{r + R} (1 - e^{-\frac{t-dT}{z_2}})}{1 - e^{-\frac{t-dT}{z_2}} \cdot e^{-\frac{dT}{z_1}}} \quad (27)$$

Curentul mediu de pornire este dat de relația:

$$I_m = \frac{1}{T} \left\{ \left[ \int_0^{\delta T} \frac{U_1 - k n}{r} (1 - e^{-\frac{t}{z_1}}) + I_{\min} e^{-\frac{t}{z_1}} \right] dt + \right. \\ \left. + \left[ \int_0^{(1-\delta)T} \frac{U_1 - k n}{r + R} (1 - e^{-\frac{t}{z_2}}) + I_{\max} e^{-\frac{t}{z_2}} \right] dt \right\} \quad (28)$$

care conduce la expresia

$$I_m = \frac{1}{T} \left\{ \frac{U_1 - k n}{r} \left[ \delta T - z_1 (1 - e^{-\frac{\delta T}{z_1}}) + \frac{U_1 - k n}{r + R} \left[ (1 - \delta) T - z_2 (1 - e^{-\frac{(1-\delta)T}{z_2}}) \right] + \right. \right. \\ \left. \left. + z_1 I_{\min} (1 - e^{-\frac{\delta T}{z_1}}) + z_2 I_{\max} (1 - e^{-\frac{(1-\delta)T}{z_2}}) \right] \right\} \quad (29)$$

Se poate considera că în timpul pornirii curentul prin motor poate fi asimilat cu un curent continuu avînd valoarea  $I_m$ . În acest condiții:

$$U_1 = E + I_m r + (1 - \delta) R \quad (30)$$

din (30) rezultă:

$$n = \frac{U_1}{K_e \phi} - \frac{I_m r + (1 - \delta) R}{K_e \phi} \quad (31)$$

La începutul perioadei de pornire, pentru a asigura în circuit o rezistență care să limiteze curentul la valoarea prescrisă, variatorul lucrează cu durata relativă de conducție scăzută.

Pe măsură ce motorul se accelerează durata relativă de conducție crește astfel că la  $\delta = 1$  motorul funcționează pe caracteristica mecanică naturală.

Caracteristicile mecanice artificiale ce se obțin sînt asemănătoare cu cele de la metoda clasică de pornire cu reostat cu deosebirea că durata relativă de conducție poate fi modificată continuu de la zero la unu astfel că aceste caracteristici cuprind întregul domeniu dintre caracteristica

...//...

artificială corespunzătoare la  $\delta = 0$  și caracteristica mecanică naturală (fig.24)

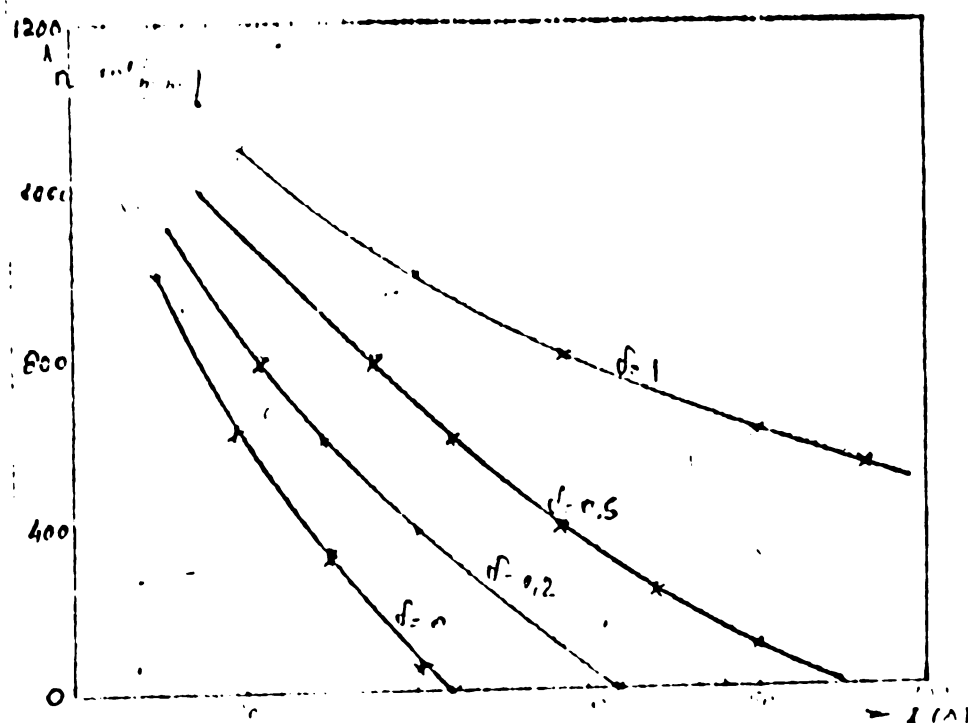


Fig.24 - Caracteristicile mecanice ale motorului în cazul schemei din fig.21 determinate prin calcul pe baza relației (31).

În felul acesta, forța de tracțiune nu mai variază în salturi ca să apară smucituri cu repercusiuni negative atât privind utilizarea aderenței cât și privind confortul.

Schema din fig.22 realizează pornirea motorului de tracțiune modificând continuu tensiunea la bornele motorului prin înscrierea variatorului în circuitul de alimentare al acionării. Așa cum se observă din figură, schema conține în plus dioda  $D_0$  care asigură continuitatea trecerii curentului prin motor în perioada când variatorul este blocat.

Și de această dată, pornind de la relațiile de echilibru al tensiunilor se obțin ecuațiile care exprimă legile de variație a curentului prin motor în cele două perioade de lucru al variatorului.

$$U_1 = E + r i_1 + L \frac{d i_1}{d t} \quad (0 \leq t \leq T_1) \quad (31)$$

$$0 = E + r i_1 + L \frac{d i_1}{d t} \quad (T_1 \leq t \leq T) \quad (33)$$

...//...

In condițiile motorului saturat rezultă:

$$i_1 = \frac{U_1 - K\eta}{r} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) + I_{\min.} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (34)$$

$$i_2 = -\frac{K\eta}{r} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) + I_{\max.} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (35)$$

Știind că la  $t = \delta T$ ,  $i_1 = I_{\max.}$  iar la  $t = (1 - \delta) T$ ,  $i_2 = I_{\min.}$  se găsesc expresiile pentru limitele de variație a curentului de pornire.

$$I_{\max.} = \frac{1}{r} \left[ U_1 \frac{1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau_1}}} - K\eta \right] \quad (36)$$

$$I_{\min.} = \frac{1}{r} \left[ U_1 \frac{e^{\frac{(1-\delta)T}{\tau_1}} (1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}})}{1 - e^{-\frac{T}{\tau_1}}} - K\eta \right] \quad (37)$$

Valoarea medie a curentului prin motor va fi dată de relația:

$$I_m = \frac{1}{T} \left\{ \int_0^{\delta T} \frac{U_1 - K\eta}{r} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) + I_{\min.} e^{-\frac{t}{\tau_1}} dt + \int_0^{(1-\delta)T} -\frac{K\eta}{r} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) + I_{\max.} e^{-\frac{t}{\tau_1}} dt \right\} \quad (38)$$

care conduce la:

$$I_m = \frac{1}{T} \left\{ \frac{U_1 - K\eta}{r} [\delta T - \tau_1 (1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}})] - \frac{K\eta}{r} [(1-\delta)T - \tau_1 (1 - e^{-\frac{(1-\delta)T}{\tau_1}})] + \tau_1 I_{\min.} (1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}}) + \tau_1 I_{\max.} (1 - e^{-\frac{(1-\delta)T}{\tau_1}}) \right\} \quad (39)$$

Pe baza considerentelor formulate anterior poate fi scrisă relația :

$$U_1 = E + r I_m \quad (40)$$

din care rezultă

$$n = \frac{U_1}{K_e \phi} - \frac{I_m r}{K_e \phi} \quad (41)$$

...//...

Caracteristicile mecanice pentru diferite valori ale duratei relative de conducție  $\delta$  sînt prezentate în fig.25.

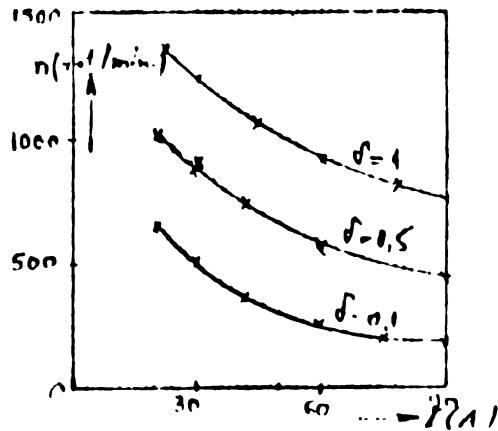


Fig.25 - Caracteristicile mecanice ale motorului în cazul schemei din fig.22 determinate prin calcul pe bază relației (41)

Și în acest caz sînt eliminate șocurile forței de tracțiune.

Este evident că această schemă prezintă avantajul că pornirea se realizează fără pierderi de energie, lipsind rezistența de pornire.

În schema de pornire cu rezistență pierderile de energie în rezistență în intervalul de timp  $dt$  vor fi date de relația

$$W_p = (1 - \delta) R I_m^2 dt \quad (42)$$

Pe toată durata procesului de pornire energia disipată în rezistența de pornire va fi

$$W_f = (1 - \delta) R I_m^2 dt = R I_m^2 t_p - R I_m^2 \int_0^{t_p} \delta(t) dt \quad (43)$$

Se observă că pentru aceleași condiții de pornire pierderile de energie în rezistența de pornire în cazul folosirii variatorului sînt mai reduse decît în cazul pornirii conform metodei clasice cu reostat de pornire.

Comparînd schemele de pornire din fig.21, 22 rezultă că pe lîngă dezavantajele introducerii unor pierderi suplimentare

și a îngustării domeniului de comandă, prima schemă prezentă și două avantaje importante și anume: inductanța conductorilor de legătură, care poate atinge valori mari în cazul tramvaiului, nu perturbă în nici un fel funcționarea variatorului; tensiunea pe întrerupătorul electronic nu poate depăși produsul dintre curentul de sarcină în momentul întreruperii ( $I_{max}$ ) și rezistența în paralel.

#### 4.2. Studiul modificării turației motorului

Modificarea turației motorului de curent continuu cu excitație serie folosind schema cu variator poate fi realizată prin variația tensiunii la bornele motorului și prin slăbirea fluxului.

Modificarea turației prin variația tensiunii la bornele motorului se realizează cu scheme asemănătoare cu cele prezentate în fig.21, 22. Din considerente economice se recomandă schema fără pierderi,

Din relația (41) se observă că funcționarea motorului la turația constantă și în condițiile unei sarcini constante presupune menținerea constantă a raportului ciclic. Variația sarcinii atrage după sine modificarea lui respectiv mutarea punctului de funcționare a motorului pe altă caracteristică mecanică.

Tinând seama de faptul că în funcționarea normală gradul de saturație al motorului este mai redus decât la pornire, este necesară liniarizarea caracteristicii de magnetizare (fig.31). În aceste condiții expresia t.e.m. devine

$$E = an + bn I_m \quad (44)$$

$I_m$  fiind valoarea medie a curentului de sarcină.

Variația curentului prin motor în cele două perioade de lucru ale variatorului în baza relațiilor (32) (33) va fi

$$i_1 = \frac{U_1 - an}{r + bn} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) + I_{min.} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (45)$$

pentru  $0 \leq t \leq \delta_T$

$$i_2 = - \frac{a n}{r + b n} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) + I_{\max.} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (46)$$

pentru  $\delta T \leq t \leq T$

Valoarea medie a curentului de sarcină va fi dată de relația

$$I_m = \frac{1}{T} \quad (47)$$

$$\tau_1 = \tau_2 = \frac{L}{r + b n}$$

Se observă că gradul de saturație influențează rapiditatea desfășurării proceselor de variație a curentilor în circuit.

Pentru modificarea turației prin slăbirea cîmpului se pot folosi mai multe variante de scheme.

Schema prezentată în fig.26 se caracterizează prin faptul că variatorul este conectat în paralel cu înfășurarea de excitație a cărei inductanță poate fi variată în mod continuu conform relației

$$L_e f = (1 - \delta) L_e \quad (48)$$

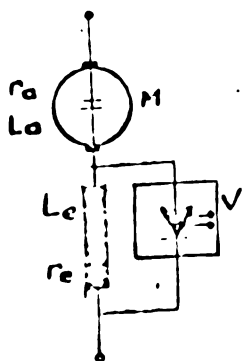


Fig.26 - Slăbirea cîmpului motorului prin conectarea variatorului în paralel cu înfășurarea de excitație.

La folosirea acestei scheme trebuie să se aibă în vedere mențiunile făcute în 3.3.3. privind efectul inductanței.

Dacă se notează cu  $r_a$ ,  $L_a$  rezistența, respectiv inductanța înfășurării rotorice și cu  $r_e$ ,  $L_e$  rezistența, respectiv inductanța înfășurării de excitație, atunci echilibrul tensiunilor

În circuit este caracterizat prin relațiile

$$U_1 = r_a i + L_a \frac{di}{dt} + E \quad (0 \leq t \leq \delta T) \quad (49)$$

$$U_1 = r i + L \frac{di}{dt} + E \quad (\delta T \leq t \leq T) \quad (50)$$

unde:

$$r = r_a + r_e$$

$$L = L_a + L_e$$

$$E = a_n + b_n i$$

Rezultă următoarele relații de variație a curentului

$$i_1 = \frac{U_1 - E}{r_a} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) + I_{\min.} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (0 \leq t < \delta T) \quad (51)$$

$$i_2 = \frac{U_1 - E}{r} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) + I_{\max.} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (\delta T \leq t \leq T) \quad (52)$$

Curentul mediu prin motor este dat de relația

$$I_{rot} = \frac{1}{T} \left\{ \frac{U_1 - E}{r_a} \left[ \delta T - \tau_1 (1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}}) \right] + \frac{U_1 - E}{r} \left[ (1 - \delta) T - \tau_2 (1 - e^{-\frac{(1-\delta)T}{\tau_2}}) \right] + \tau_1 I_{\min.} (1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}}) + \tau_2 I_{\max.} (1 - e^{-\frac{(1-\delta)T}{\tau_2}}) \right\} \quad (53)$$

unde  $\tau_1 = \frac{L_a}{r_a}$

$$\tau_2 = \frac{L}{r}$$

Fluxul motorului va fi dat de relația

$$\phi = (1 - \delta) I_e I_e \quad (54)$$

deoarece  $T < \frac{L_e}{r_e}$  curentul din înfășurarea de excitație nu se anulează decât la  $\delta = 1$ ; această situație trebuie evitată fie prin schema de comandă care nu permite creșterea valorii lui  $\delta$  peste o anumită valoare (aceasta poate fi stabilită în funcție de cuplul de sarcină) fie prin alegerea unei scheme adecvate de conectare a variatorului în circuitul de șuntare.

In [18] este analizată o schemă asemănătoare schemei clasice de slăbire a cîmpului variatorului fiind conectat la bornele rezistenței de șuntare (fig.27).

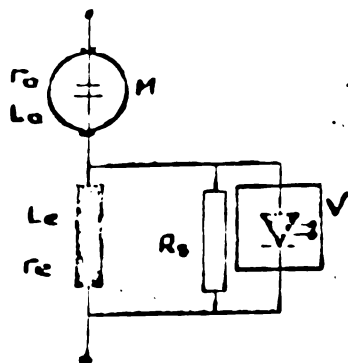


Fig.27 - Slăbirea cîmpului prin comanda prin impulsuri a valorii rezistenței de șuntare.

Rezistența de șuntare  $R_g$  se alege în funcție de valoarea inițială admisibilă a coeficientului de subexcitare și de tensiunea maximă admisibilă pe tiristorul principal care corespunde valorii maxime a curentului rotoric și valorii minime a coeficientului de subexcitare  $\alpha_{min}$ .

Valoarea medie a tensiunii la bornele înfășurării de excitație este dată de relația

$$U_e = I_e r_e \quad (55)$$

dar  $I_e = \alpha I_{rot.}$  (56)

deci  $U_e = \alpha I_{rot.} r_e$  (57)

Se știe însă că

$$\alpha = \frac{R_g}{r_e + R_g} \quad (58)$$

Însă rezistența echivalentă de șuntare este dată de relația

$$R_{ge} = (1 - \alpha) R_g \quad (59)$$

care conduce la relația

$$\alpha = \frac{R_g}{\frac{r_e}{1 - \alpha} + R_g} \quad (60)$$

...//...



Din (60) rezultă

$$r_e = \frac{1}{\alpha} R_g (1 - \delta) (1 - \alpha) \quad (61)$$

care introdusă în (57) conduce la

$$U_e = I_{rot.} R_g (1 - \alpha) (1 - \delta) \quad (62)$$

Din (62) se poate stabili legea de variație a duratei relative de conducție în funcție de coeficientul de sub-excitate

$$\delta = 1 - \frac{r_e \cdot \alpha}{R_g (1 - \alpha)} \quad (63)$$

În rezistența de gîntare au loc pierderi de energie a căror valoare într-o perioadă de reglare este dată de relația

$$W_{R_g} = \int_0^T I_{R_g}^2 R_g dt \quad (64)$$

Dar

$$I_{R_g} = I_{rot.} (1 - \alpha) \quad (65)$$

și

$$R_g = \frac{r_e \alpha}{(1 - \alpha) (1 - \delta)} \quad (66)$$

Introducînd (65) (66) în (64) rezultă

$$W_{R_g} = \int_0^T I_{rot.}^2 \frac{\alpha (1 - \alpha)}{1 - \delta} r_e dt \quad (67)$$

În relațiile de mai sus  $\alpha$  reprezintă un parametru care variază în timp, mărimea lui fiind determinată de mărimea vitezei în fiecare moment care se comandă prin raportul ciclic  $\delta$ .

Valoarea medie a curentului prin rotor este dată de relația

$$I_{rot. m} = \frac{1}{T} \left\{ \frac{U_1 - E}{r_a} \left[ \delta T - \tau_1 (1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}}) \right] + \frac{U_1 - E}{r_a + r_e} \left[ (1 - \delta) T - \tau_2 (1 - e^{-\frac{(1 - \delta) T}{\tau_2}}) \right] + \tau_1 I_{min} (1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}}) + \tau_2 I_{min} (1 - e^{-\frac{(1 - \delta) T}{\tau_2}}) \right\} \quad (68)$$

$$\text{unde } \zeta_1 = \frac{L_a}{r_a}$$

$$\zeta_2 = \frac{L_a + L_e}{r_a + r_e}$$

Este cunoscut faptul că slăbirea cîmpului la motoarele de curent continuu cu excitație serie nu poate fi făcută pînă la valori mai mici de 20 - 25 %. În aceste condiții durata relativă de conducție nu poate depăși valoarea 0,8.

S.N.C.F. a realizat o schemă de acționare la care slăbirea de cîmp se realizează elegant cu ajutorul unui montaj simplu [36]. Schema este prezentată în fig. 28.

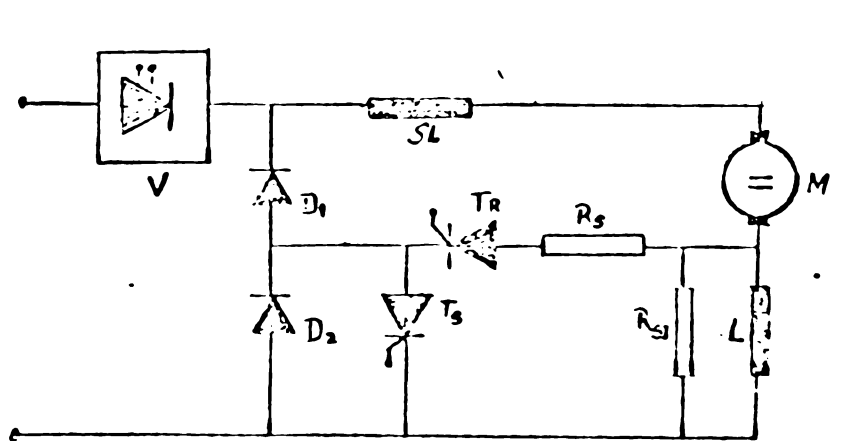


Fig. 28 - Schemă pentru slăbirea cîmpului folosită de S.N.C.F.

În funcționare normală tiristoarele  $T_R$ ,  $T_S$  sînt blocate, motorul funcționează la cîmp plin.

Cînd se comandă șuntarea excitației tiristorul principal este în conducție. Se excită tiristorul  $T_R$  și se reglează cîmpul cu ajutorul tiristorului  $T_S$ . Schema funcționează astfel:

- Tiristorul principal aprins,  $T_R$  stins. Curentul din indus circulă prin înfășurarea de excitație și prin rezistența  $R_{sp}$ .

- Tiristorul principal aprins  $T_g$  aprins. Curentul circulă prin  $R_S$ ,  $T_R$  și  $T_S$ , excitația este șuntată prin rezistențele  $R_{SP}$  și  $R_S$ .

- Tiristorul principal stins. Curentul indusului se închide prin  $D_1$ ,  $D_2$  permițând blocarea lui  $T_g$ .

Se poate folosi și șuntajul independent când variatorul este legat în paralel cu înfășurarea de excitație și cu rezistența de șuntaj permanent. Se asigură un reglaj continuu și suplu.

În [3] este tratată pe larg problema utilizării variatorului de tensiune continuă la modificarea vitezei motorului de tracțiune de pe locomotiva Diesel-electrică.

Analizînd sub toate aspectele această problemă în cazul tramvaiului am ajuns la următoarele concluzii:

1. Slăbirea cîmpului în cazul motoarelor de tracțiune nu poate să depășească 20-25 % din considerente tehnice. În aceste condiții variatorul utilizat pentru slăbirea de cîmp trebuie să aibă o construcție specială cu o gamă mai restrînsă de reglare care să nu permită funcționarea cu durată relativă de conducție mai mari de 0,75 - 0,8. Rezultă că o schemă de acționare cu variator trebuie să conțină unul sau mai multe variatoare pentru modificarea tensiunii la bornele motoarelor de tracțiune și cîte un variator pentru slăbirea cîmpului la fiecare motor. Asemenea scheme s-au utilizat de către societățile de transporturi din Chicago și San Francisco [95].

2. Utilizarea unui variator de tensiune continuă pentru slăbirea cîmpului în cazul tramvaiului la noi în țară nu se justifică din punct de vedere economic avînd în vedere că un asemenea echipament este destul de costisitor iar funcționarea motorului în regim de cîmp slăbit este sporadică. Condensatoarele de stingere din schemele acestor variatoare fiind alimentate la tensiuni mici (corespunzătoare căderilor de tensiune de pe înfășurările de excitație ale motoarelor) trebuie să aibă capacități ridicate.

3. Marea majoritate a schemelor cu variator realizate pentru acționarea electrică a tramvaiului sau a trenurilor suburbane folosesc sistemul clasic de slăbire a cîmpului în trepte cu contactoare numărul treptelor variind de la un constructor la altul. Astfel firmele ACEC, Siemens și Škoda folosesc o singură treaptă, firma Westinghouse nu folosește de loc slăbirea de timp în cazul trenului cu variator [93] iar la tramvaiul Timiș 1 comandat prin variator slăbirea de cîmp se realizează în două trepte cu contactoare.

4. În etapa actuală întreprinderile de transport în comun urban din țara noastră nu manifestă interes pentru scheme cu variator în circuitul de slăbire a cîmpului optînd pentru soluția clasică de slăbire a cîmpului cu contactoare.

#### 4.3 Studiul frînării electrice a motorului

##### 4.3.1. Frînarea reostatică

Este cunoscut faptul că în schemele clasice frînarea reostatică se realizează de regulă în regim de generator autoexcitat care debitează pe o rezistență a cărei valoare se micșorează treptat pe măsura scăderii turației.

În schemele cu variator frînarea reostatică poate fi realizată în același mod ca cel descris mai sus cu deosebirea că rezistența de frînare este variată continuu cu ajutorul variatorului de la valoarea maximă pînă la valoarea zero.

Schema de frînare reostatică cu variator este prezentată în fig.29.

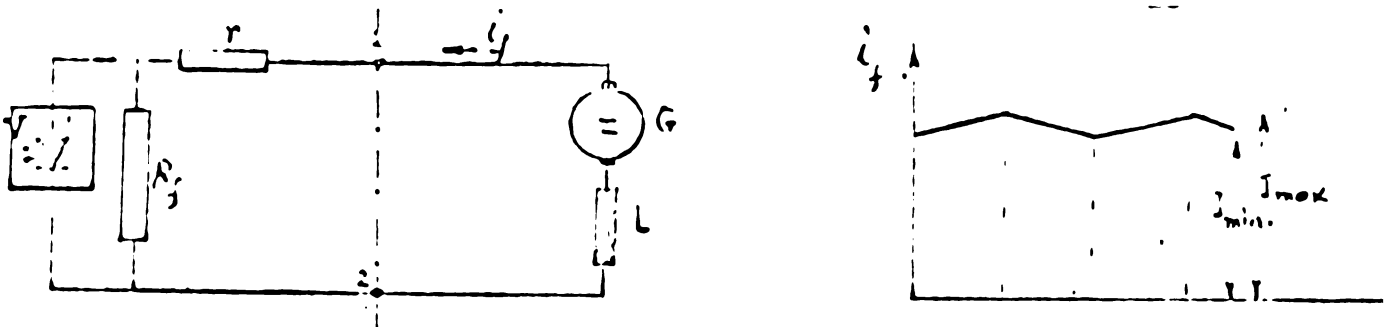


Fig.29 - Schema de principiu a frînării reostatice.

Pentru studiul procesului de frânare schema poate fi asimilată cu doi dipoli având bornele comune 1 2 : Dipolul activ constituit din motorul de tracțiune funcționând în regim de generator și dipolul pasiv constituit din rezistențele ce se găsesc în circuit.

Scriind relațiile tensiunilor la bornele fiecărui dipol în decursul unei perioade de reglare se obține:

- Pentru dipolul activ:

$$U_{12}^{(1)} = K_e \phi n - L \frac{d i_f}{d t} \quad (69)$$

- Pentru dipolul pasiv în decursul unei perioade de reglare

$$U_{12}^{(2)} = i_f r + (1 - \delta) R_f \quad (70)$$

Condiția de funcționare stabilă este dată de egalitatea

$$U_{12}^{(1)} = U_{12}^{(2)} \quad \text{adică}$$

$$K_e \phi n - L \frac{d i_f}{d t} = i_f r + (1 - \delta) R_f \quad (71)$$

sau

$$L \frac{d i_f}{d t} = K_e \phi n - i_f r + (1 - \delta) R_f \quad (72)$$

În regim de impulsuri termenul  $L \frac{di}{dt}$  are o variație rapidă determinând un transfer permanent de energie dinspre dipolul activ spre dipolul pasiv chiar la turații mici ale motorului.

Reprezentînd grafic în planul  $U, I_f$  termenii din partea dreaptă a relației (72) se obțin curbele din fig.30.

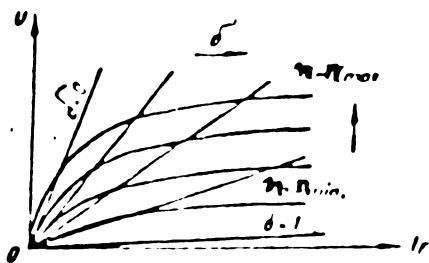


Fig.30 - Influența raportului ciclic asupra înclinației

Se observă influența raportului ciclic  $\delta$  asupra înclinării dreptei de sarcină.

Din figură rezultă :

a) Pentru o anumită valoare a raportului ciclic curentul de frînare este cu atît mai mare cu cît turația motorului este mai mare.

b) Turația minimă pînă la care motorul poate fi frînat corespunde valorii  $\delta = \delta_{\max}$ .

c) Turația motorului poate fi variată continuu de la valoarea maximă, la valoarea minimă impusă de aderență la o valoare constantă a curentului de frînare variind valoarea raportului ciclic.

d) Frînarea motorului în domeniul turațiilor scăzute se realizează la valori mari ale lui  $\delta$ .

e) Cuplul de frînare poate fi variat continuu (și nu în salturi ca în cazul schemei clasice) modificînd raportul ciclic.

Stabilitatea funcționării este asigurată dacă

$$\frac{d}{d i_f} \left( L \frac{d i_f}{d t} \right) < 0 \quad \text{sau}$$

$$\frac{d E}{d i_f} < r + (1 - \delta) R \quad (73)$$

Rezultă necesitatea precizării valorii  $\frac{d E}{d i_f}$  care se poate face numai liniarizînd caracteristica  $E = f(i_f)$  (fig.31).

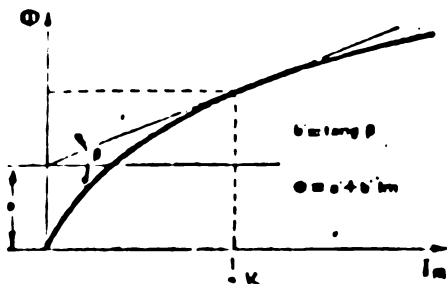


Fig.31 - Liniarizarea caracteristicii de magnetizare.  
Din fig.31 rezultă :

$$E = a n + b n i_f \quad (74)$$

Am ținut seama de faptul că pentru regimul stabil de funcționare, curentul de frînare corespunde unei valori  $I \geq I_k$

$$\frac{d E}{d i_f} = \frac{d}{d i_f} (a n + b n i_f)$$

adică 
$$\frac{d E}{d i} = b n \quad (75)$$

Inlocuind (75) în (73) rezultă

$$b n \quad r + (1 - \delta) R_f \quad (76)$$

Din (76) se obține

$$R_f > \frac{b n - r}{1 - \delta} \quad (77)$$

Din studiul frînării reostatice în condițiile schemei cu Chopper am ajuns la concluzia că o deosebită importanță o au fenomenele electromagnetice ce se desfășoară în circuit datorită funcționării variatorului. Nu trebuie trecut cu vederea faptul că procesele mecanice nu sînt influențate de variator dată fiind frecvența ridicată de lucru a acestuia și inerenta mare a sistemului.

Pentru înțelegerea desfășurării proceselor electromagnetice și energetice am pornit de la relațiile care descriu variația în timp a curentului de frînare în cele două etape principale ale perioadei de reglare avînd la bază fig. 29.

Cînd variatorul conduce ( $0 \leq t \leq \delta T$ ) curentul crește conform relației:

$$i_1 = \frac{a n}{r - b n} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) + I_{\min.} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (78)$$

Cînd variatorul este blocat ( $T - t - T$ ) curentul scade conform relației

$$i_2 = \frac{a n}{R + r - b n} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) + I_{\max.} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (79)$$

Relațiile (78) (79) au fost determinate în ipoteza liniarizării relației  $E = f(\delta)$  conform celor menționate anterior, iar

$$\tau_1 = \frac{L}{r - bn}$$

$$\tau_2 = \frac{L}{R + r - bn}$$

În prima perioadă curentul crește pînă la valoarea maximă  $I_{max}$ , corespunzătoare la  $t = \delta T$  iar în următoarea perioadă scade la valoarea minimă  $I_{min}$ , corespunzătoare la  $t = T$

$$I_{max} = \frac{an}{r - bn} (1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}}) + I_{min} e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}} \quad (80)$$

$$I_{min} = \frac{an}{R + r - bn} (1 - e^{-\frac{T}{\tau_2}}) + I_{max} e^{-\frac{T}{\tau_2}} \quad (81)$$

Din sistemul de ecuații (80) (81) se pot determina valorile  $I_{max}, I_{min}$ , obținîndu-se

$$I_{max} = \frac{an}{r - bn} \frac{1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}}}{1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}} e^{-\frac{T}{\tau_2}}} + \frac{an}{R + r - bn} e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}} \frac{1 - e^{-\frac{T}{\tau_2}}}{1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}} e^{-\frac{T}{\tau_2}}} \quad (82)$$

$$I_{min} = \frac{an}{R + r - bn} \frac{1 - e^{-\frac{T}{\tau_2}}}{1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}} e^{-\frac{T}{\tau_2}}} + \frac{an}{r - bn} e^{-\frac{T}{\tau_2}} \frac{1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}}}{1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}} e^{-\frac{T}{\tau_2}}} \quad (83)$$

Curentul prin motor variază între cele două valori date de relațiile (82) (83), după legea descrisă de relațiile (78)(79)

Valoarea medie a curentului de frînare care determină cuplul de frînare și stă la baza calculului pierderilor în circuit este dată de relația :

$$I_m = \frac{1}{T} \int_0^T i dt \quad (84)$$

care după efectuarea calculului conduce la expresia

$$I_m = \frac{1}{T} \left\{ \frac{an}{r - bn} \left[ \delta T - \tau_1 (1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}}) \right] + \frac{an}{R + r - bn} \left[ (1 - \delta) T - \tau_2 (1 - e^{-\frac{T}{\tau_2}}) \right] + \tau_1 I_{min} (1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}}) + \tau_2 I_{max} (1 - e^{-\frac{T}{\tau_2}}) \right\} \quad (85)$$

Ecuația (85) descrie în toată complexitatea sa procesul de frînare reostatică în schemele cu variator stabilind legătura de interdependență între mărimile fizice, mecanice și



electrice ale acționării. Dacă chopper-ul lucrează la frecvența constantă (cazul cel mai des întâlnit) se poate determina raportul ciclic  $0 \leq \delta \leq 1$  astfel că frînarea la turația dată,  $n$ , să fie realizată la curentul de frînare impus

Variația curentului de frînare datorită funcționării variatorului provoacă un transfer periodic de energie între elementele circuitului.

Ecuatiile de echilibru al tensiunilor în cele două perioade de lucru ale variatorului vor fi

Cînd variatorul conduce

$$E - L \frac{di_f}{dt} = r i_f \quad (86)$$

Cînd variatorul este blocat

$$E - L \frac{di_f}{dt} = i_f (1 - \delta) R_f + r \quad (87)$$

Dacă amplificăm relațiile (86) (87) cu  $i_f dt$  se obține

$$E \cdot i_f dt = L i_f di_f + i_f^2 r dt \quad (88)$$

sau

$$E \cdot i_f dt = \frac{1}{2} L di_f^2 + i_f^2 r dt \quad (89)$$

respectiv

$$E i_f dt = \frac{1}{2} L di_f^2 = [r + (1 - \delta) R_f] i_f^2 dt \quad (90)$$

Termenul  $E i_f dt$  reprezintă energia electrică furnizată de generator în intervalul de timp  $dt$  datorită rotației rotorului pe seama energiei cinetice înmagazinate.

Termenul  $\frac{1}{2} L di_f^2$  reprezintă energia magnetică înmagazinată în inductanța circuitului.

Termenii  $i_f^2 r dt$ ,  $(1 - \delta) R_f i_f^2 dt$  reprezintă energia disipată sub formă de căldură în rezistențele circuitului.

Din relațiile (89) (90) rezultă următoarele:

..//..

a - În perioada cînd variatorul conduce, întreaga energie electrică produsă de mașină în regim de generator serie autoexcitat, se înmagazinează în inductanța circuitului sub formă de energie magnetică (se neglijează pierderile în rezistențele circuitului).

b - În perioada cînd variatorul este blocat, energia electrică produsă de mașină însumată cu energia electrică ce ia naștere pe seama energiei magnetice înmagazinate în inductanță în prima perioadă se transformă în căldură în rezistențele circuitului.

c - Chiar la turații mici (practic zero) în circuit va circula un curent de frînare pe seama energiei înmagazinate în inductanța circuitului datorită regimului de impulsuri provocat de funcționarea variatorului. Acest lucru nu poate fi realizat în schemele clasice.

Este cunoscut faptul că funcționarea mașinii în regim de generator serie autoexcitat necesită o preexcitație a acestuia de la o sursă de tensiune continuă. Pe de altă parte, așa cum s-a arătat anterior conectarea variatorului în paralel cu rezistența de frînare face ca aceasta să fie solicitată la tensiuni apreciabile. Pentru eliminarea acestor neajunsuri se recomandă folosirea unei scheme de frînare reostatică ca cea din fig.32.

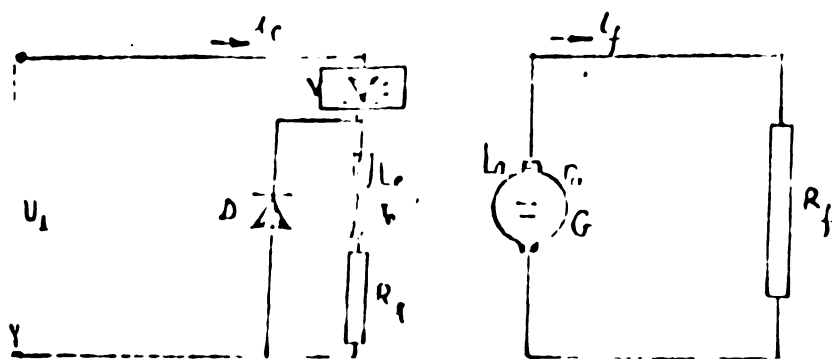


Fig.32 - Frînarea reostatică cu excitație separată prin comandă prin impulsuri a curentului de excitație.

În analiza acestei scheme am pornit de la schema clasică de frînare reostatică, motorul funcționînd în regim de generator cu excitație separată.

Se știe că în acest caz un punct de funcționare se găsește la intersecția curbelor

$$E = K_e \phi n \quad (91)$$

$$E = (r_a + R_f) i_f \quad (92)$$

Rezultă

$$i_f = \frac{E}{r_a + R_f} = \frac{K_e \phi n}{r_a + R_f} \quad (93)$$

$$M_f = K_m \phi i_f = \frac{K_m K_e \phi^2 n}{r_a + R_f} \quad (94)$$

Deci cuplul de frînare poate fi modificat acționând fie asupra rezistenței de frînare, fie asupra curentului de excitație, fie asupra ambelor elemente.

Schema prezentată în fig. 32 folosește variatorul pentru modificarea curentului de excitație rezistența de frînare rămânând constantă.

O astfel de schemă s-a utilizat la troleibuzul TV 20 E asupra căreia am efectuat experimentări.

Pentru circuitul de excitație, în cele două situații ale variatorului rezultă relațiile:

$$U_1 = L_e \frac{d i_e}{dt} + (r_e + R_1) i_e \quad (95)$$

pentru  $0 \leq t \leq \delta T$  (variatorul conduce)

$$L_e \frac{d i_e}{dt} + r_e i_e = 0 \quad (96)$$

pentru  $\delta T \leq t \leq T$  (variatorul blocat)

care conduc la relațiile

$$i_e = \frac{U_1}{R_e + r_e} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) + I_{\min.} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (97)$$

pentru  $0 < t \leq \delta T$

$$i_e = I_{\max.} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (98)$$

pentru  $\delta T \leq t \leq T$

Valorile între care variază curentul de excitație vor fi date de relațiile:

$$I_{\max.} = \frac{U_1}{R_e + r_e} \frac{1 - e^{-\frac{dT}{z_1}}}{1 - e^{-\frac{dT}{z_1}} e^{-\frac{T}{z_2}}} \quad (99)$$

$$I_{\min.} = \frac{U_1}{R_e + r_e} e^{-\frac{T}{z_2}} \frac{1 - e^{-\frac{dT}{z_2}}}{1 - e^{-\frac{dT}{z_1}} e^{-\frac{T}{z_2}}} \quad (100)$$

Relațiile (99) (100) au fost deduse din (97) (98) înlocuind  $t = dT$  respectiv  $t = T$

Din (97) (98) rezultă

$$I_{e.m.} = \frac{1}{T} \left\{ \frac{U_1}{R_l + r_e} \left[ dT - z_1 (1 - e^{-\frac{dT}{z_1}}) \right] + z_1 I_{\min.} (1 - e^{-\frac{dT}{z_1}}) + z_2 I_{\max.} (1 - e^{-\frac{dT}{z_2}}) \right\} \quad (101)$$

În relațiile de mai sus

$$z_1 = \frac{L_e}{R_e + r_e}$$

$$z_2 = \frac{L_e}{r_e}$$

Valoarea minimă a curentului de excitație este determinată de tensiunea minimă ce se obține la ieșirea din variator. În cazul analizat tensiunea minimă s-a măsurat 40 V rezultând un curent minim.

$$I_{ex.min.} = \frac{U_{\min.}}{R_e + r_e} = 60 \text{ A} \quad (102)$$

(La motorul de 74 KW care a fost supus încercărilor  $r_e = 0,15 \Omega$  și s-a inseriat rezistența de limitare  $R_l = 0,3 \Omega$ )

Avînd în vedere că curentul maxim de excitație este cel admis de mașină rezultă tensiunea maximă ce trebuie să fie realizată la ieșirea din variator.

$$U_{V_{\max.}} = I_{e_{\max.}} (R_e + r_e) \quad (103)$$

Pentru cazul considerat  $I_{e_{\max.}} = 220 \text{ A}$  rezultînd  $U_{V_{\max.}} = 110 \text{ V}$

Valoarea rezistenței de frînare rezultă din condiția

$$i_f \approx i_{\text{max.rot.}} \quad (104)$$

obținându-se

$$R_f = \frac{K_e \Phi_n n_{\text{max.}}}{i_{f \text{max.}}} \quad (105)$$

$\Phi_n$  fiind fluxul corespunzător curentului de excitație nominal.

Ca urmare a experimentărilor efectuate am ajuns la următoarele concluzii:

1. Forța de frînare rămîne constantă doar pentru o gamă restrînsă a variației vitezei vehiculului.

2. Frînarea electrică realizată cu această schemă este mai eficace decît cea de la schema de frînare dinamică în care motorul funcționează ca generator cu excitație serie.

3. Frînarea se realizează în bune condiții pentru variații ale tensiunii de alimentare în limite largi (între 500 V și 900 V).

4. În rezistența de limitare au loc pierderi importante de energie electrică. Astfel la curentul de 220 A a rezultat o putere disipată de 14,5 KW.

5. Frînarea electrică nu poate fi realizată cînd tensiunea de alimentare scade sub 500 V sau se întrerupe, acesta constituind principalul dezavantaj al schemei descrise evidențiat și în exploatarea tramvaiului Timiș 1 comandat prin variator de tensiune continuă.

#### 4.3.2. Frînarea electrică cu recuperare de energie

În cazul tracțiunii electrice în curent continuu cu motoare serie utilizînd scheme clasice frînare electrică cu recuperare nu s-a extins datorită faptului că funcționarea acestor motoare în regim de generator este instabilă. Apar în plus dificultăți de realizare a frînării care fac ca ea să nu se mențină decît la anumite viteze (cca. 1/4 sau 1/2

..//..

din viteza maximă [19] aceasta fiind turația sub care tensiunea electromotoare a generatorului devine mai mică decât tensiunea rețelei, excitația generatorului fiind maximă). Deci în cazul schemelor convenționale acest sistem nu permite oprirea vehiculului.

Folosirea schemelor cu variator de tensiune continuă înlătură acest inconvenient făcând posibilă frînarea vehiculului pînă la oprire.

Principiul procesului de recuperare este prezentat în fig.33.

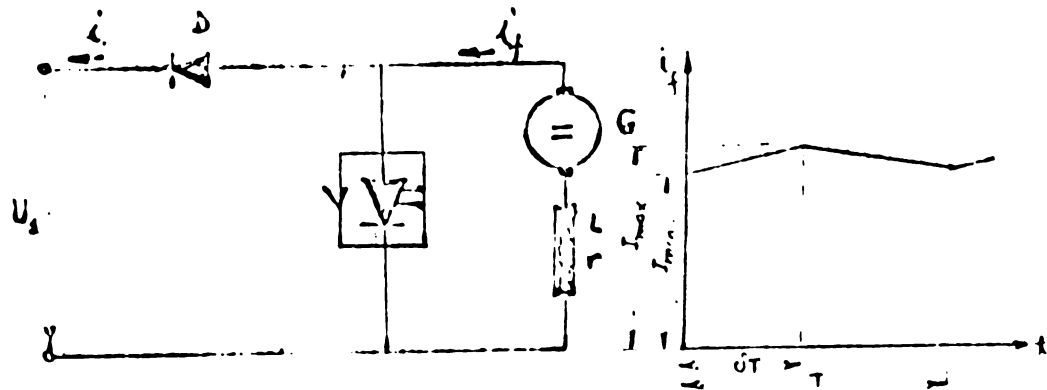


Fig.33 - Schema de principiu a frînării cu recuperare de energie.

Cînd variatorul conduce ( $0 \leq t \leq \delta T$ ) mașina este scurtcircuitată iar curentul debitat crește conform relației

$$i_1 = \frac{a n}{r - b n} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) + I_{\min.} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (106)$$

Cînd variatorul este blocat ( $\delta T \leq t \leq T$ ) tensiunea la bornele sale este egală cu tensiunea sursei de alimentare iar curentul debitat scade conform relației.

$$i_2 = \frac{a n - U}{r - b n} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) + I_{\max.} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (107)$$

$$\tau_1 = \frac{L}{r - b n}$$

Procedînd ca și în cazul relațiilor (80) (81) (84) se găsesc expresiile pentru  $I_{\max.}$ ,  $I_{\min.}$ ,  $I_{m.c.}$ .

$$I_{\max.} = \frac{a n}{r - b n} - \frac{U}{r - b n} \frac{e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}} (1 - e^{-\frac{T}{\tau_1}})}{1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}} e^{-\frac{T}{\tau_1}}} \quad (108)$$

...//...

$$I_{\min} = \frac{a n}{r - b n} - \frac{U}{r - b n} \frac{1 - e^{-\frac{T}{\tau_1}}}{1 - e^{-\frac{d T}{\tau_1}} e^{-\frac{T}{\tau_1}}} \quad (109)$$

$$I_{m \dots} = \frac{1}{T} \left\{ \frac{a n}{r - b n} \left[ d T - \tau_1 \left( 1 - e^{-\frac{d T}{\tau_1}} \right) \right] + \frac{a n - U}{r - b n} \left[ (1 - d) T - \tau_1 \left( 1 - e^{-\frac{(1-d) T}{\tau_1}} \right) \right] + \tau_1 I_{\min} \left( 1 - e^{-\frac{d T}{\tau_1}} \right) + \tau_1 I_{\max} \left( 1 - e^{-\frac{(1-d) T}{\tau_1}} \right) \right\} \quad (110)$$

Tensiunea la bornele chopperului într-o perioadă de reglare va fi

$$(U_V)_{\text{med.}} = U (1 - d) \quad (111)$$

Este ca și când curentul debitat de generator se consumă într-o rezistență de valoare  $\frac{U}{I_m} (1 - d)$

Curentul restituit sursei de alimentare va fi zero în timpul  $0 \leq t \leq d T$  (variatorul conduce) și  $I_m$  în timpul  $d T \leq t \leq T$  (variatorul blocat).

Deci valoarea medie a curentului restituit sursei de alimentare în timpul unei perioade de reglare va fi  $I_m (1 - d)$ .

Fenomenele electromagnetice ce au loc în circuit în perioadele de funcționare a variatorului sînt asemănătoare cu cele descrise la frînarea reostatică cu deosebirea că energia electrică nu se consumă în rezistență ci se restituie sursei de alimentare.

Stabilitatea funcționării este caracterizată de relațiile

$$r < b n \quad (\text{rezultă din relația lui } \tau_1) \quad (112)$$

$$a n + b n I_{m, \max.} < U_1 + r I_{m, \max.} \quad (\text{rezultă din fig. 36}) \quad (113)$$

Primul membru al ultimei inegalități reprezintă f.e.m. a generatorului la sfîrșitul intervalului  $t = d T$ . Ea trebuie să fie mai mică decît tensiunea rețelei de alimentare adunată cu căderea de tensiune ohmică din motor. Când frînarea se face la turație mare condiția (113) se realizează

fie prin utilizarea unei rezistențe de limitare care se scurtcircuitează, cînd viteza vehiculului scade, fie prin diminuarea fluxului motorului.

În situația utilizării unei rezistențe de limitare (fig.34) scriind relația de egalitate a tensiunilor la bornele comune ale celor doi dipoli la sfîrșitul perioadei de reglare se obține:

$$E - L \frac{di_f}{dt} = i_f r + (1 - \delta) (i_f R + U_1) \quad (114)$$

pentru fig.34 a

$$E - L \frac{di_f}{dt} = i_f (r + R) + U_1 (1 - \delta) \quad (115)$$

pentru fig.34 b

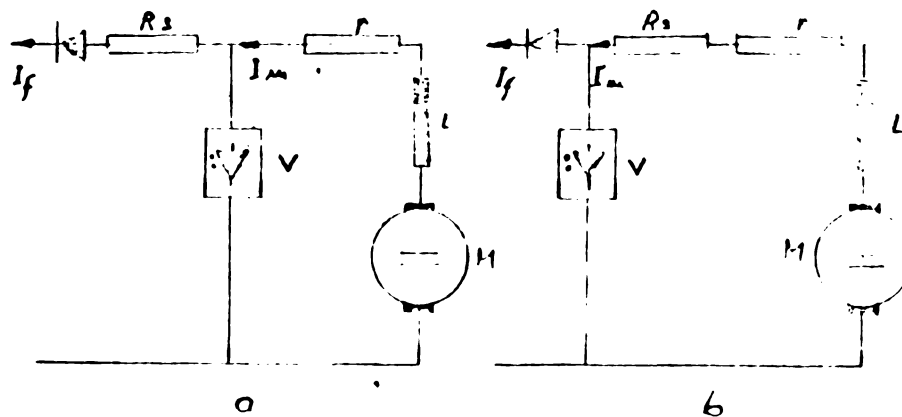


Fig. 34 - Limitarea curentului de frînare cu ajutorul unei rezistențe suplimentare.  
 a) între variator și sursă  
 b) între variator și motor

Considerînd regimul stabilizat și admitînd mașina saturată pentru o aceeași viteză de deplasare rezultă :

$$i_{f1} = \frac{E - (1 - \delta) U_1}{r + (1 - \delta) R} \quad (116)$$

$$i_{f2} = \frac{E - (1 - \delta) U_1}{r + R} \quad (117)$$

$$\frac{t_{f1}}{t_{f2}} = \frac{r + R}{r + (1 - \delta) R} \geq 1 \quad (118)$$

Ein cele de mai sus rezultă următoarele:

a - Dacă se mențin constante viteza și curentul de frînare va fi necesară o creștere a duratei relative de conectare  $\delta$



cînd rezistența este conectată între motor și variator ( $\delta' > \delta''$ )

Aceste lucru are drept consecință diminuarea corespunzătoare a gamei de reglaj.

b - Conectarea rezistenței între motor și variator determină un curent de frînare respectiv un cuplu de frînare mai mic.

c - Pierderile în rezistența suplimentară vor fi

$$P_1 = I_{f_1}^2 (1 - \delta) R \quad (119) \text{ pentru primul caz}$$

$$P_2 = I_{f_2}^2 R \quad (120) \text{ pentru cel de al doilea caz}$$

$$\frac{P_1}{P_2} = (1 - \delta) \frac{I_{f_1}^2}{I_{f_2}^2} = \frac{1 - \delta}{\left(1 - \frac{\delta R}{r + R}\right)^2} = \frac{1 - \delta}{(1 - K\delta)^2} \quad (121)$$

$$K = \frac{R}{r + R} < 1$$

$$\text{Dar } 0 < 1 - \frac{\delta R}{r + R} \leq 1 \quad ; \quad 0 \leq 1 - \delta \leq 1.$$

Rezultă că mărimea raportului  $\frac{1 - \delta}{(1 - K\delta)^2}$  trebuie studiată în funcție de coeficientul K și de raportul ciclic  $\delta$

$$f_1(\delta) = 1 - \delta \quad (122)$$

$$\text{și } f_2(\delta) = (1 - K\delta)^2 = K^2 \delta^2 - 2K\delta + 1 \quad (123)$$

Reprezentînd grafic relația (123) pentru diferite valori ale lui K ( $k = 0 \dots 1$ ) se obțin o serie de parabole al căror minim se găsește pe axa absciselor (fig.35) avînd toate ca punct comun punctul de coordonate (0,1).

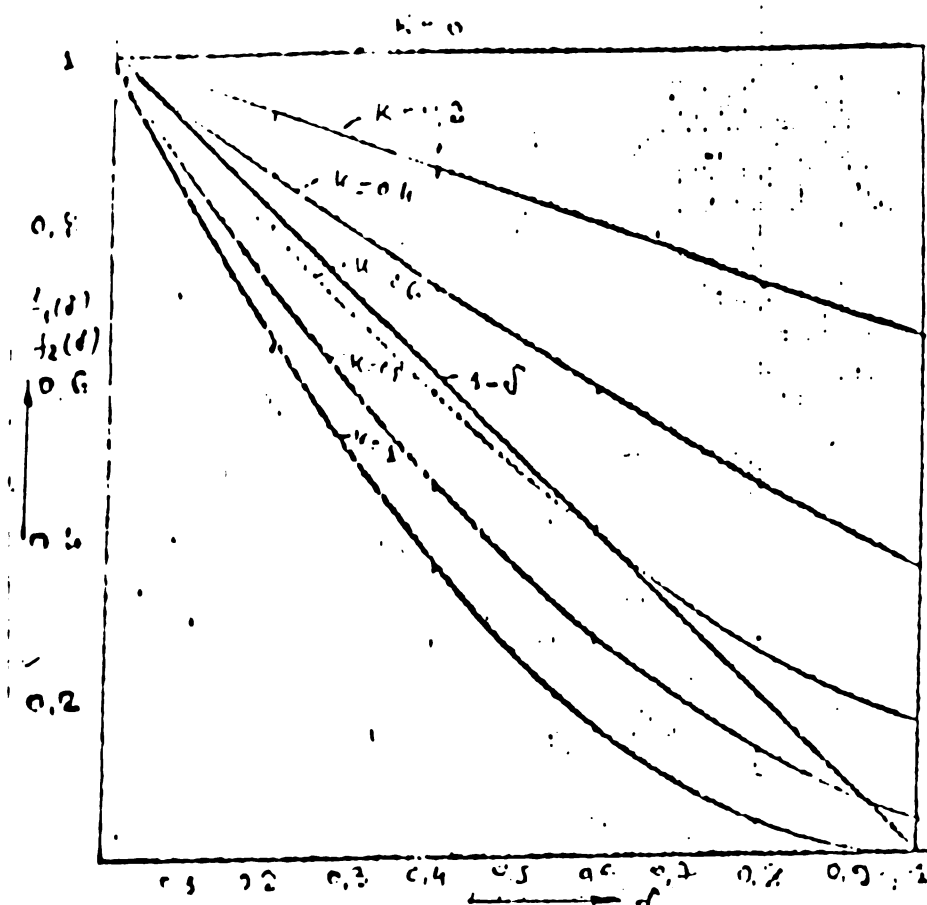


Fig. 35 - Curbele corespunzătoare relațiilor (122), (123) în funcție de raportul ciclic pentru diferite valori ale raportului  $\frac{R}{r+R}$

Delimitînd domeniul  $0 \leq \sigma \leq 1$  constatăm că dacă  $K \leq 0,5$ , ( $R \leq r$ ),  $f_1(\sigma) < f_2(\sigma)$  pentru toate valorile lui  $\sigma$ . Pentru  $K \geq 0,8$ ,  $f_1(\sigma) > f_2(\sigma)$  pentru  $0 \leq \sigma \leq 0,83$  (practic întregul domeniu de reglare), pentru  $K = 0,6$ ,  $f_1(\sigma) < f_2(\sigma)$  pentru  $0,556 \leq \sigma \leq 1$  iar pentru  $K = 0,7$ ,  $f_1(\sigma) < f_2(\sigma)$  pentru  $0,80 \leq \sigma \leq 1$  (un domeniu foarte restrîns de reglare). Tinînd seama de faptul că  $\frac{f_1(\sigma)}{f_2(\sigma)} = \frac{P_1}{P_2} = p$  se trag următoarele concluzii privind pierderile în rezistența suplimentară:

- Conectarea rezistenței suplimentare între variator și sursa de alimentare, conduce la pierderi de energie mai mici indiferent de valoarea raportului ciclic dacă  $R < r$ .

- Dacă schema de frînare necesită alegerea unor valori mari pentru rezistența suplimentară ( $\frac{R}{r+R} \geq 0,8$ ), este avantajosă din punct de vedere al pierderilor ca rezistența să fie conectată între motor și variator.

In procesul frînării cu recuperare de energie folosind scheme cu chopper este deosebit de importantă explicarea fenomenului prin care se realizează condiția  $E > U$  chiar la turații mici, știut fiind că fluxul magnetic al mașinii nu poate crește peste o anumită valoare atât datorită saturației cât și valorii curentului prin motor.

Din fig. 33 rezultă că recuperarea energiei are loc numai în intervalul  $t = (1 - d)T$ . În acest interval trebuie să fie îndeplinită condiția  $U_1 > U$ , de această dată  $U_1$  fiind tensiunea la bornele variatorului privit dinspre dipolul activ. Această tensiune ia naștere ca sumă între tensiunea electromotoare indusă în mașină datorită rotației rotorului sub influența energiei cinetice a maselor în mișcare și tensiunea indusă în inductanțele circuitului datorită variației fluxului magnetic care în perioada menționată, datorită scăderii fluxului, are același sens cu t.e.m. a generatorului. Valoarea acestei tensiuni depinde de gradientul de flux. Rezultă că atunci când frînarea are loc la turații mari raportul ciclic trebuie să aibă valori mici.

Pe măsură ce turația scade, trebuie să se mărească  $d$  pînă ce ajunge la  $d = 1$  când are loc frînarea în scurtcircuit.

Trecerea pe la valoarea  $d_1$  la valoarea  $d_2 > d_1$  se comandă prin curentul de frînare care nu trebuie să scadă sub valoarea  $I_{f.min}$ .

#### 4.4. Comportarea motorului de tracțiune comandat prin variator de tensiune continuă [35] , [65] , [109] , [112] .

Pentru a evidenția influența variatorului de tensiune continuă asupra motorului de curent continuu cu excitație serie voi analiza ondulara curentului prin motor în cazul schemei din fig. 22.

Ondulara curentului prin motor definită de relația

$$\Delta I_m = I_{max} - I_{min} \tag{124}$$

utilizînd (36) (37) devine

$$\Delta I_m = \frac{U_1}{r} \frac{(1 - e^{-\frac{dT}{\tau}}) (1 - e^{-\frac{(1-d)T}{\tau}})}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} \tag{125}$$

Dezvoltând în serie termenii relației (125) și neglijând infiniții mici de ordin superior rezultă :

$$\Delta I_m = d(1 - d) \frac{T}{L} \frac{U_1}{R} \quad (126)$$

Din (126) rezultă că ondulara maximă apare la  $d = 0,5$  și este dată de relația :

$$(\Delta I_m)_{\max} = \frac{U_1 T}{4L} \quad (127)$$

Dacă în relația (127) impunem că  $(\Delta I_m)_{\max}$  să nu depășească o anumită valoare maximă care să asigure condiții bune de funcționare pentru motor se poate reprezenta grafic funcția  $f = f(d)$  obținându-se curba din fig. 36.

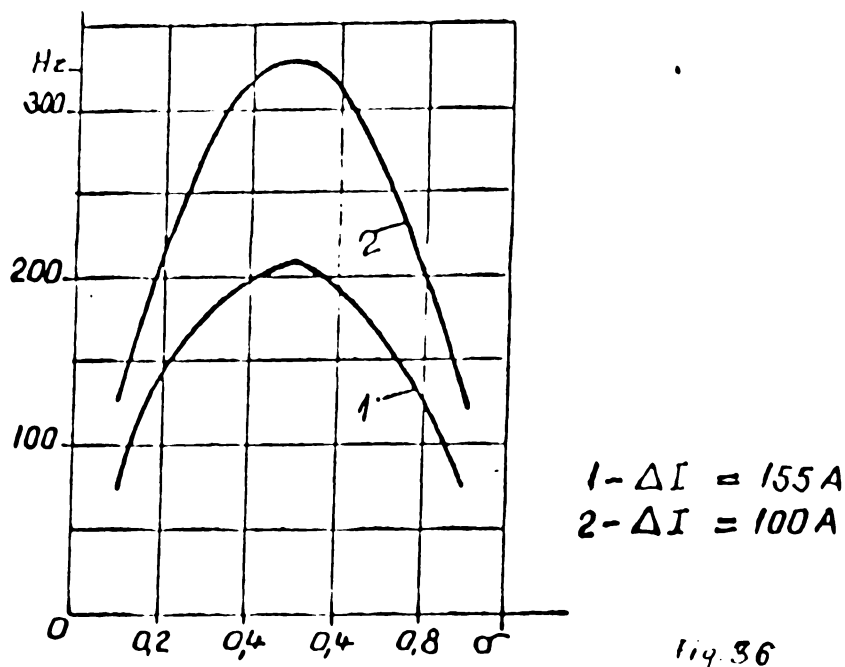


Fig. 36

Din (127) și fig. 36 se desprind următoarele concluzii:

a) Ondulara maximă a curentului prin motor poate fi redusă prin creșterea frecvenței de lucru a variatorului sau a valorii inductanței circuitului prin înserierea unei inductanțe de netezire.

b) Menținerea constantă a valorii  $I_m$  în funcție de care se dă comanda aprinderii și stingerii tiristorului principal presupune modificarea continuă a frecvenței de lucru o dată cu modificarea raportului ciclic  $d$ . Acest lucru fiind dificil de realizat și prezentând inconveniente ce vor fi prezentate în continuare, în practică, se folosesc două frecvențe de lucru: o frecvență mai joasă la limitele curbei din fig. 36 și o frecvență mai

ridicată în zona mijlocie.

În fig.37 se prezintă influența acestui procedeu asupra ondulației curentului prin motor pentru un caz concret.

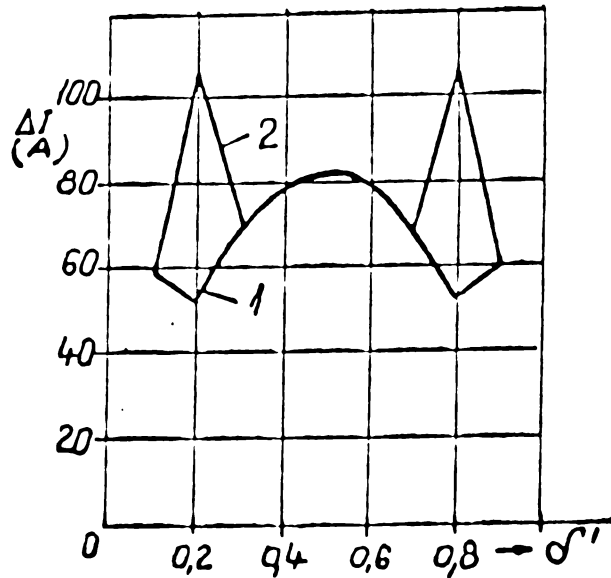


Fig. 37

Ondularea curentului prin motor presupune existența armoni- cilor în curentul de sarcină care provoacă pierderi supli- mentare în înfășurări și influențează comutația motorului.

Pierderile suplimentare depind de forma curentului prin motor care la rândul său este influențat de schema de acționare și de frecvența de comutație.

Pentru a evidenția fenomenul de creștere a pierderilor în circuitul motorului voi determina expresia valorii efec- tive a curentului prin motor:

$$I_{ef}^2 = \int_0^{\delta T} \frac{1}{\delta T} i_1^2 dt + \int_{(1-\delta)T}^T \frac{1}{(1-\delta)T} i_2^2 dt \quad (128)$$

Înlocuind în (128)  $i_1, i_2$  din (34), (35) și luând numărul de T < T rezultat:

$$I_{ef}^2 = I_m^2 + I_k^2 \delta (1 - \delta) \quad (129)$$

unde:

$$I_k = \frac{U_1}{r} \quad - \text{curentul de scurtcircuit}$$

$$I_m \quad - \text{curentul mediu prin motor}$$

Din (129) rezultă că pierderile în motor conțin două com- ponente:

$$\Delta P_1 = I_m^2 r \quad (130)$$

corespunzătoare alimentării motorului cu un curent continuu avînd valoarea  $I_m$  și

$$\Delta P_2 = I_K^2 r \delta (1 - \delta) \quad (131)$$

corespunzătoare variației curentului prin motor.

Din (131) se constată că pierderile suplimentare sînt maxime la  $\delta = 0,5$  cînd  $T$  este constant și sînt date de relația:

$$(\Delta P_2)_{\max.} = 0,25 I_K^2 \cdot r. \quad (132)$$

O altă problemă importantă este variația turației motorului în regim de funcționare cvasistaționară.

În regim cvasistaționară, corespunder unei perioade de reglare pulsația turației motorului se determină din ecuațiile

$$U_1 = K n_1 + i_1 r + L \frac{d i_1}{d t} \quad (133 a)$$

$$C_m i_1 = \frac{G D^2}{375} \cdot \frac{d n_1}{d t} + M_r \quad (133 b)$$

în intervalul  $0 \leq t \leq \delta T$

$$0 = K n_2 + i_2 r + L \frac{d i_2}{d t} \quad (134 a)$$

$$C_m i_2 = \frac{G D^2}{375} \cdot \frac{d n_2}{d t} + M_r \quad (134 b)$$

în intervalul  $\delta T \leq t \leq T$

Din (133), (134) rezultă :

$$n_1 = \frac{375}{G D^2} \int (C_m i_1 - M_r) dt \quad (135)$$

$$n_2 = \frac{375}{G D^2} \int (C_m i_2 - M_r) dt \quad (136)$$

Considerînd o variație liniară a curenților  $i_1, i_2$  se poate scrie:

$$i_1 = I_{\min.} + \frac{\Delta I}{\delta T} t \quad (137)$$

$$i_2 = I_{\max.} - \frac{\Delta I}{(1 - \delta)T} t \quad (138)$$

$$M_r = C_m I_m \quad (139)$$

Introducînd (137), (138), (139) în (135), (136) și integrînd rezultă:

$$n_1 = \frac{375}{G D^2} \frac{C_m \Delta I}{2} \left( \frac{t^2}{\delta T} - t \right) + A \quad (140)$$

$$n_2 = \frac{375}{G D^2} \frac{C_m \Delta I}{2} \left[ t - \frac{t^2}{(1 - \delta) T} \right] + B \quad (141)$$

cu condiția  $A = B$ .

Din (140) rezultă că turația minimă în intervalul  $0 - \delta T$  se obține la  $t = \frac{T}{2}$  iar din (141) rezultă că turația maximă în intervalul  $\delta T - T$  se obține la  $t = \frac{(1 - \delta)T}{2}$

și au valorile date de expresiile:

$$(n_1)_{\min.} = A - \frac{375}{G D^2} C_m \Delta I \Delta T \quad (142)$$

$$(n_2)_{\max.} = B + \frac{375}{G D^2} C_m \Delta I (1 - \delta) T \quad (143)$$

În aceste condiții amplitudinea pulsației turației este:

$$n = n_{\max.} - n_{\min.} = \frac{375}{G D^2} C_m \Delta I T. \quad (144)$$

Din (144) rezultă că pulsația turației motorului în regim cvasistaționar depinde de ondulația curentului, de perioada de reglare și de caracteristicile constructive ale motorului de tracțiune.

#### CAPITOLUL 5 - PREZENTAREA UNOR SCHEME CU VARIATOR DE TENSIUNE CONTINUĂ UTILIZATE ÎN TRACȚIUNEA ELEC-TRICĂ URBANĂ.

În fig.38 este prezentată schema de acționare cu variator de tensiune continuă a tramvaiului realizată de firma ACEC [35].

Cele două grupe de motoare sînt permanent conectate în paralel.

În timpul conducției tiristorului principal, curentul motorului trece prin filtrul de intrare, tiristorul principal, inductanța de netezire, dioda de blocare în frînare  $D_4$ , motoare, contactorul de conectare în tracțiune  $KT$ . În timp ce tiristorul principal este blocat curentul motoarelor se închide prin dioda  $D_0$ .

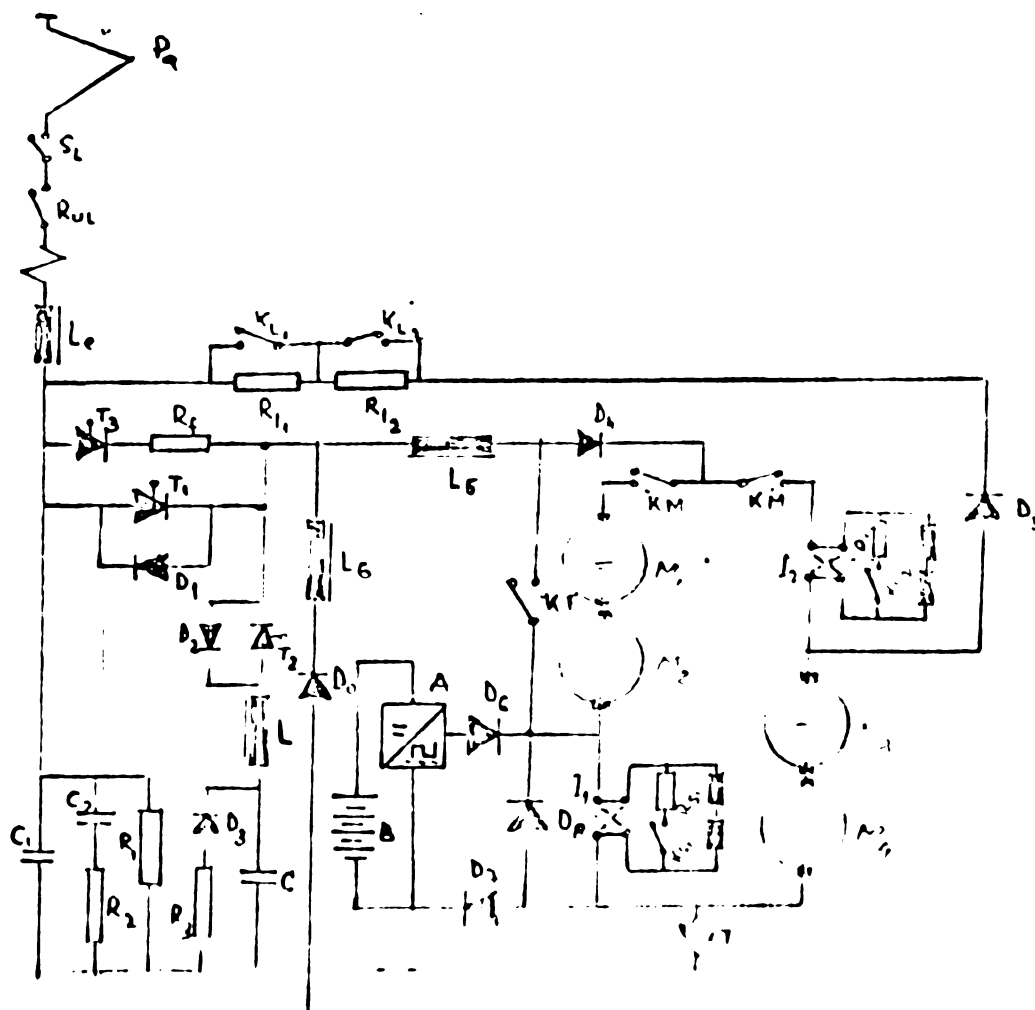


Fig.38 - Schema de principiu a tramvaiului ACEC.

Frînarea este mixtă. Energia cinetică se transformă în energie electrică care se restituie rețelei. Dacă pe rețea se găsesc vehicule care funcționează în regim de tracțiune și absorb energia recuperată, tensiunea rețelei rămîne aproape constantă. Dacă însă energia recuperată prin frînare este mai mare decît cea care, se consumă, tensiunea crește. Cînd această tensiune depășește o valoare prestabilită variatorul furnizează

...//...



rețelei numai energia care poate fi consumată, iar diferența se injectează în rezistența de frînare. Această selecție se face automat la fiecare perioadă de reglare și în consecință cu o constantă de timp foarte mică, fără nici o intervenție exterioară. În funcționare în regim de frînare, generatoarele sînt cu autoexcitație cu o preexcitare de la baterie. În prima fază, generatoarele debitează în scurtcircuit, tiristorul principal fiind în conducție. Curentul circulă prin dioda de blocaj în tracțiune  $D_3$ , tiristorul principal, inductanța de netezire și contactul de frînare KF.

Curentul crește rapid în timp ce energia se înmagazinează în inductanțele circuitului. În perioada de blocare a tiristorului principal se consideră două cazuri :

1. Rețeaua este capabilă să absoarbă energia ce i se furnizează. În acest caz curentul debitat de generatoare trece prin dioda  $D_3$ , filtrul de intrare, rețea și receptoare și revine prin linie, dioda de reversare  $D_0$ , inductanțele  $L_5$ ,  $L_6$  și contactorul KF.

2. Rețeaua nu este în măsură să preia energia ce i se furnizează. Curentul generatoarelor trece atunci prin dioda  $D_3$ , tiristorul de frînare  $T_3$ , rezistența de frînare  $R_f$ , inductanța  $L_5$  și contactorul KF.

În fig.39 este prezentată schema de principiu a instalației electrice de acționare a troleibuzului Skoda tip 9 Tr - T [58].

Puntea redresoare P asigură o polaritate fixă pentru circuitul întrerupătorului cu tiristoare V după schimbarea polarității liniei de contact.

Variatorul realizează pornirea, modificarea turației și frînarea reostatică prin rezistența de frînare  $R_f$ .

..//..



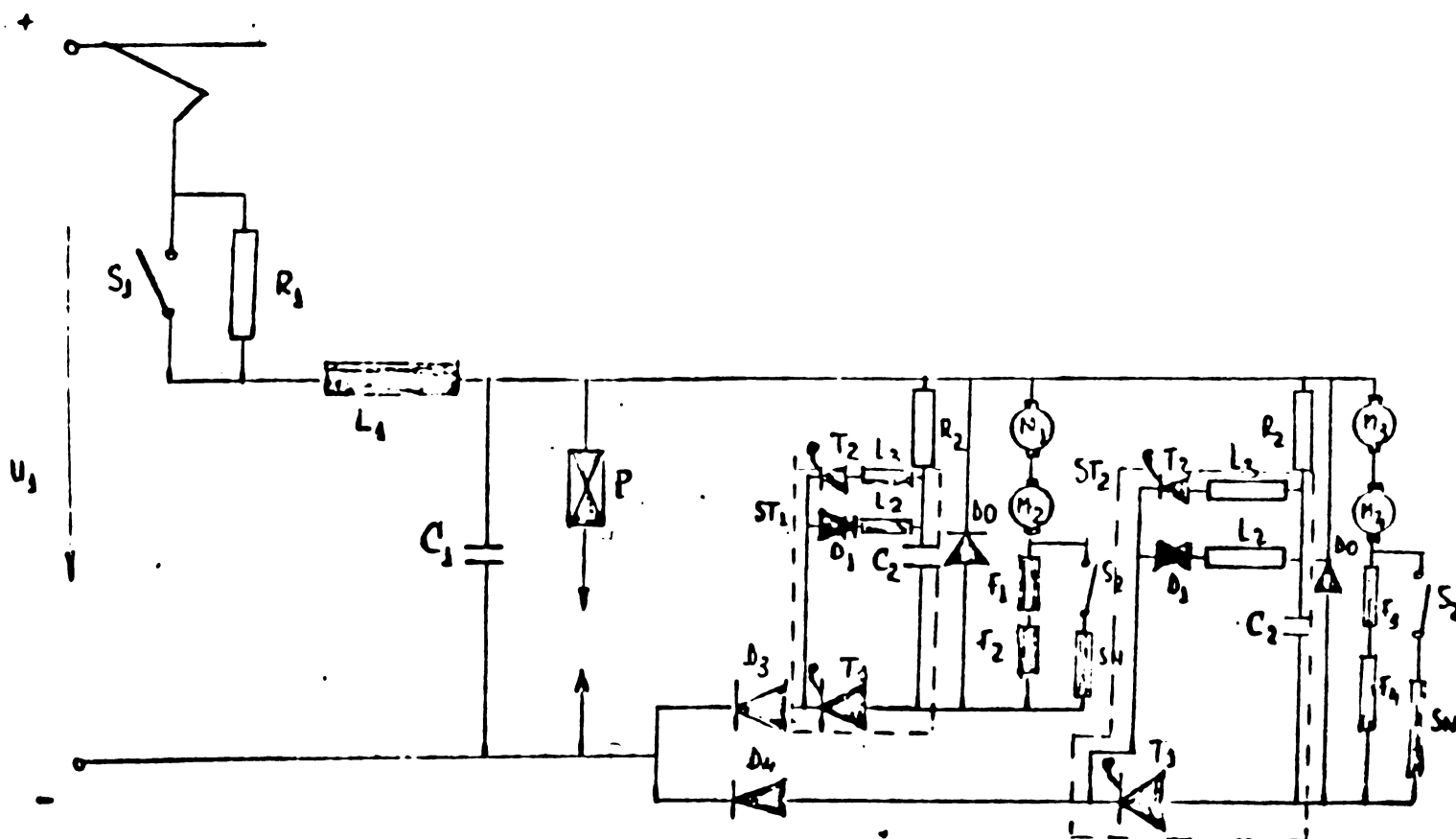


Fig. 40 - Schema de principiu a tramvaiului tip T și KT RSC (regim de tracțiune)

Schema este realizată pentru următorii parametri:

- tensiunea 600 V.c.c.  
(toleranța 400 - 780 V).
- curentul minim de pornire pentru deplasarea tramvaiului 2 x 30 A.
- curentul maxim de pornire 2 x 260 A;
- frecvența de lucru 400 Hz pentru fiecare variator.

Frînarea reostatică se realizează conform schemei din fig. 41.

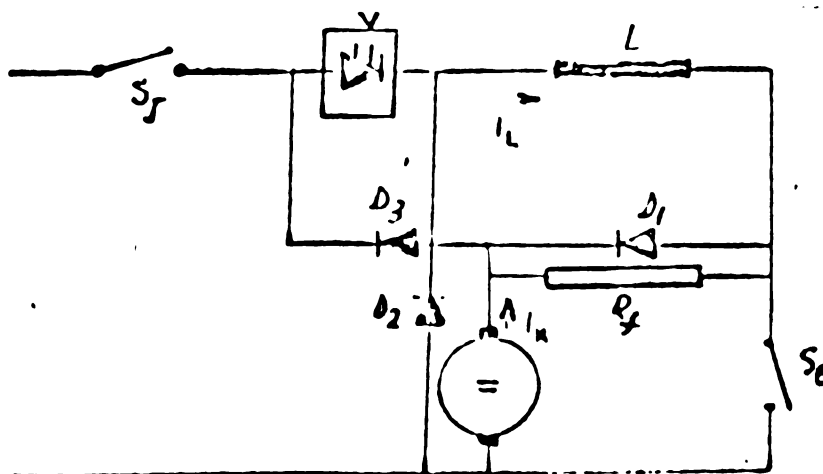


Fig. 41 - Frînarea reostatică a motorului de tracțiune.

Variatorul comandă mărimea curentului de excitație de la zero la maxim independent de curentul indușului. Timpul

de închidere a tiristorului principal comandă valoarea rezistenței de frînare.

La închiderea variatorului V, curentul trece de la indus prin dioda  $D_3$  înfășurarea de excitație L și în paralel prin rezistența de frînare  $R_f$ . Creșterea curentului în rotor este limitată de inductanța circuitelor iar valoarea ce se atinge de către curent este determinată de regulatorul care comandă deconectarea variatorului. În această situație curentul indusului se închide prin rezistența de frînare iar curentul înfășurării de excitație prin dioda  $D_2$ .

În fig.42 sînt prezentate curbele de variație a curenților din indus și din înfășurarea de excitație în funcție de viteza vehiculului.

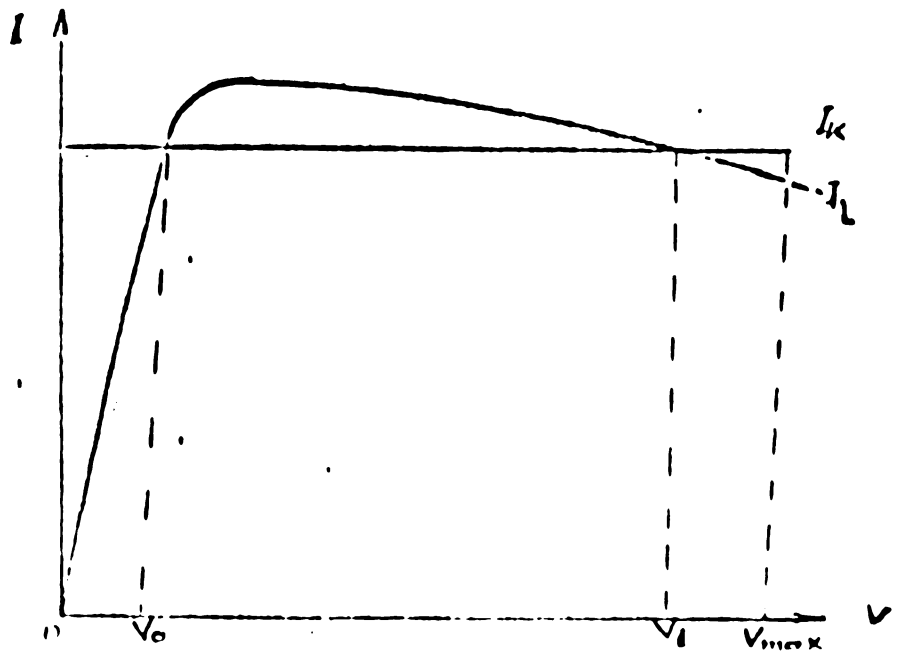


Fig. 42 - Curbele de variație ale curentului din indus și din înfășurarea de excitație în funcție de viteză.

Domeniul de reglare la putere constantă este reprezentat de  $0 - V_0$  și  $V_1 - V_{max}$ , în care curentul de excitație este mai mic decât curentul rotoric.

Al doilea domeniu corespunde cazului în care se micșorează rezistența de frînare concomitent cu creșterea curentului de excitație pînă la limita admisă. Frînarea la cuplul maxim de frînare are loc pînă aproape de viteza zero.

În fig. 43 sînt prezentate două variante de scheme realizate de firma Siemens [104] .

Pentru schema din fig. 43 a în regim de tracțiune cînd variatorul conduce, curentul motoarelor conectate în serie

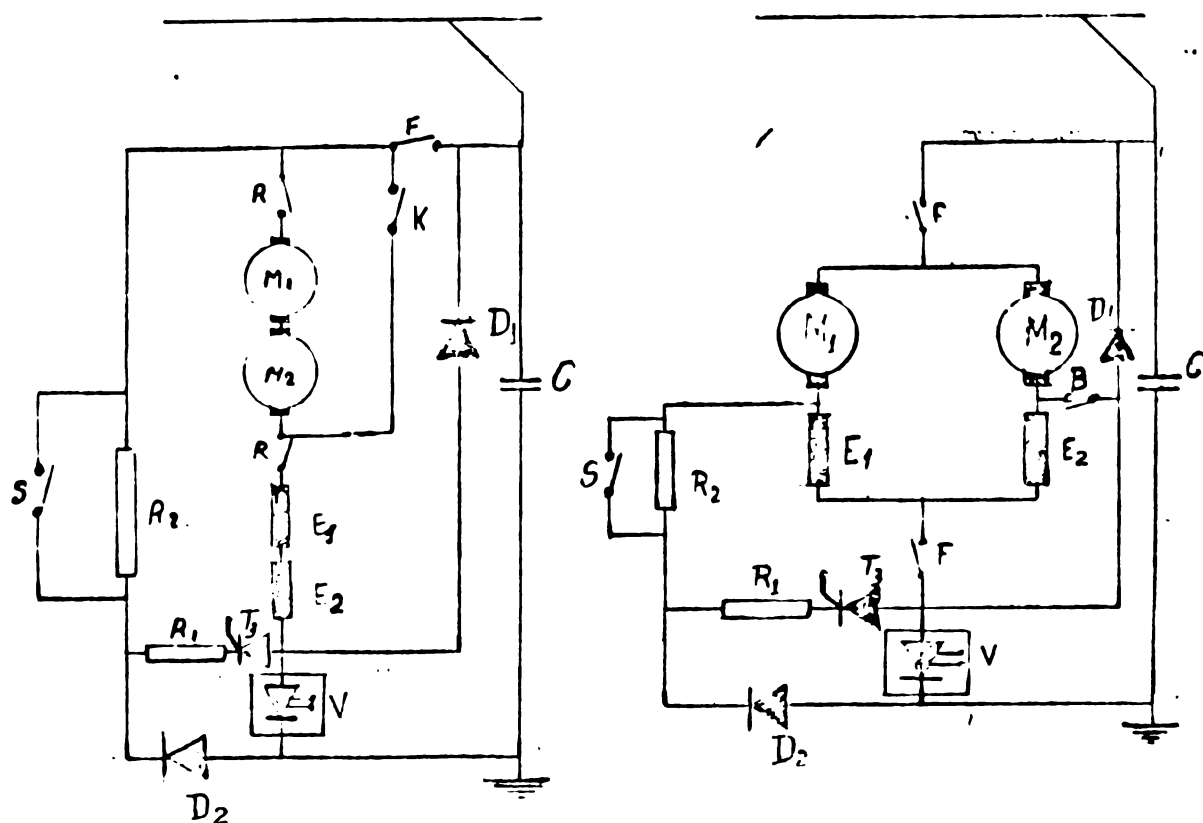


Fig. 43 - Scheme cu variator realizate de firma Siemens

trece prin contactorul  $F$ , motoarele  $M_1$ ,  $M_2$  tiristorul principal al variatorului  $V$ . Cînd variatorul este blocat, curentul se închide prin dioda de roată liberă  $D_1$ .

În regim de frînare contactorul  $F$  se deschide și se închide contactorul  $K$ . Cînd variatorul conduce și contactorul  $S$  este închis, motoarele debitează în scurtcircuit prin dioda  $D_2$ . Cînd variatorul este blocat, se comandă aprinderea tiristorului  $T_1$  și curentul se închide prin rezistența de frînare  $R_1$ . Rezistența  $R_2$  asigură ca și la tușiunile cele mai mari posibile, curentul de frînare să nu depășească valoarea maximă admisă.

La schema din fig.43 b motoarele sînt conectate în paralel. În regim de tracțiune contactorul  $F$  este închis iar contactorul  $B$  deschis.

Cînd variatorul conduce, curentul trece prin cele două motoare și prin tiristorul principal. Cînd variatorul este blocat curentul se închide prin dioda  $D_1$ .

În regim de frînare se deschid contactoarele  $F$  și se închide contactorul  $B$ . Prin variator și prin rezistența de frînare circulează numai curentul de dezechilibru al indusurilor celor două generatoare conectate în opoziție.

Dacă  $E_1 > E_2$  curentul își va menține sensul în înfășurarea de excitație a motorului  $M_2$  și va avea sens schimbat în înfășurarea de excitație a motorului  $M_1$ .

Schema prezintă avantajul că rezistența de frînare se dimensionează pentru valori mai reduse ale curentului.

Tot Siemens a realizat o schemă cu variator pentru frînarea mixtă (fig. 44).

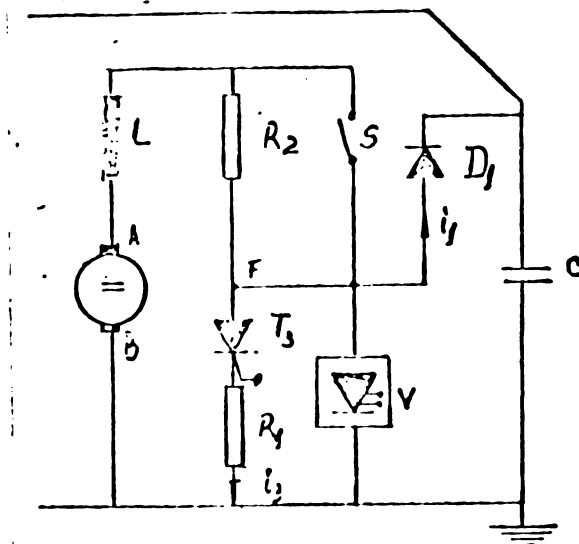


Fig. 44 - Schema cu variator pentru frînare mixtă realizată de Firma Siemens.

Rezistența de frînare este fragmentată iar variatorul reglează numai valoarea rezistenței  $R_1$ .

Frînarea cu recuperare se realizează atunci când tensiunea liniei de contact este mai mică decât potențialul punctului F. În această situație intră în conducție dioda  $D_1$  iar tiristorul  $T_1$  este stins. Rezistența  $R_2$  poate fi folosită și pentru limitarea curentului de frînare prin recuperare de energie atunci când frînarea se realizează la turații mari.

În fig. 45 este prezentată schema de principiu a instalației de acționare a tramvaiului din dotarea Intreprinderii de Transporturi Timișoara. Schema a fost realizată de către Institutul de Cercetare pentru Industria Electrotehnică - ICPE - București [92],[93].

Schema conține două variatoare care pot să lucreze și simultan. Fiecare variator este realizat pentru puterea de 150 KW și tensiunea de 750 V.

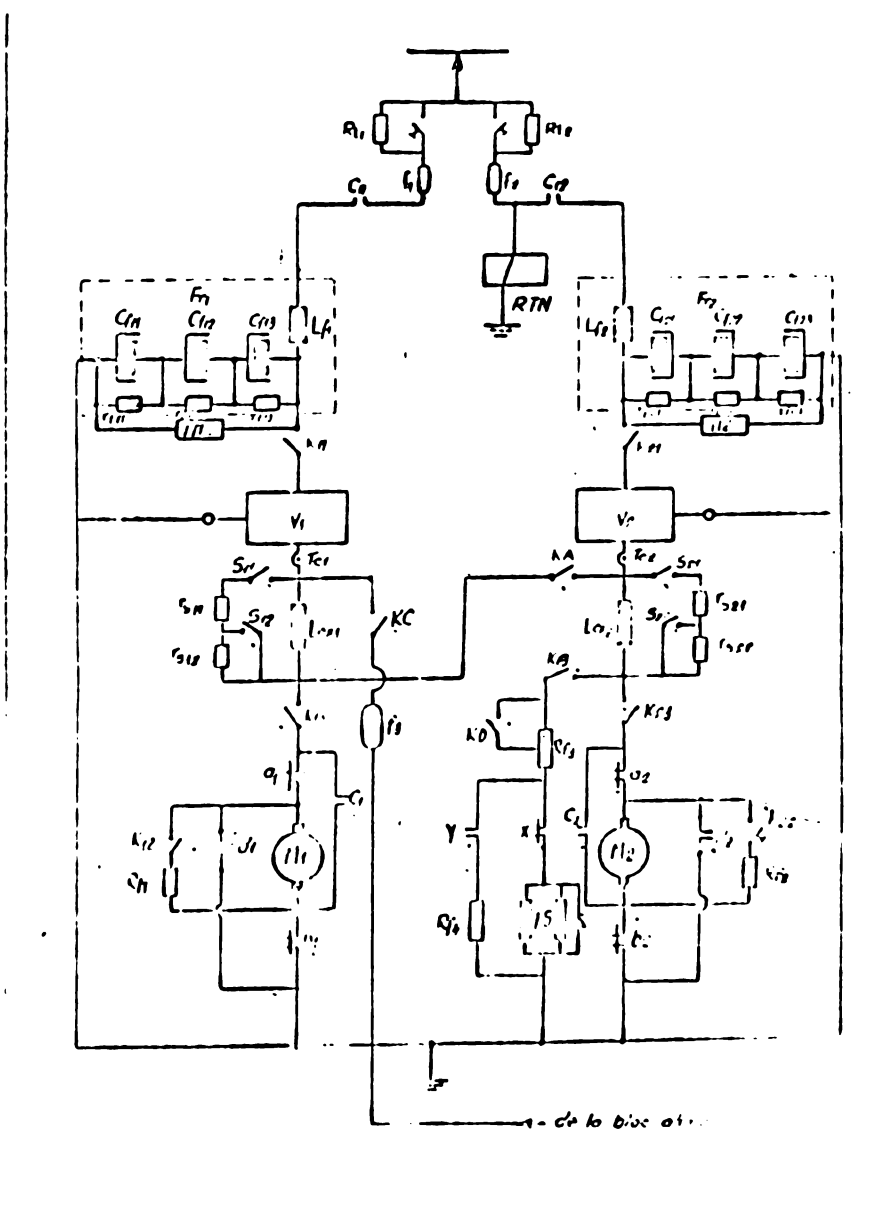


Fig. 45 -

Schema de principiu a instalației electrice de acționare a tramvaiului Timiș 1.

Frecvența de lucru a variatorului este maxim 350 Hz și minim 120 Hz.

Schema funcționează în sistem de frînare reostatică motoarele fiind cu excitație separată. Curentul de frînare este menținut la valoarea prescrisă prin comanda curentului de excitație, variatorul fiind inseriat în circuitul de excitație.

Curentul prin indusul motorului este controlat cu ajutorul traductoarelor de curent T.C. realizate ca niște amplificatoare magnetice.

..//..

CAPITOLUL 6. SCHEMA CU VARIATOR DE TENSIUNE  
CONTINUA PROPUSA PENTRU ACTIONAREA ELECTRICA A  
TRAMVAIULUI LA NOI IN TARA [66]

6. 1. Prezentarea schemei.

Pornind de la necesitățile reclamate de modernizarea transportului în comun urban și de la considerentele de ordin tehnic și economic prezentate am conceput o schemă de acționare a tramvaiului la noi în țară și am dimensionat-o având în vedere cazul concret al tramvaiului de mare capacitate realizat de ITB, prevăzut cu două motoare de tracțiune de 150 KW la tensiunea de 750 V.

Schema de acționare propusă este prezentată în fig. 46 în care:

- $V_1, V_2$  - variatoare de tensiune continuă
- $T_{31}, T_{32}$  - tiristoare de frînare
- $D_3$  - diodă de blocare în regim de tracțiune
- $R_{f1}, R_{f2}$  - rezistențe de frînare
- $L_1, L_2, C_1, C_2$  - inductanțe, respectiv condensatoare de stingere
- $D_{21}, D_{22}$  - diode de amortizare
- $D_{01}, D_{02}$  - diode de descărcare
- $R_s$  - rezistență suplimentară
- $L_e, C_e$  - filtru de intrare
- $k_{11} \dots k_{16}, k_{21} \dots k_{26}, S_{11} \dots S_{13}, S_{21} \dots S_{23}, I, T$  - contactoare
- $I_1$  - întrerupător
- $R_{ex1}, R_{ex2}$  - rezistențe pentru slăbirea cîmpului
- $M_1, M_2$  - indusurile motoarelor
- $L_{ex1}, L_{ex2}$  - înfășurările de excitație.



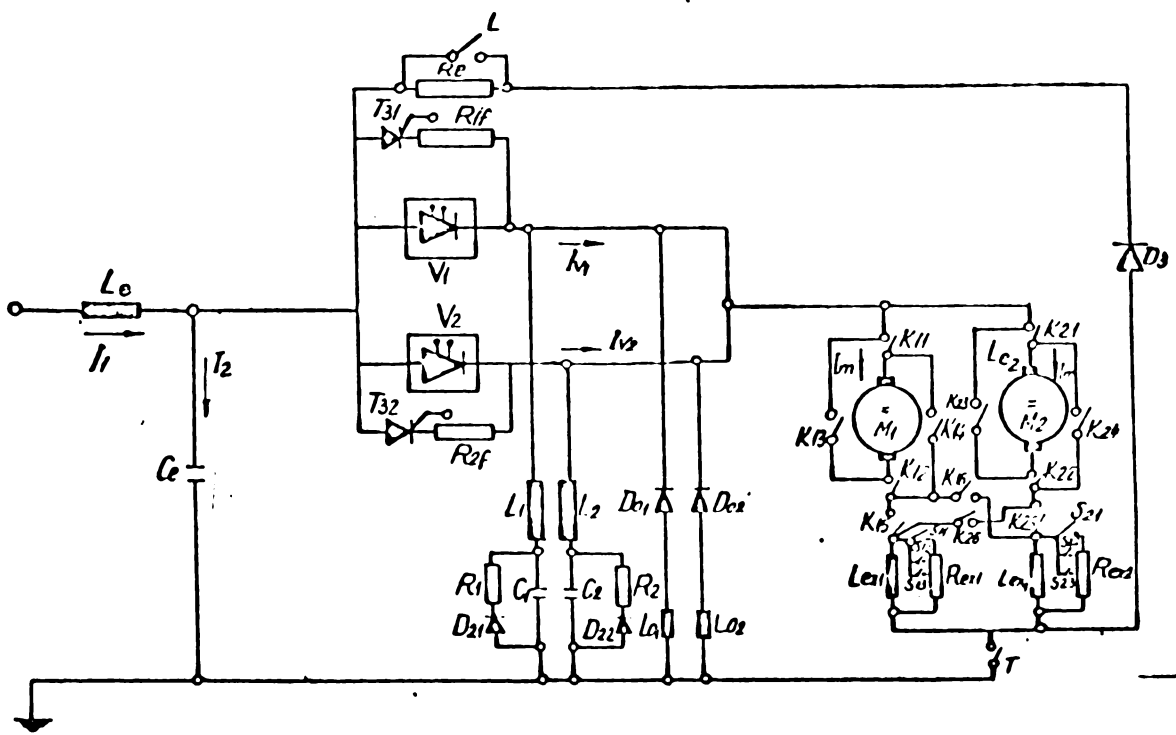


Fig. 46

Poziția contactelor din schemă în diferite regimuri de funcționare este prezentată în tabelul de mai jos.

Regimul de funcționare	Poziția contactelor							
	K <sub>11</sub>	K <sub>12</sub>	K <sub>13</sub>	K <sub>14</sub>	K <sub>15</sub>	K <sub>16</sub>	T	L
	K <sub>21</sub>	K <sub>22</sub>	K <sub>23</sub>	K <sub>24</sub>	K <sub>25</sub>	K <sub>26</sub>		
Tracțiune <del>mers</del>								
Înainte	x	x			x		x	
Înapoi			x	x	x		x	
Frînare			x	x		x		x

.Schema, în ansamblu, reprezintă o contribuție personală și față de schemele cunoscute se caracterizează prin următoarele:

a) Schema conține un număr redus de contacte mecanice prin faptul că unele contacte asigură atât funcționarea în regim de tracțiune (mers înapoi) cât și în regim de frînare.

b) Se elimină dioda de blocare la funcționarea în regim de frînare.

c) Motoarele de tracțiune sînt comandate simultan de cîte un variator de tensiune continuă.

d) Fiecare variator lucrează cu frecvența fixă de 350 Hz, aceasta fiind frecvența minimă determinată prin modelare pe calculator, care asigură o ondulare acceptabilă a curentului prin motoarele de tracțiune fără a fi necesară introducerea în circuit a unei inductanțe suplimentare și conduce la pierderi mici în elementele semiconductoare.

Aceste caracteristici conferă schemei propuse o funcționare economică și o fiabilitate ridicată.

Variatorul de tensiune continuă folosit în schemă este variatorul tip ICPE cu circuit de încărcare a condensatorului independent de sarcină [94] la care am adăugat tiristorul  $T_3$  pentru comanda frînării reostatice.

Schema de principiu a variatorului este prezentată în fig.47. Am ales această schemă de variator pentru că prezintă următoarele avantaje:

a) Incărcarea condensatorului de comutație se realizează printr-un circuit separat la comanda aprinderii tiristorului  $T_4$ . În felul acesta tiristorul principal  $T_1$  este parcurs numai de curentul de sarcină.

b) Aprinderea tiristorului principal este independentă de starea de încărcare a condensatorului de stingere. În felul acesta durata de conducție a lui  $T_1$  nu este influențată de perioada de oscilație a circuitului de stingere.

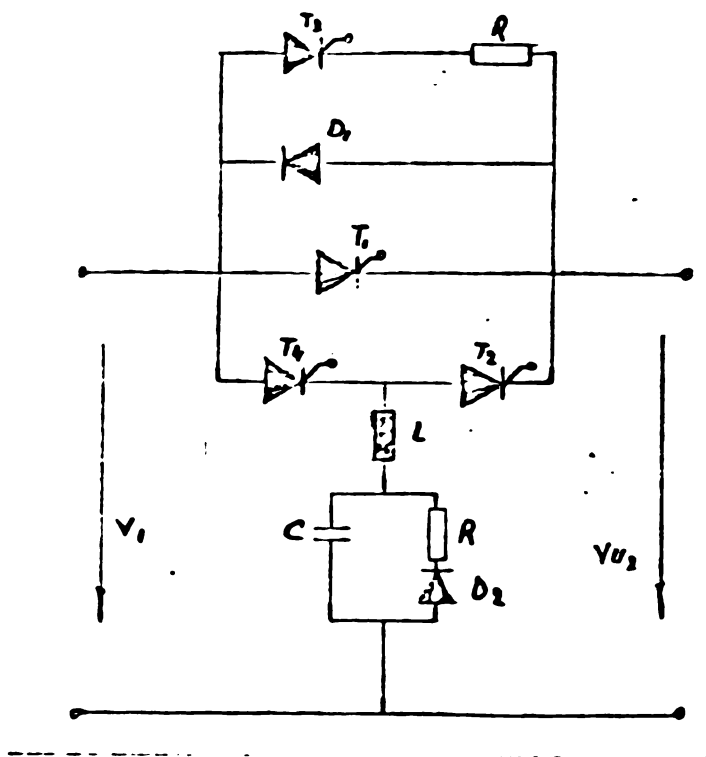


Fig.47.

c) Este mult diminuat efectul de oscilație determinat de inversarea polarității tensiunii pe condensatorul de comutație curentul amortizându-se mult mai rapid.

d) Este înlăturat pericolul intrării schemei în regim de curent întrerupt.

Variatoarele sînt comandate prin lățimea impulsurilor la frecvență fixă. Am ales acest procedeu pentru că permite o protecție mai bună împotriva influenței pe care o are variatorul asupra instalațiilor de telecomunicații, există unele fenomene de interacțiune între mai multe vehicule care circulă pe același tronson și permite utilizarea comenzii decalate.

..//..

Cele două variatoare sînt comandate simultan pentru  $0,2 \geq \delta \geq 0,8$  și decalat cu o semiperioadă pentru  $0,2 \leq \delta \leq 0,8$  (conform fig.37).

Comanda simultană a variatoarelor pentru valorile lui  $\delta$  menționată asigură menținerea unei ondulații corespunzătoare a curentului prin motoare și aplicarea unei tensiuni suficient de mici la pornire pentru a nu depăși curentul de pornire admis.

Comanda decalată a variatoarelor cu o semiperioadă în condițiile cînd motoarele sînt comandate simultan de fiecare variator conduce la următoarele avantaje:

a) Ondularea curentului prin motoarele de tracțiune, a curentului absorbit din linia de contact și a tensiunii pe condensatorul filtrului de rețea se reduc apreciabil. Într-adevăr dacă  $f$  este frecvența de lucru a unui variator rezultă că curenții prin motoarele de tracțiune și curentul prin inductanța filtrului de intrare vor oscila cu frecvența  $2f$ .

În aceste condiții ondularea maximă corespunde la  $\delta = 0,25$  și este dată de relațiile:

$$(\Delta I_m)_{\max.} = \frac{U_1 T}{16 L} \quad (145)$$

$$(\Delta U_{Ce})_{\max.} = \frac{I_m T}{16 C_e} \quad (146)$$

$$(\Delta I_1)_{\max.} = \frac{I_m T^2}{256 I_e C_e} \quad (147)$$

Ondulația maximă a curentului prin variatoare este aceeași în ambele situații și este dată de (145).

b) La aceeași ondulare a curentului absorbit din linia de contact se obțin valori mai mici pentru inductanță și capacitatea filtrului de rețea.

c) Se evită introducerea în circuit a unei inductanțe suplimentare pentru netezirea curentului prin motoarele de tracțiune.

d) Este diminuată influența negativă a funcționării variatoarelor asupra instalațiilor de telecomunicații.

La frînare motoarele funcționează în regim de generator serie autoexcitat cu înfășurările de excitație încrucișate.

Circuitul este astfel realizat încât să se mențină sensul curentului prin înfășurările de excitație. În felul acesta se asigură o funcționare stabilă și o frânare eficace a vehiculului independentă de tensiunea liniei de contact.

Schema permite frânarea mixtă prin intermediul tiristoarelor  $T_3$  înseriate în circuitul rezistențelor de frânare a căror stingere se realizează prin descărcarea condensatoarelor  $C_1, C_2$ .

Comanda schemei de acționare pentru realizarea regimurilor de funcționare menționate se realizează conform fig. 48 [35], [46], [58], [74], [78], [82], [84], [94], [116], [147].

În fig. 48 s-au notat:

$F_r$  - filtru de rețea

$V_1, V_2$  - variatoare de tensiune continuă

$TC_1, TC_2$  - traducătoare de curent

BA - bloc de alimentare

BP - bloc de protecție

BC - bloc de comandă

$TT_1, TT_2$  - traducătoare de tensiune

C - controlor.

Blocul de comandă culege informații privind regimul de funcționare dorit, valoarea curenților prin motoarele de tracțiune, a tensiunii pe condensatorul filtrului de rețea și pe condensatorul de comutație și la bornele motoarelor de tracțiune, compară aceste valori cu mărimile de referință și comandă realizarea schemei de forță dorită și aprinderea tiristoarelor variatorului, inclusiv a tiristorului de frânare dinamică. Pentru a îndeplini aceste funcții blocul de comandă are o schemă electronică complexă.

Blocul de protecție asigură protecția circuitelor de forță împotriva suprasarcinilor și a scăderii tensiunii la intrarea în variator.



Protecția de tensiune realizată prin intermediul traducătorului  $T T_1$ , protejează schema împotriva scăderii tensiunii sub limitele stabilite. Scăderea tensiunii la bornele condensatorului de comutație sub o anumită valoare face ca energia electrică acumulată în condensator să nu mai fie suficientă pentru a stinge tiristorul principal al variatorului.

Traducătorul de tensiune  $T T_2$  transmite blocului de comandă informația asupra valorii tensiunii la bornele motoarelor de tracțiune. În funcție de această valoare blocul de comandă realizează comanda simultană sau decalată a variatoarelor.

În schema propusă fiecare variator de tensiune continuă este parcurs de suma curenților celor două motoare de tracțiune și l-am dimensionat corespunzător acestei valori. Motorul de tracțiune, cu care este echipat tramvaiul de mare capacitate este de tip T N-71 din fabricația I.M.E.B. și are următoarele caracteristici:

- Tensiunea nominală	750 V
- Puterea nominală unioară	140 KW
- Curentul nominal	178 A
- Curentul nominal unioară	205 A
- Curentul maxim de pornire	350 A
- Turația nominală	1630 $\frac{\text{rot.}}{\text{min.}}$
- Turația maximă	3000 $\frac{\text{rot.}}{\text{min.}}$
- Randamentul nominal	90 %

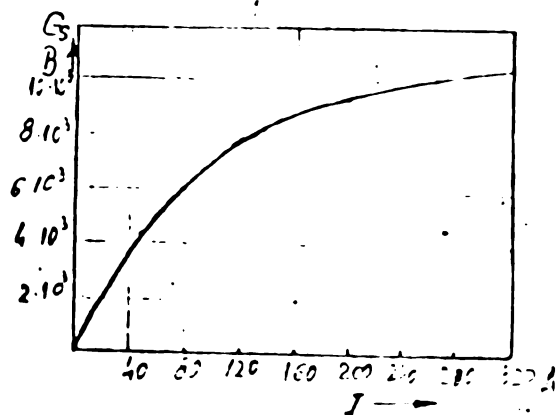


Fig. 49

In fig. 49 este prezentată caracteristica de magnetizare a motorului.

In aceste condiții am ales tiristoare tip T 707... 32, avînd:

$$I_{\max.ef.} = 570 \text{ A}$$

$$I_{\max.med.} = 315 \text{ A}$$

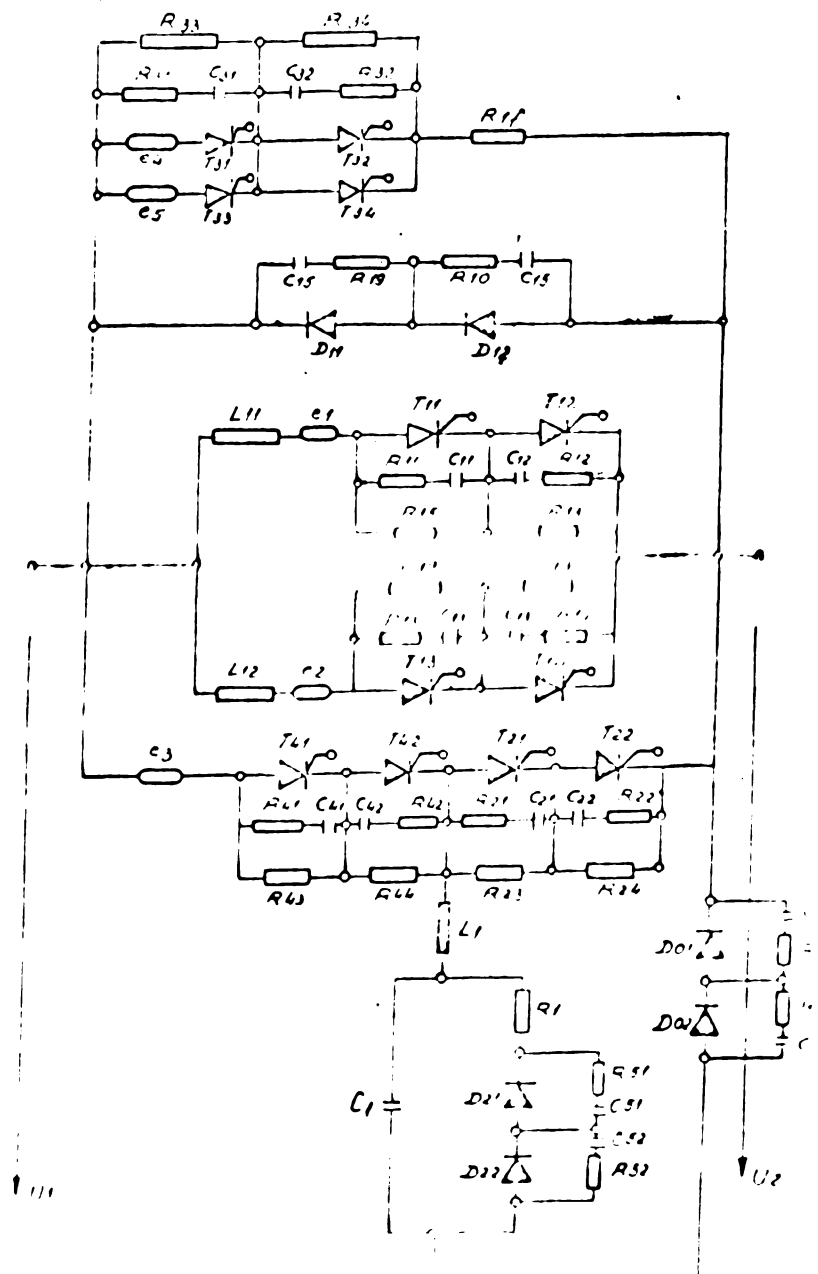
$$U_{\max.} = 1200 \text{ V}$$

$$t_{st} = 50 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{\max.} = 400 \text{ A}/10^{-6} \text{ s}$$

$$\left(\frac{du}{dt}\right)_{\max.} = 500 \text{ V}/10^{-6} \text{ s}$$

Conform [94] a rezultat pentru un variator schema din fig.50.







Se disting următoarele faze:

1. Aprinderea tiristorului de încărcare  $T_4$ .

Curentul  $I_L$  care încarcă condensatorul (circuitul din fig. 52 a) rezultă din relația

$$U_1 = L \frac{d(I_L)}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t I_L dt + U_0 \quad (145)$$

cu condițiile inițiale

$$\begin{aligned} t &= 0 \\ I_L &= 0 \\ U_C &= 0 \end{aligned}$$

Rezultă

$$I_L = U_1 \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \omega_0 t \quad (146)$$

$$U_0 = U_1 (1 - \cos \omega_0 t) \quad (147)$$

unde

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

În momentul  $t = \frac{\pi}{\omega_0}$ ,  $I_L = 0$  și are tendința de a-și schimba sensul. Datorită faptului că  $T_2$  nu conduce în acest moment, curentul  $I_L$  rămâne egal cu zero și tensiunea la bornele condensatorului devine  $U_C = 2 U_1$ . Procesul de încărcare a condensatorului s-a încheiat la  $t = \frac{\pi}{\omega_0}$  și acesta este pregătit pentru stingera lui  $T_1$ .

Pentru alegerea tiristorului  $T_4$ , se calculează

$$\begin{aligned} \frac{d i_L}{d t} &= U_1 \sqrt{\frac{C}{L}} \omega_0 \cos \omega_0 t = U_1 \sqrt{\frac{C}{L}} \frac{1}{\sqrt{LC}} \cos \omega_0 t \\ &= \frac{U_1}{L} \cos \omega_0 t \end{aligned} \quad (148)$$

$$\left( \frac{d i_L}{d t} \right)_{\max} = \frac{U_{\max}}{L} \quad (149)$$

$\frac{d i}{d t}$  corespunzător tiristorului ales trebuie să fie mai mare decât valoarea  $\frac{U_1}{L} \max.$

## 2 Aprinderea tiristorului principal $T_1$

Conform circuitului din fig.52 b rezultă

$$i_{T_1} + i_{D_0} = i_m \quad (150 a)$$

$$L_m \frac{di_m}{dt} = U_1 \quad (150 b)$$

$$L_0 \frac{di_0}{dt} = U_1 \quad (150 c)$$

$$I_m \left( \frac{di_{T_1}}{dt} + \frac{di_{D_0}}{dt} \right) = U_1 \quad (150 d)$$

$$I_m \frac{di_{T_1}}{dt} + U_1 \frac{I_m}{L_0} = U \quad (150 e)$$

$$\frac{di_{T_1}}{dt} = \frac{U_1}{I_m} \left( 1 - \frac{I_m}{L_0} \right) \quad (150 f)$$

Este necesar ca

$$\left( \frac{di_{T_1}}{dt} \right)_{\max.} = \frac{U_{1\max.}}{L_m} \left( 1 - \frac{L_m}{L_0} \right) \leq \frac{di}{dt} \text{ admis}$$

## 3. Stingerea tiristorului principal.

Schimbînd originea timpului în sensul că  $t = 0$  reprezintă momentul aprinderii tiristorului auxiliar  $T_2$  se urmărește procesul de stingere.

Aprinderea lui  $T_2$  provoacă închiderea unui circuit care conține condensatorul  $C$  încărcat inițial la tensiunea  $2U$ , inductanța  $L$ , parcursă inițial de un curent nul, tiristorul  $T_2$ , dipolul format din  $T_1$  în paralel cu  $D_1$  și sursa de tensiune. În circuitul de stingere se stabilește un curent de formă sinusoidală  $I_L$ . (fig. 52 c).

Dacă elementele circuitului sînt dimensionate corespunzător, amplitudinea primei semiunde a curentului  $I_L$  depășește curentul  $I_m$  care trece prin sarcină.

...//...

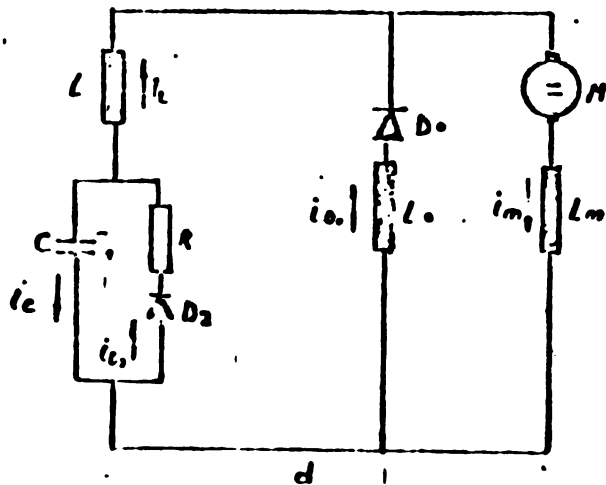
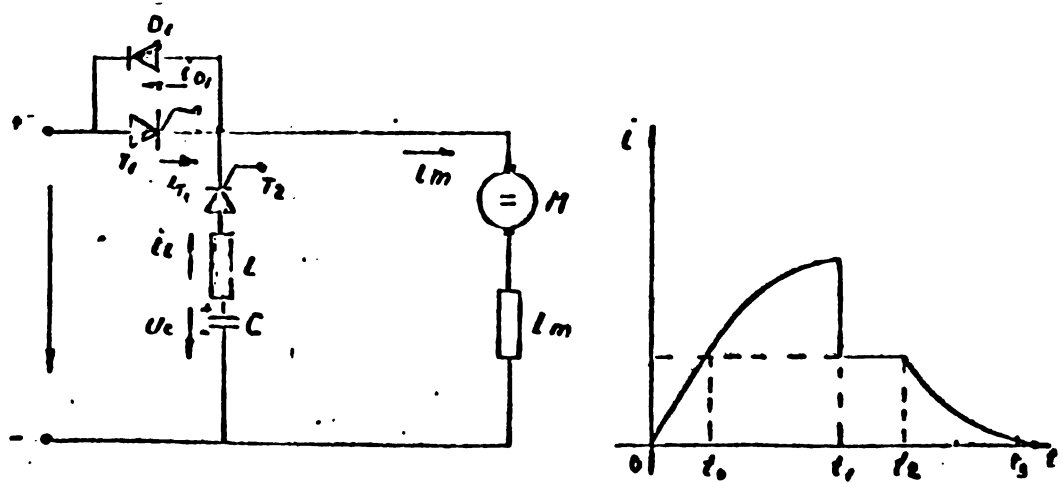
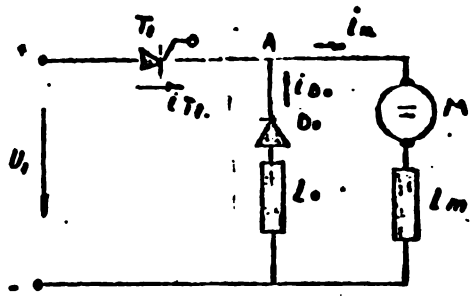
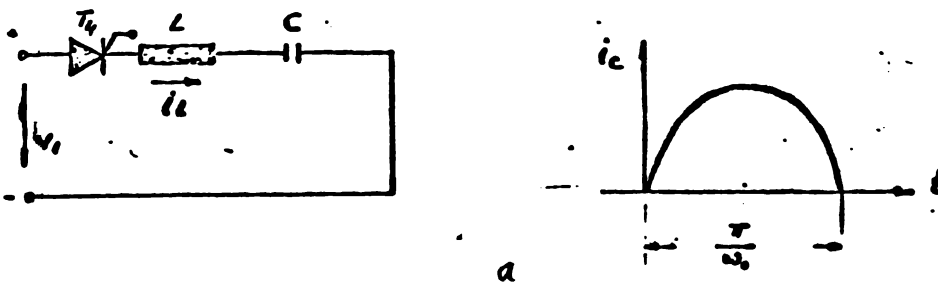


Fig. 52

Se disting trei faze:

- a) Descărcarea condensatorului la curentul  $i > i_m$   
 ( $0 \leq t \leq t_1$ )

In acest interval potențialul punctului A (fig.51) este egal cu  $U$ .

$$i_L + i_{T_1} = i_m + i_{D_1} \quad (151a)$$

$$U_c - \frac{1}{C} \int_0^t I_L dt = L \frac{d i_L}{d t} + U_1 \quad (151 b)$$

cu condițiile inițiale

$$\begin{aligned} I_L &= 0 & i_{T_1} &= i_m \\ U_c &= 2 U_1 & i_{D_1} &= 0 \end{aligned}$$

Rezultă

$$I_L = U_1 \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \omega_0 t \quad (152)$$

$$U_c = U_1 (1 + \cos \omega_0 t) \quad (153)$$

Intre momentul  $t = 0$  cînd  $I_L = 0$  și momentul  $t = t_0$  cînd  $I_L = I_m$  pentru prima dată curentul scade progresiv în tiristorul  $T_1$  pînă la valoarea zero. Incepînd din acest moment un curent egal cu  $(I_L - I_m)$  circulă prin dioda  $D_1$  pînă ce curentul  $I_L$  devine inferior lui  $I_m$ . Aceasta are loc la  $t = t_1$  cînd

$$I_L(t_1) = U_1 \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \omega_0 t_1 = I_m \quad (154)$$

$$U_c(t_1) = U_1 (1 + \cos \omega_0 t_1) = U_1 \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{I_m}{U_1 \sqrt{\frac{C}{L}}} \right)^2} \right] \quad (155)$$

$$\frac{\pi}{2} < \omega_0 t_1 < \pi$$

$$\text{Rezultă } t_1 = \frac{1}{\omega_0} \arcsin \frac{I_m}{U_1 \sqrt{\frac{C}{L}}} \quad (156)$$

...//...

b) Descărcarea condensatorului prin sarcină cu  
curentul  $i = i_m$

$$t_1 \leq t \leq t_2$$

Incepînd din momentul  $t_1$  dipolul constituit din  $T_1$  și  $D_1$  nu mai conduce (dacă  $t_1 - t_0$  este mai mare decît timpul de inversare a tiristorului principal) și circuitul menționat mai sus se întrerupe. Trebuie ca descărcarea condensatorului să se facă în continuare pe un alt circuit. În acest moment tensiunea la bornele condensatorului fiind pozitivă, dioda de sens invers  $D_0$  este blocată. În aceste condiții condensatorul se descarcă prin sarcină cu curentul  $I_m$ .

Se pot scrie relațiile

$$I_L = I_m \tag{157}$$

$$U_c = U_c(t_1) - \frac{I_m(t - t_1)}{C} \tag{158}$$

Momentul  $t_2$  este definit de relația

$$U_c(t_2) = U_c(t_1) - \frac{I_m(t_2 - t_1)}{C} = 0 \quad (\text{condensatorul este descărcat}) \tag{159}$$

Rezultă

$$t_2 = \frac{C U_c(t_1)}{I_m} + t_1 \tag{160}$$

c) Potențialul punctului A este egal cu zero  
( $t - t_2$ )

Incepînd din momentul  $t = t_2$  este amorțat un nou circuit de descărcare a condensatorului C. După ce tensiunea  $U_c$  are tendința de a-și schimba polaritatea curentul de sarcină se închide prin dioda  $D_0$ . Pentru  $t > t_2$  potențialul punctului A din fig. 51 va fi zero. Pentru calculul variației lui  $I_L$  și  $U_c$  începînd din momentul  $t = t_2$  se va lua acest moment cu origine. (fig. 52 d).

..//..

= lol =

$$L \frac{d i_L}{d t} = U_c \quad (161)$$

$$U_c = \frac{1}{C} \int_0^t (-I_L - \frac{U_c}{R}) d t \quad (162)$$

cu condițiile inițiale

$$I_L = I_m$$

$$U_c = 0$$

Cum  $R = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$  se găsește în prezența unui cir-

cuit cu amortizare critică, rezolvarea ecuațiilor conduce la :

$$I_L = I_m e^{-\frac{t}{\tau}} \left(1 + \frac{t}{\tau}\right) \quad (163)$$

$$U_c = -I_m \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{t}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (164)$$

unde

$$\tau = 2 R C = \sqrt{L C}$$

Se constată deci că curentul  $I_L$  și tensiunea  $U_c$  se anulează rapid.

Pentru dimensionarea circuitului de stingere se ține seama de faptul că este convenabil ca  $L$  și  $C$  să fie astfel alese încât timpul în care tiristorul principal  $T_1$  este supus, la o tensiune inversă de blocare să fie mai mare decât timpul de inversare al acestui tiristor supus la această tensiune inversă. Timpul în decursul căruia tiristorul  $T_1$  este supus la o tensiune inversă este egal cu  $t_1 - t_0$ .

Trebuie deci respectată inegalitate

$$t_1 - t_0 \geq t_{st.}$$

Dacă se alege  $I_L = 2 \cdot I_m$  ( $I_m$  fiind curentul maxim de sarcină),  $T_1$  va fi blocat pentru toate valorile curentului de sarcină inferioare sau egale cu  $I_m$  când perioada proprie de oscilație a circuitului oscilat  $T_0 = 2\pi \sqrt{LC}$  satisface inegalitate

$$\frac{T_0}{3} \geq t_{st.} \quad [35]$$

.....

Tinând seama de această inegalitate și de relația (152) rezultă condițiile de blocare.

$$U_1 \sqrt{\frac{C}{L}} = 2 I_m \quad (153)$$

$$\frac{2}{3} \pi \sqrt{L C} = t_{st.} \quad (154)$$

din care se calculează L și C

$$L = \frac{3}{4 \pi} \frac{U_1 t_{st.}}{I_m} \quad (155 a)$$

$$C = \frac{3}{\pi} \frac{I_m \cdot t_{st.}}{U_1} \quad (155 b)$$

Tinând seama de acest lucru rezultă :

$$C = K \frac{3}{\pi} \frac{I_{max.} t_{st.}}{U_{1min.}} = 72 \cdot 10^{-6} F \quad (156)$$

unde

K - coeficient de siguranță (K = 1,3) [92]

$I_{max.}$  - curentul maxim pe care-l poate controla variatorul

$t_{st.}$  - timpul de stingere al tiristoarelor principale.

$U_{1min.}$  - tensiunea minimă la care mai poate funcționa variatorul.

$$L = \frac{3}{4 \pi} \frac{U_{1min.} t_{st.}}{I_{max.}} = 8 \cdot 10^{-6} H \quad (157)$$

Pentru alegerea tiristoarelor de stingere  $T_2$  și de încărcarea  $T_4$  ca și a diodelor de descărcare  $D_1$  am ținut seama de faptul că curentul ce străbate inductanța L trece o alternanță prin  $T_4$  și alternanța următoare prin  $T_2$  și  $D_1$ .

$$I_{med.} = \frac{1}{2} \frac{I_{Lmax.}}{\pi} \sqrt{\frac{T_0}{T}} = 780 A \quad (158)$$

$T_0$  fiind perioada proprie de oscilație a circuitului oscilant iar T perioada de reglare.

...//...



$$= 103 =$$

In această situație mai ales tiristoare T107...32

Rezistența de descărcare a condensatorului de stingere rezultă din relația

$$R = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} = 0,167 \Omega \quad (159)$$

In ea trebuie să se poată disipa o putere

$$P = L \frac{I_{med.}^2}{2} f = 530 W \quad (160)$$

Diodele din circuitele rezistențelor de descărcare  $D_2$  se aleg ținând seama de faptul că prin ele trece un curent a cărui valoare este dată de relația

$$I_{max.ef} = \frac{1}{2} \frac{I_{max.}}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{f}{f_0}} = 48 A \quad (161)$$

Diodele  $D_{01}$ ,  $D_{02}$  trebuie să poată conduce curenții maxi-  
mi de pornire și de frînare ai motoarelor ținând seama de  
faptul că acești curenți străbat diodele respective numai  
în perioadele când motoarele sînt deconectate de la linia  
de contact. In această situație rezultă un curent mediu  
egal cu jumătate din curentul ce trece prin tiristorul prin-  
cipal. Am ales dioda rapide tip SF 12 HR 315 avînd

$$I_{med.} = 250 A$$

$$U_{max.} = \text{repetitiv } 1200 V$$

$$\frac{d i}{d t} = 200 A/10^{-6} S.$$

Pentru limitarea curentului prin diodă se inseriază o  
inductanță  $L_0$  a cărei valoare rezultă din relația

$$L_0 \left( \frac{d i}{d t} \right) = (U_m)_{max.} \quad (162) \text{ care conduce la}$$

$$\text{valoarea } L_0 = 3,75 \cdot 10^{-6} H$$

Pentru dimensionarea elementelor filterului de rețea  
( $L_e$ ,  $C_e$ ) am ținut seama de următoarele condiții: [18,35,94]

$$\frac{1}{3} < \frac{I_c}{f} < \frac{1}{2} \quad (163)$$

...//...

$$= 104 =$$

$$\frac{(\Delta U_{C_e})_{\max.}}{U} = \frac{I}{8 U C_e f} < 0,1 \quad (164)$$

$$\frac{(\Delta I_{L_e})_{\max.}}{I} = \frac{T^2}{32 L_e C_e} < 0,15 \quad (165)$$

Alegîndu-se  $f_e = 135 \text{ Hz}$  din relația (164) rezultă:

$$L_e \cdot C_e = 1,4 \cdot 10^{-6} \quad (166)$$

Această valoare trebuie să satisfacă și ultima relație:

Pe această bază din relațiile (164) (166) rezultă

$$C_e = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ F} \quad (167)$$

$$L_e = 0,36 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

Pentru protecția ventilelor împotriva supratensiunilor datorate efectului de stocaj s-a conectat în paralel cu fiecare ventil cîte o rezistență înseriată cu un condensator.

Egalizarea tensiunilor pe ventilele conectate în serie este asigurată prin devizoare de tensiune pur ohmice.

Protecția tiristoarelor principale împotriva suprasarcinilor și scurtcircuitelor este realizată prin siguranțele ultrarapide  $e_1, e_2$  alese astfel încât în permanență integrala limită de sarcină  $I^2 t$  a tiristorului să fie superioară celei a siguranței. Pentru protecția la suprasarcini de durată se folosește un dispozitiv de protecție cu tranzistoare.

Pentru calculul rezistențelor de egalizare statică am folosit relația

$$R = \frac{n \cdot U_e - U_t}{(n - 1) I_{b \max.}} \quad (168)$$

$$P = \frac{\left(\frac{U_{\max.}}{n}\right)^2}{R} \quad (169)$$

unde

- R - valoarea rezistenței
- n - numărul de semiconductoare legate în serie.
- $U_e$  - tensiunea maximă repetitivă admisă pe element.
- $U_t$  - tensiunea totală aplicată șirului de semiconductoare înseriate.

$$= 10^5 =$$

- $I_{bmax.}$  - curentul direct maxim la blocare la tiristoare și invers. la diode  
 $P$  - puterea disipată în rezistență;  
 $U_{max.}$  - tensiunea maximă de lucru la bornele șirului de ventile.

Dimensionarea elementelor R C ale circuitelor de egalizare dinamică a tensiunilor pe ventile am făcut-o pornind de la sarcina reziduală.

$$Q = \frac{d i}{d t} (t_2 - t_1) \quad (179)$$

care conduce la un dezechilibru de tensiuni.

$$U = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta Q}{C} \quad (171)$$

Din (171) rezultă valoarea capacității condensatorului pentru o valoare U admisă.

Valoarea rezistenței rezultă din condiția că la trecerea în conducție curentul de suprasarcină să fie limitat la o valoare acceptabilă pentru semiconductoare și ca constantă de timp R C să fie destul de mică.

Multe firme recomandă pentru ventile semiconductoare de putere rapide (utilizabile la tracțiune electrică).

$$R C = (5 - 20) 10^{-6} S \quad 92$$

Capacitatea condensatoarelor pentru protecția diodelor  $D_1$

și  $D_2$   
rezultă

$$C_1 = \frac{50 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 250} = 0,1 \cdot 10^{-6} F \quad (172)$$

Capacitatea condensatoarelor pentru protecția diodelor  $D_0$

rezultă

$$C_2 = \frac{100 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 250} = 0,2 \cdot 10^{-6} F \quad (173)$$

Capacitatea condensatoarelor pentru protecția tiristoarelor  $T_1, T_3$  rezultă

$$C_3 = \frac{800 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 200} = 2 \cdot 10^{-6} F \quad (174)$$

Capacitatea condensatoarelor pentru protecția tiristoarelor

$$T_2, T_4 \text{ rezultă } C_4 = \frac{600 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 200} = 1,5 \cdot 10^{-6} F \quad (175)$$

### 6.3. Determinarea curenților prin motoarele de tracțiune [ 153 ]

Relațiile (32), (37), (38), (82), (83), (85), (99), (100), (101) pentru calculul curenților în regim de tracțiune și în regim de frînare pot fi aduse la o formă mai operantă dacă se dezvoltă în serie termenii exponențiali și se neglijează infiniții mici de ordin superior obținându-se relațiile simplificate:

- Pentru regimul de pornire

$$I_{\max.} = \frac{1}{r} (\delta U_1 - a_1 V) \quad (176 \text{ a})$$

$$I_{\min.} = \frac{1}{r} \left[ \delta U_1 \left( 1 - \frac{1-\delta}{z_1} T \right) - a_1 V \right] \quad (176 \text{ b})$$

$$I_m = \frac{1}{r} U_1 \left( 1 - \frac{1-\delta}{2 z_1} T - a_1 V \right) \quad (176 \text{ c})$$

- Pentru funcționarea în regim cvazistaționar

$$I_{\max.} = \frac{1}{r + b_1 V} (\delta U_1 - a_1 V) \quad (177 \text{ a})$$

$$I_{\min.} = \frac{1}{r + b_1 V} \left[ \delta U_1 \left( 1 - \frac{1-\delta}{z_1} T \right) - a_1 V \left( 1 - \frac{1-\delta}{z_1} T \right) \right] \quad (177 \text{ b})$$

$$I_m = \frac{1}{r + b_1 V} \left[ \delta U_1 - a_1 V - \delta \frac{1-\delta}{2 z_1} T (U_1 - a_1 V) \right] \quad (177 \text{ c})$$

- Pentru regimul de frînare reostatică.

$$I_{\max.} = \frac{a_1 V \delta z_2 (1-\delta)(z_1 - \delta T) a_1 V}{(r - b_1 V) [\delta T + z_1(1-\delta) - \delta z_2] (R_f + r - b_1 V) [\delta T + z_1(1-\delta) - \delta z_2]} \quad (178)$$

$$I_{\min.} = \frac{a_1 V z_1 (1-\delta)}{(r + R_f - b_1 V) [\delta T + z_1(1-\delta) - \delta z_2]} + \frac{a_1 V [\delta z_2 - \delta T (1-\delta)]}{(r - b_1 V) [\delta T + z_1(1-\delta) - \delta z_2]} \quad (178)$$

$$I_m = \frac{a_1 V}{r + (1-\delta) R_f - b_1 V} \quad (178 \text{ c})$$

$$= 10^7 =$$

- Pentru regimul de frînare cu recuperare

$$I_{\max.} = \frac{a_1 V}{r - b_1 V} - \frac{U_1}{r} \frac{(\tau_1 - \delta T)(1 - \delta)}{\tau_1} \quad (179 \text{ a})$$

$$I_{\min.} = \frac{a_1 V}{r - b_1 V} - \frac{U_1}{r} (1 - \delta) \quad (179 \text{ b})$$

$$I_m = \frac{1}{r - b_1 V} [a_1 V - U_1 (1 - \delta)] \quad (179 \text{ c})$$

In relațiile (179), (177), (178), (179) s-au notat:

$$V = K^1 n$$

$$a_1 = K_e^1 a$$

$$b_1 = K_e^1 b$$

$$\tau' = \frac{L}{r + b_1 V}$$

$$\tau_1 = \frac{L}{r - b_1 V}$$

$$\tau_2 = \frac{L}{R_f + r - b_1 V}$$

$U_1$  - tensiunea liniei de contact

$r$  - rezistența înfășurării motorului

$L$  - inductanța motorului

$T$  - perioada de rețlare

$\delta$  - raportul ciclic

Variatorul de tensiune continuă utilizat în schema de acționare se caracterizează prin:

$$T = \frac{1}{250} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$\delta_{\min.} = 0,038$$

$$\delta_{\max.} = 0,962$$

Motorul de tracțiune TN - 71. se caracterizează prin:

...//...

- curentul nominal de durată 178 A
- curentul maxim de pornire 350 A
- turația nominală 1630 rot/min.
- rezistența înfășurărilor 0,252 Ω
- inductanța 0,04 H.

Vagonul luat în considerație este un vagon de mare capacitate  $V_3A$  avînd o încărcătură medie:

- masă aderentă 25.600 kg
- masă totală 40.000 kg
- viteza maximă în palier 20 m/s.

Cu aceste date, utilizînd relațiile (176), (177), (178), (179) am calculat valorile curenților prin motoarele de tracțiune:

Pentru regimul de tracțiune schema de acțiune este conform fig. 53.

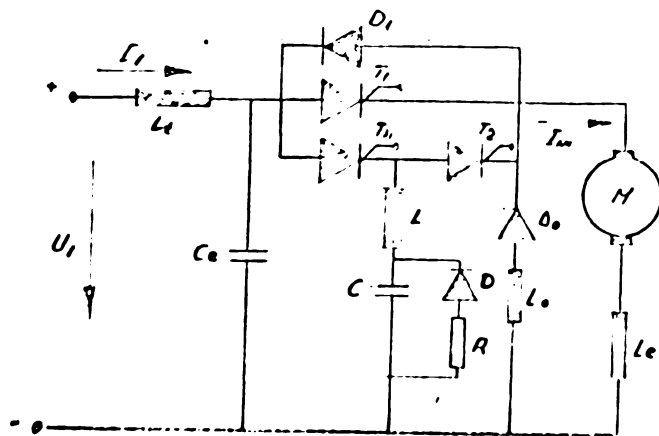


Fig. 53

Valoarea medie a curenților minim de pornire este:

$$I_{m_{\min.}} = \delta_{\min.} \frac{U_{1\min.}}{r} = 95 \text{ A} \quad (180)$$

Curentul maxim de pornire pentru  $U_1 = U_{\min.}$  se obține la  $\delta = 0,15$  și are valoarea

$$I_{m_{\max.}} = 375 \text{ A} \quad (181)$$

.../...

$$= 109 =$$

Cînd motoarele sînt comandate decalat cu o semiperioadă și  $\delta = 0,25$  iar  $U_1 = 750$  V, curentul ondulat prin fiecare motor de tracțiune va avea valoarea medie conform (177 c)

$$I_m = 175 \text{ A} \quad (182)$$

În această situație ondulara curenului este maximă și are valoarea conform (145)

$$(\Delta I_m)_{\max.} = \frac{U_1 T}{16 L} \approx 19 \text{ A} \quad (182)'$$

Cînd  $\delta = \delta_{\max.}$  și  $U_1 = U_n = 750$  V tramvaiul se deplasează cu viteza nominală  $V = 20$  m/s. Din relația (177 c) rezultă

$$I_m = 168 \text{ A} \quad (183)$$

iar ondulara este

$$\Delta I_m = 2,64 \text{ A}$$

Curentul prin motor variază între limitole  $I_{\max.}$ ,  $I_{\min.}$  calculate conform (177 a), (177 b)

$$I_{\max.} = 170 \text{ A} \quad (184)$$

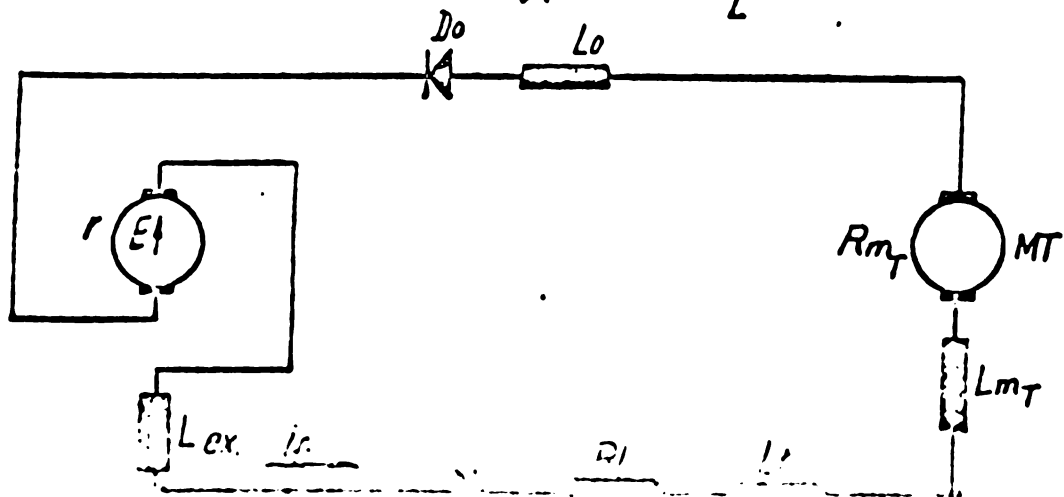
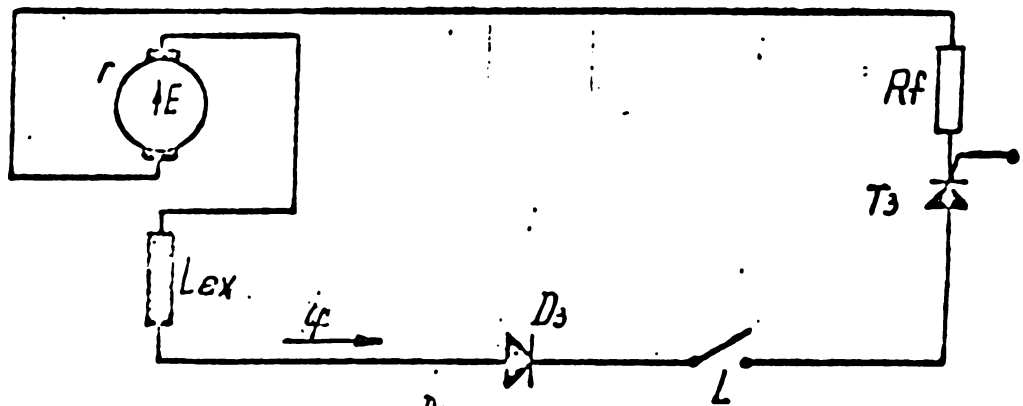
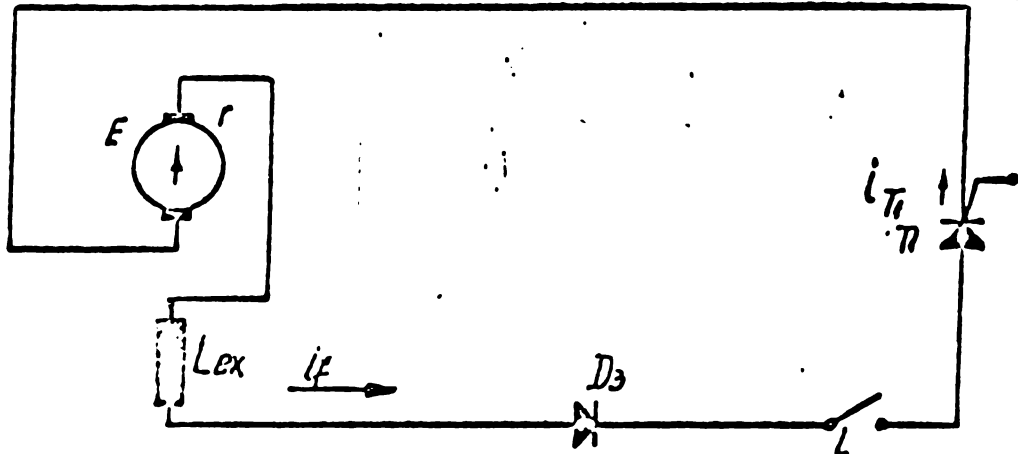
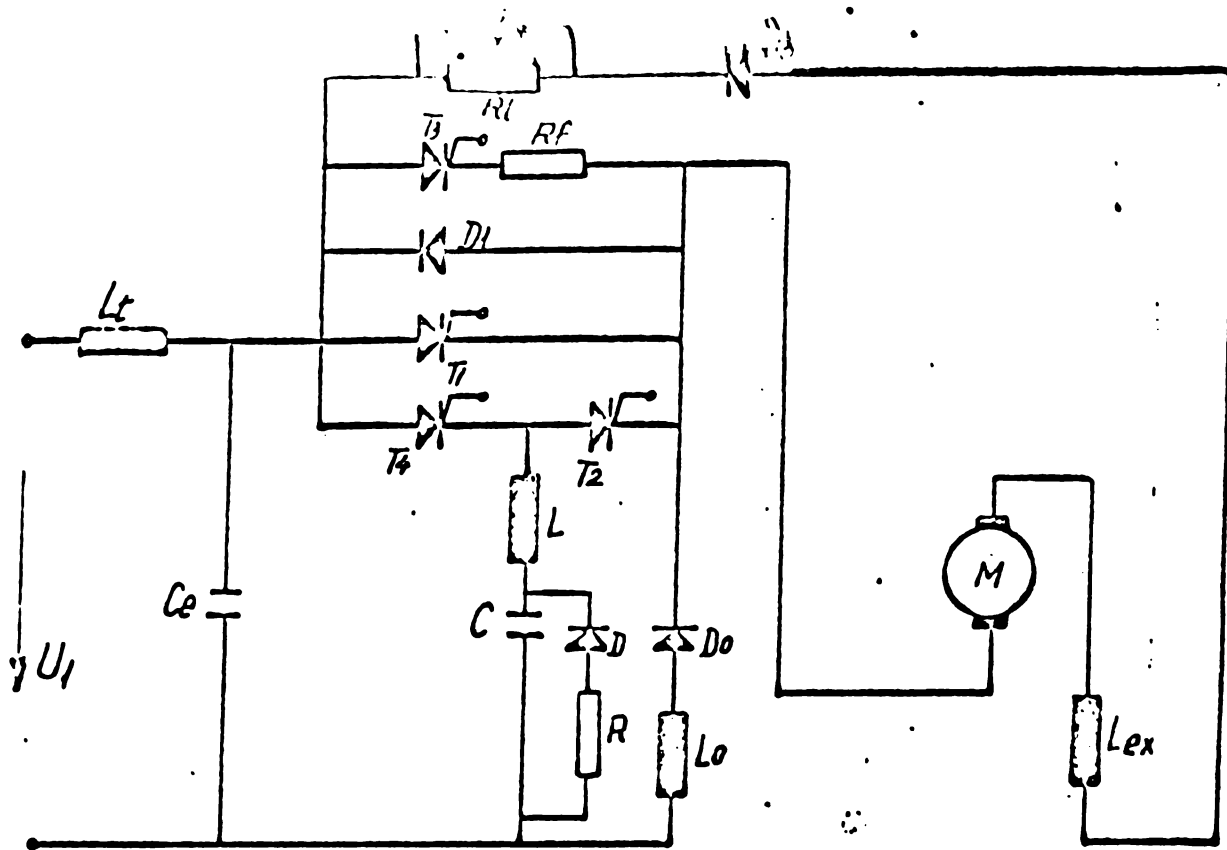
$$I_{\min.} = 166 \text{ A} \quad (185)$$

Pierderile suplimentare în motor determinate de ondulara curenului calculate cu relația (131) pentru  $\delta = \delta_{\max.}$  reprezintă 8,3 % din pierderile nominale corespunzătoare alimentării motorului în curent continuu.

Pentru regimul de frînare la baza calculelor au stat schemele din fig. 54. În figurile 54 a, b, c, d sînt prezentate circuitele ce se formează în cele două situații în care se poate desfășura procesul de frînare. MT din fig. 54 d reprezintă motoarele celorlalte tramvaie aflate în regim de tracțiune pe tronsonul de linie considerat.

Rezistența de frînare dinamică se calculează cu relația:

$$R_f = \frac{E_{\max.}}{I_{f\min.} (1 - \delta_{\min.})} - r = 25 \Omega \quad (186)$$





Rezistența de limitare a curentului de frînare cu recuperare de energie cînd aceasta se desfășoară la viteze mari rezultă din relația:

$$U_{G_{\max.}} - U_{1_{\max.}} = (r + R_1) I_{f_{\max.}} = 2,75 \Omega \quad (187)$$

Folosind relația (178 c) rezultă valoarea medie a curentului de frînare dinamică pentru  $V = 20 \text{ m/s.}$  și  $\delta = 0,69$

$$I_m = 345 \text{ A} \quad (188)$$

#### 6.4. Contribuții privind studiul schemei propuse pentru acționarea tramvaiului prin modelare pe calculator [154], [155] .

Determinarea pe cale experimentală a valabilității relațiilor de calcul deduse este dificilă datorită greutăților în realizarea practică a unei asemenea scheme costisitoare care presupune și procurarea unor componente din import.

În această situație, pentru a urmări calitatea fenomenelor tranzitorii și variația curentului prin motoarele de tracțiune în regim tranzitoriu și cvasistaționar, am modelat schema propusă pe un calculator electronic analog-iterativ tip MEDA 41 TC din cadrul I.C.P.E. - București, echipat pe lângă blocurile analogice de calcul, cu elemente digitale și elemente hibride [152] .

Modelul matematic elaborat presupune o sursă ideală de curent continuu cu rezistență internă nulă, care generează o tensiune fără oscilații  $U$ .

S-a considerat că variatorul de tensiune continuă are o funcționare ideală avînd, în stare de conducție, o rezistență de  $0,01 \Omega$ , iar în stare blocată, o rezistență infinită.

Pentru stabilirea modelului matematic în regim de tracțiune s-a pornit de la ecuațiile ce caracterizează circuitul motorului făcînd următoarele ipoteze simplificatoare:

- s-a neglijat reacția indusului;
- s-a considerat fluxul de excitație constant;
- masa  $m$  a vagonului s-a înlocuit cu o masă echivalentă;

$$m' = K_m m \quad (150)$$

In aceste condiții se scriu ecuațiile:

$$U = r \cdot i_m + L \cdot \frac{d i_m}{d t} + E, \quad (189)$$

$$E = K_e \cdot \phi \cdot v \quad (190)$$

$$m' \cdot \frac{d v}{d t} = F_o - F_r \quad (191)$$

$$F_o = C_m \cdot i_m^2 \quad (192)$$

$$F_r = K_1 + K_2 \cdot v^2 \quad (193)$$

$$L_e \cdot \frac{d i_1}{d t} + U_{C_e} = U \quad (194)$$

$$i_1 = i_2 + i_m \quad (195)$$

$$r \cdot i_m + L \frac{d i_m}{d t} + E = 0 \quad (196)$$

$$U_{C_e} = \frac{1}{C_e} \int i_2 dt \quad (197)$$

unde:

- $i$  - este curentul prin motor A;
- $r$  - rezistența înfășurărilor motorului  $\Omega$
- $L$  - inductivitatea circuitului motorului H;
- $v$  - viteza tramvaiului m/s;
- $F_o$  - forța de tracțiune N;
- $F_r$  - forța rezistență în palier și aliniament, N;
- $i_1, i_2$  - curenții din schemă conform figurii 46, A;
- $L_e, C_e$  - elemente de filtrare conform figurii 46 H, respectiv F.

Avînd în vedere transformările de scară:

$$\begin{aligned} t &= \alpha \tau \\ i &= \beta \bar{i} \\ u &= \gamma \bar{u} \\ n &= \delta \bar{n} \\ F &= \lambda \bar{F} \end{aligned} \quad (198)$$

unde mărimile barate sînt tensiuni în calculator corespunzătoare variabilelor reale, iar  $\tau$  reprezintă timpul de calcul,

...''...

- s-au realizat modele analogice din figurile 55, 56  $A_1 \dots A_{10}$ ,  $B_1 \dots B_3$  sînt constante ce rezultă din ecuațiile (18) și (19).

Cu aceste modele analogice s-a studiat schema prezentată în cazul alimentării motorului cu impulsuri de tensiune în diferite situații considerînd că durata relativă de conectare are o variație liniară:

$$\delta(t) = \delta_{\min.} + Kt. \quad (199)$$

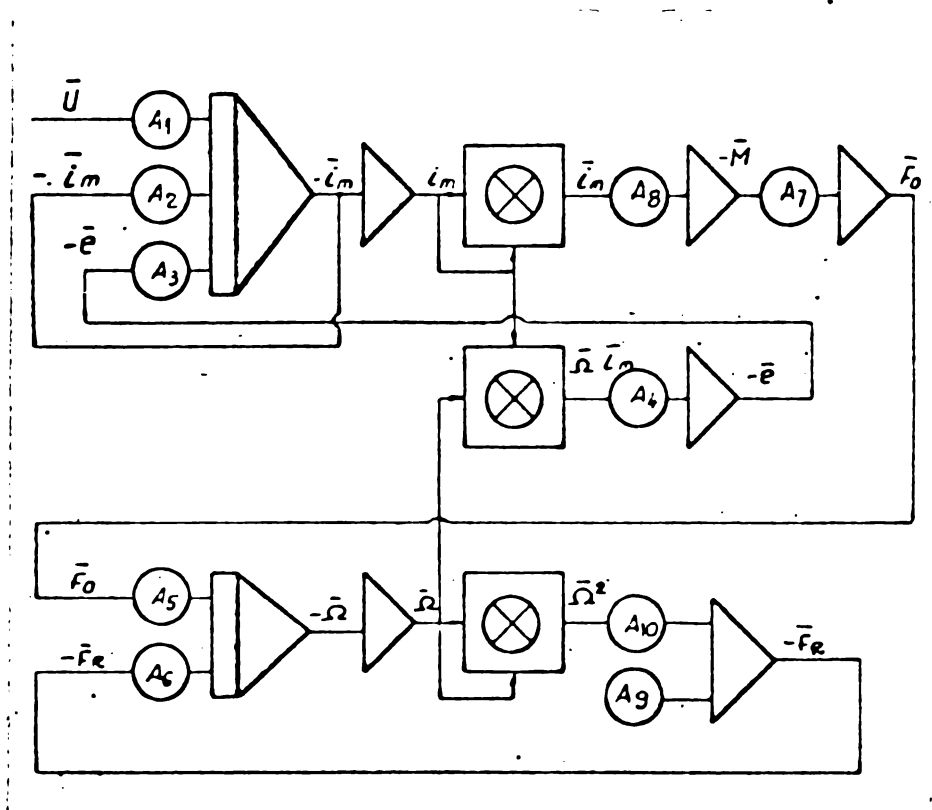


Fig. 55

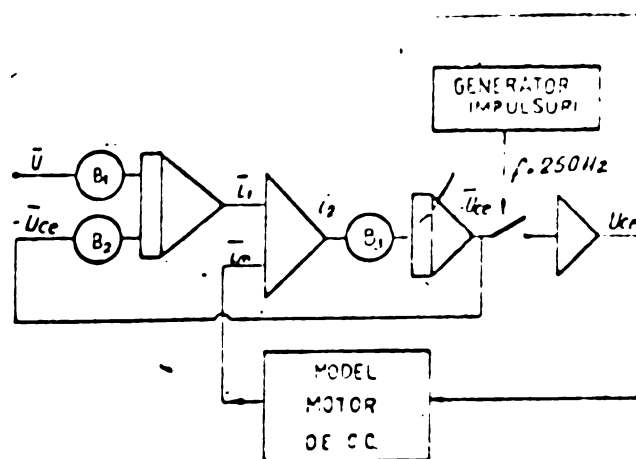


Fig. 56.

In aceste condiții am determinat variația curentului

...!!!

prin motoarele de tracțiune la pornire și în regim de funcționare cvasistaționară și am studiat caracteristica mecanică a motorului, obținând curbele din fig.57, 58, 59.

Pentru a evidenția justetea rezultatelor obținute cu ajutorul modelului matematic am comparat aceste rezultate cu datele obținute prin calcul.

În fig. 57 este prezentată variația curentului de pornire la sarcina nominală.

Din figură se observă că

$$I_{\max.} = 385 \text{ A}$$

$$I_{\min.} = 360 \text{ A}$$

$$I_m = 373 \text{ A}$$

Față de valoarea rezultată din calcul conform (176) apare o diferență de 10 A respectiv o eroare de 2,67 %.

În figura 58 este prezentată variația curenților prin motor în regim cvasistaționar pentru  $\delta = 0,25$  și  $f = 500 \text{ Hz}$ , respectiv pentru  $\delta = 0,96$  și  $f = 250 \text{ Hz}$ .

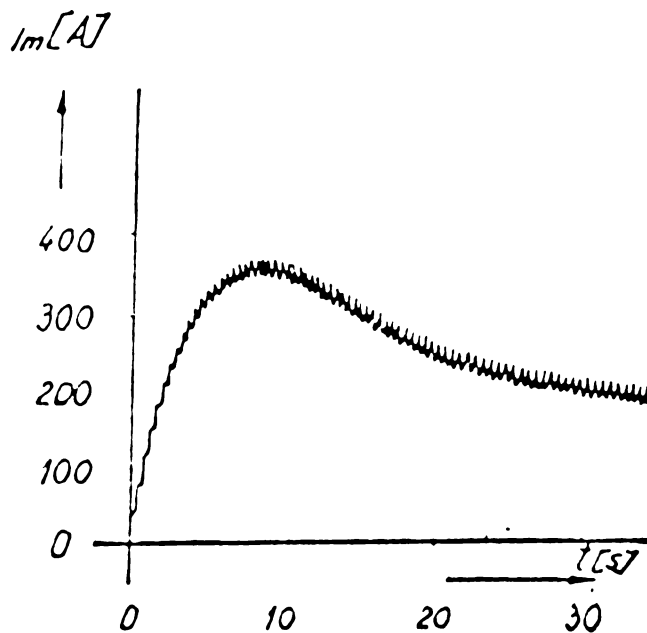


Fig. 57

Se observă că în primul caz (fig.58 a) curentul variază între valorile  $I_{\max.} = 190 \text{ A}$  și  $I_{\min.} = 168 \text{ A}$  avînd ondulara  $\Delta I = 22 \text{ A}$  respectiv 12,3 %.

În cel de al doilea caz (fig.58 b) curentul prin motor variază între valorile  $I_{\max.} = 188 \text{ A}$  și  $I_{\min.} = 179 \text{ A}$  avînd ondulara  $\Delta I = 9 \text{ A}$  respectiv 5 %.

Comparația datelor obținute prin modelare și cele calculate este evidențiată în tabelul 1.

T a b e l u l 1

Date comparative privind rezultatele obținute prin calcul și prin modelare pe calculatorul analogic.

Regimul studiat	$I_{\max.} \quad (\text{A})$		$I_{\min.} \quad (\text{A})$		dif.
	calcu- lat	deter- minat	calcu- lat	deter- minat	
Pornire	390	385	366	360	0
Cvasistațio- nar, corespun- zător la $\delta = 0,25$	184,5	190	165,5	168	2,5
Cvasistațio- nar, corespunzător la $\delta = 0,96$	181	188	174	179	5

Din această comparație rezultă că diferențele ce apar sînt neglijabile și nu influențează concluziile formulate.

În fig. 59 sînt prezentate caracteristicile mecanice ale motorului de tracțiune determinate pe calculator pentru diferite valori ale raportului ciclic. Din analiza acestor curbe se evidențiază influența favorabilă a variatorului de tensiune continuă privind rigiditatea caracteristicilor de tracțiune mai ales în domeniul vitezelor mici.

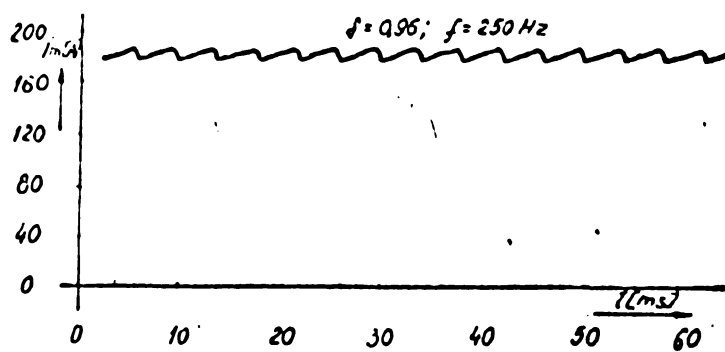
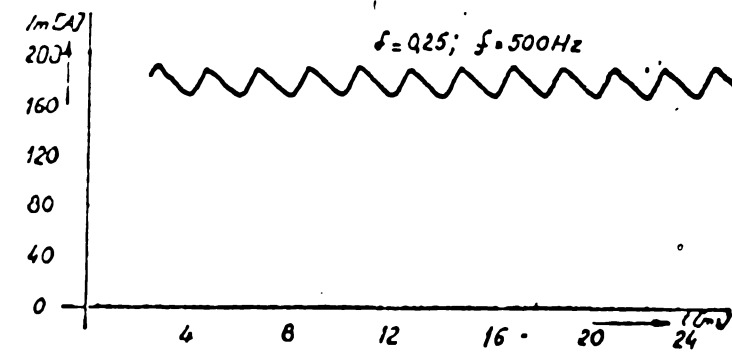


Fig. 58.

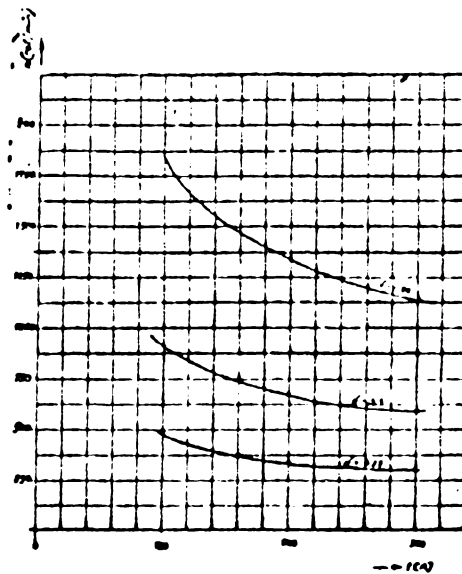


Fig. 59

CAPITOLUL 7. IMPLICATIILE TEHNICO-ECONOMICE  
ALE FOLOSIRII VARIATORULUI DE TENSIUNE CONTINUA  
IN SCHEMELE DE ACTIONARE ELECTRICA A TRAMVAIELOR

Folosirea variatorului de tensiune continuă în schemele de acționare electrică a tramvaielor prezintă avantaje tehnice, avantaje economice și avantaje privind confortul călătorilor și al personalului de bord.

Ca principale avantaje tehnice se menționează:

- caracteristica efort-viteză mai înclinată
- reglajul continuu al efortului de tracțiune în tot domeniu (F.V)
- eliminarea șocurilor de curent la revenirea tensiunii după o întrerupere intempestivă de scurtă durată
- posibilitatea folosirii frânării electrice până la oprirea vehiculului.

Faptul că, caracteristica efort-viteză este mai înclinată prezintă importanță la funcționarea vehiculului pe o anumită caracteristică mecanică deoarece la variații mari ale forței de tracțiune corespund variații mici ale vitezei iar echilibrul la

variația întâmplătoare a forței de aderență se restabilește mai repede și alunecarea roților pe șină se înlătură mai ușor.

Reglajul continuu al efortului de tracțiune în tot domeniul (F.V) ca urmare a aplicării unei tensiuni progresive la bornele motoarelor de acționare rezolvă două probleme deosebit de importante pentru buna funcționare a vehiculului și anume: folosirea deplină a aderenței și îmbunătățirea confortului călătorilor.

Din comparația schemelor cu variator de tensiune continuă prezentate cu schema de acționare clasică conform curbelor analizate în [10] privind variația vitezei și accelerației care asigură cele mai bune condiții pentru confortul călătorilor rezultă:

a) La schema clasică cu reostat de pornire posibilitatea obținerii unor astfel de curbe este îngreunată de faptul că trecerea de la o treaptă a reostatului la alta este însoțită de variația bruscă a curentului de la valoarea minimă la valoarea maximă și invers. Neuniformitatea curentului prin motoarele de tracțiune definită prin relația:

$$K_I(\%) = \frac{I_{\max.} - I_{\min.}}{2 I_m} \cdot 100 \quad (200)$$

conduce la o neuniformitate a forței de tracțiune

$$K_{F_0}(\%) = \frac{F_{\max.} - F_{\min.}}{2 F_m} \cdot 100 \quad (201)$$

respectiv la o neuniformitate a accelerației

$$K_a(\%) = \frac{a_{\max.} - a_{\min.}}{2 a_m} \cdot 100 \quad (202)$$

Forța de tracțiune medie este proporțională cu valoarea medie a curentului determinată prin una din relațiile:

$$I_m = \frac{I_{\max.} + I_{\min.}}{2} \quad (203)$$

$$I_m = \sqrt{I_{\max.} \cdot I_{\min.}} \quad (204)$$

Stiind că în cazul tranvaiului  $I_{\max.} = (1,1 \div 1,2) I_{\min.}$  rezultă

$$I_m = (1,05 \div 1,1) I_{\min.} \quad (205)$$

Pe de altă parte, pentru a evita patinarea trebuie respectată condiția:

$$F_{o_{\max.}} < F_a \quad (206)$$

$F_a$  - forța de aderență

Caracteristica de tracțiune pentru această schemă este dată de relația:

$$F_o = \frac{U_1}{K_1 v + R + r} \quad (207)$$

Panta acestei curbe este dată de relația:

$$\frac{d F_o}{d v} = - \frac{K_1 U_1}{(K_1 v + R + r)^2} \quad (208)$$

Accelerația la pornire

$$\frac{d v}{d t} = \frac{F_o - F_r}{m} \quad (209)$$

este direct proporțională cu forța de tracțiune deci cu curentul pornire.

În cazul schemelor cu variator trecerea de la o viteză la alta se face prin variația continuă a raportului ciclic, aceasta creind posibilitatea asigurării variației vitezei și accelerației după dorință. Neuniformitatea curentului de pornire este neglijabilă și ca urmare sînt eliminate șocurile suportate greu de călători.

Pentru schema din fig. 21 caracteristica de tracțiune este dată de relația

$$F_o = \frac{U_1}{K_1 v + (1 - \sigma)R + r} \quad (210)$$

avînd

$$\frac{d F_o}{d v} = - \frac{K_1 U_1}{[K_1 v + (1 - \sigma)R + r]^2} \quad (211)$$

Avînd în vedere că neuniformitatea curentului la pornire este mică, prin comandă se poate asigura



o accelerație la pornire mai mare însoțită de o utilizare mai bună a aderenței, deoarece în acest caz  $F_{o_{max.}} \approx F_{o_m} < F_a$ .

În schema din fig. 22 caracteristica de tracțiune este dată de relația:

$$F_o = \frac{\delta U_1}{K_1 v + r} \quad (212)$$

avînd:

$$\frac{d F_o}{d v} = - \frac{\delta K_1 U_1}{(K_1 v + r)^2} \quad (213)$$

Din cele de mai sus rezultă că în ceea ce privește uniformitatea forței de tracțiune, accelerația la pornire și folosirea aderenței schemele cu variator sînt avantajoase. Comparînd relațiile (208) (209) (213) se constată că schema din fig. 22 oferă caracteristici de tracțiune mai avantajoase. În plus, pornirea tramvaiului se realizează fără pierderi de energie.

În cazul schemei cu variator de tensiune continuă, din motive care au fost deja explicate este necesar ca schema să fie prevăzută cu dispozitiv de protecție la dispariția sau chiar scăderea tensiunii sub o anumită valoare. Acest dispozitiv întrerupe impulsurile de aprindere a tiristorului principal.

Rezultă deci că la apariția tensiunii în linia de contact variatorul de tensiune continuă asigură ca la bornele motoarelor tensiunea să se aplice progresiv pînă la valoarea nominală. În aceste condiții și curentul va avea o creștere exponențială pînă la valoarea de regim. Acest lucru este deosebit de important atît pentru motor cît și pentru linia de contact mai ales atunci cînd pe o secțiune se aglomerează mai multe tramvaie.

Analizînd pornirea și funcționarea motorului de tracțiune în cele două situații (cu reostat și cu variator de tensiune continuă) se constată următoarele:

Pe lîngă avantajele tehnice, schemele cu variator de tensiune continuă prezintă și avantaje economice cele mai

$$= 120 =$$

importante fiind legate de reducerea consumului de energie electrică absorbită din rețeaua de alimentare și a cheltuielilor de întreținere.

Economia de energie absorbită din rețea poate fi evidențiată prin trei componente:

- energia economisită ca urmare a lipsei reostatului de pornire;
- energia economisită ca urmare a absorbirii din rețea a unui curent mai mic;
- energia economisită ca urmare a posibilității folosirii frînării cu recuperare de energie.

Este nunoscut faptul că la pornirea cu reostat în acesta se consumă o energie a cărei valoare poate fi calculată cu suficientă aproximație folosind relația

$$W_{P_R} = \frac{U}{2} I_{P_m} \cdot t_p \quad (214)$$

unde

$W_{P_R}$  - energia electrică consumată în reostatul de pornire (W.h)

$U$  - tensiunea liniei de contact (V)

$I_{P_m}$  - curentul mediu de pornire (A)

$t_p$  - timpul de pornire (h)

Am considerat că reostatul de pornire are un număr mare de trepte care asigură o variație liniară a tensiunii la bornele motoarelor de tracțiune.

Prin folosirea schemelor cu variator de tensiune continuă la pornire se consumă din rețea o cantitate de energie electrică dată de relația

$$W_{V_P} = \frac{U}{2} \delta I_p \cdot t_p \quad (215)$$

La pornirea prin reostat din rețea se consumă energia

$$W_{R_P} = UI_p \cdot t_p \quad (216)$$

Rezultă

$$\frac{W_{V_P}}{W_{R_P}} = \frac{\delta}{2} \leq 50\% \quad (217)$$

În funcționarea normală economia de energie este determinată de faptul că, așa cum s-a arătat, curentul absorbit din rețea în cazul schemei cu variator de tensiune continuă este mai mic decât la schema cu reostat.

Rezultă

$$\frac{W_{Vn}}{W_{Rn}} = \delta \quad (218)$$

În relația de mai sus s-au notat:

$W_{VP}$  - energia consumată la pornire în cazul schemei cu variator

$W_{RP}$  - idem în cazul schemei cu reostat

$W_{Vn}$  - energia consumată în funcționare normală în cazul schemei cu variator.

$W_{Rn}$  - idem în cazul schemei cu reostat.

Experiența a arătat că economia de energie la pornire și în funcționare în cazul folosirii variatorului de tensiune continuă depășește 38 % [42, 77].

Posibilitatea realizării frînării electrice recuperative în cazul schemei cu variator de tensiune continuă constituie un alt mijloc de economisire a energiei electrice.

La o frînare, energia recuperată este dată de relația:

$$W_f = U \delta I_f t_f \quad (219)$$

unde

$W_f$  - energia furnizată rețelei la frînarea electrică recuperativă (wh);

$U$  - tensiunea la bornele dipolului activ (V);

$I_f$  - curentul de frînare (A);

$t_f$  - timpul de frînare (h);

Un inconvenient al schemelor cu variator în condițiile actuale îl reprezintă costul mai ridicat (cu cca. 50 %) față de schema cu reostat de pornire determinat în mare parte de faptul că aproximativ 60 % din valoarea elementelor care compun schema de acționare se procură din import. Aceasta

problemă va fi însă rezolvată avînd în vedere că programul de asimilări al MICM prevede ca începînd din 1981 IPRS - Băneasa să realizeze tiristoare și diode cu caracteristici care să satisfacă condițiile impuse de schemele de acționare a vehiculelor pentru transportul în comun.

Trebuie menționat de asemenea zgomotul provocat de sistemul de ventilație al variatorului și de inductanțele schemei ca și greutatea și volumul echipamentului aferent schemei cu variator.

Reducerea influenței perturbațiilor provocate de schemele cu variator de tensiune continuă nu poate fi rezolvată numai prin alegerea corectă a frecvenței de lucru a variatorului și a filtrului de rețea. Se impun măsuri suplimentare de separare prin filtre LC, ecranarea circuitelor și a surselor de perturbații, alegerea corectă a traseelor circuitelor etc., toate acestea conducînd în final la scumpirea instalației.

## CAPITOLUL 8. REZULTATE OBTINUTE

Incepînd din anul 1971 am intensificat preocupările pe linia găsirii soluțiilor optime în rezolvarea problemelor legate de utilizarea variatorului de tensiune continuă în acționarea electrică a mijloacelor de transport în comun urban. În acest sens am efectuat studii și experimentări asupra mai multor variante de scheme pentru acționarea troleibuzului și tramvaiului. Experimentările au fost efectuate inițial în laborator pe stand iar apoi în exploatare pe troleibuz și pe tramvai.

Studiile și experimentările au avut ca scop evidențierea comportării și performanțelor variatorului de tensiune continuă, a comportării motorului de tracțiune în condițiile comenzi prin impulsuri de tensiune, a influenței schemei cu variator asupra caracteristicilor de tracțiune și de frînare, asupra instalațiilor de telecomunicații, asupra liniei de contact și asupra economiei de energie electrică.

..//..

### 8.1. Incercarea echipamentelor schemelor cu variator de tensiune continuă pentru acționarea tramvaiului [19, 20, 21, 22, 88, 89, 90, 91]

Realizarea în cadrul I.C.P.E. București a echipamentelor cu variator de tensiune continuă pentru acționarea electrică a troleibuzului și a tramvaiului a impus elaborarea normelor privind încercarea acestora și stabilirea schemelor care să reproducă cât mai fidel condițiile reale de pe vehicul.

Cercetările teoretice au condus la concluzia confirmată în practică, că fenomenele electromagnetice ce se desfășoară în schema de acționare ca urmare a funcționării variatorului de tensiune continuă se manifestă practic prin încălziri suplimentare ale elementelor componente, prin diminuarea performanțelor motoarelor de tracțiune și prin perturbații asupra transmisiilor radio și TV.

Pentru evidențierea încălzirii elementelor schemei și a performanțelor motorului de tracțiune în funcționare de durată la sarcină nominală, ca și a comportării schemei la pornire, la suprasarcină și în regim de frînare am conceput standul de încercare a cărui schemă de principiu este prezentată în fig. 60. Cu ajutorul acestui stand se pot încerca scheme cu variator de tensiune continuă cu puterea pînă la 300 KW și tensiunea pînă la 750 V.

Comanda electronică a variatoarelor se realizează folosind blocurile prezentate în [94]

Cu această schemă am efectuat încercările asupra echipamentului schemei cu variator de tensiune continuă care a fost instalat pe tramvaiul Timiș 1.

Influența schemei cu variator asupra parametrilor funcționali ai motorului este ilustrată în tabelul 2 și în tabelul 3.

..//..

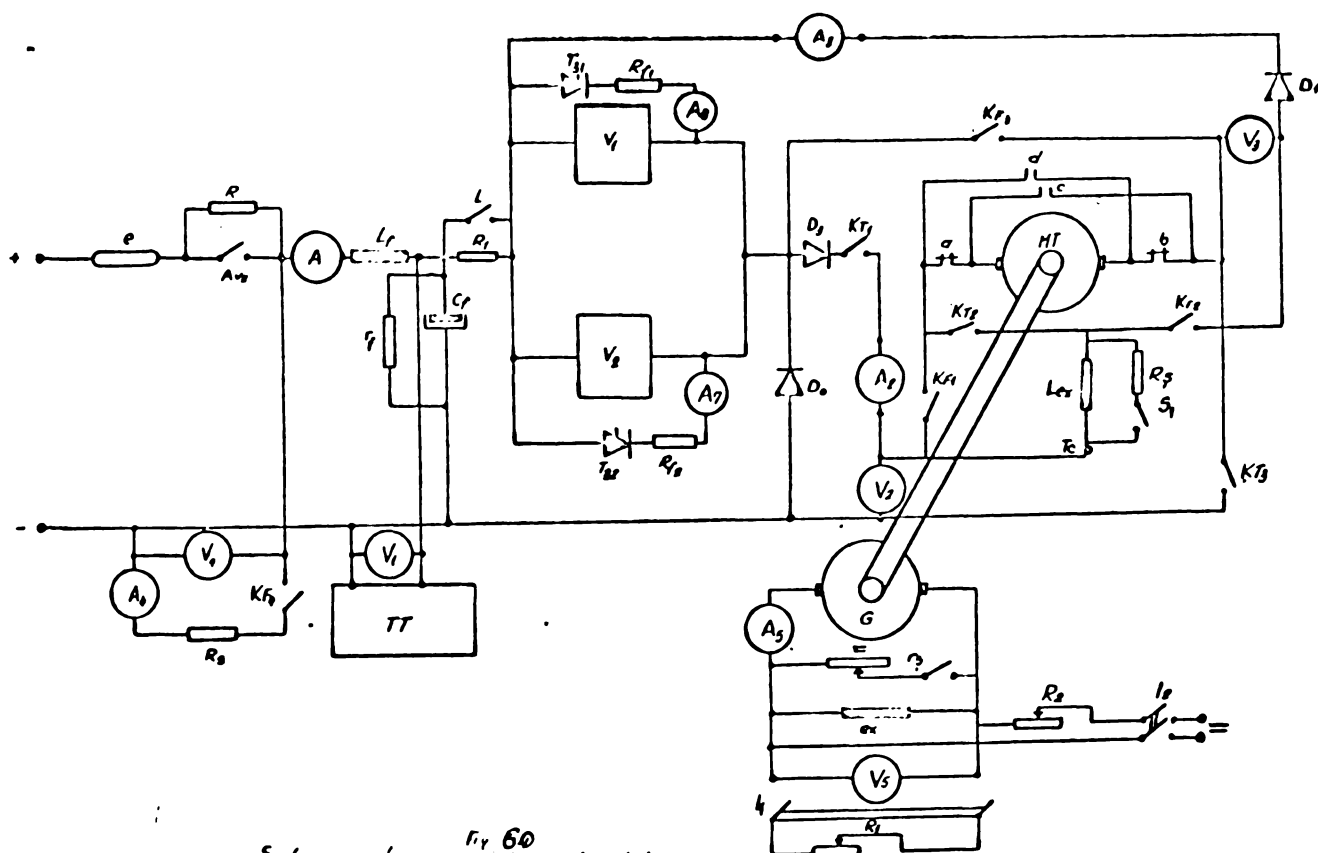


Fig. 60  
Schema de principiu a standului de încercări

Fig. 60

Taboul 2

Rezultatele obținute la încercarea motorului de tracțiune

Mărimea determinată	Valoarea obținută	
	La alimentarea prin variator	La alimentarea directă
Curentul (A)	178	178
Puterea utilă (W)	118,000	120,000
Randamentul (%)	90	91,12
Turația (rot./min.)	1410	1460
Cuplu (Kgfm)	81,5	80
Pierderile în Cu (W)	6871	6825
$P_{H+F}$ (W)	2945	2480

T a b e l u l 3

Variația turaticii în funcție de curentul de sarcină la  $U = U_n$

I (A)	80	120	160	180	200	250	300
n (rot/min) . $n_1$	2250	1780	1525	1460	1375	1275	1180
$n_2$	2075	1650	1450	1410	1330	1230	1145
$\delta = \frac{n_1 - n_2}{n_2} \%$	8,45	6,25	5,17	3,54	3,38	3,66	3,06

$n_1$  - în cazul alimentării directe la sursa de c.c.

$n_2$  - în cazul alimentării prin variator avînd  $\delta = \hat{\delta}_{max}$ .

Motorul a fost alimentat la tensiunea nominală de 750 Vc.c. și s-au trasat caracteristicile prevăzute în STAS atît pentru alimentarea directă de la sursa de curent continuu cît și pentru alimentarea prin variator funcționînd cu  $\hat{\delta} = \hat{\delta}_{max}$ .

Pentru a evidenția influența alimentării prin variator asupra încălzirii înfășurărilor motorului am încărcat motorul la sarcina nominală și a funcționat în serviciu  $S_1$  cu grad de exertație nominal, și ondulare maximă a curentului ( $\hat{\delta} = 0,25$ ) pînă la stabilizarea regimului termic.

Încălzirile înfășurărilor le-am determinat prin metoda variației rezistenței cu temperatura. Datele obținute sînt prezentate în tabelul 4.

T a b e l u l 4

Încălzirile înfășurărilor motorului de tracțiune

Locul de măsurare	Valori obținute ( $^{\circ}C$ )	
	La alimentarea prin variator	La alimentarea directă
Înfășurarea indusului	97,5	91
Înfășurarea de excitație	103	95
Înfășurarea polilor auxiliari	95	78
Înfășurarea de compensație	97	83

Din încercările efectuate rezultă următoarele concluzii:

- La aceeași valoare a curentului mediu prin motor în cazul alimentării prin variator se înregistrează scăderea puterii utile cu 2 %, a randamentului cu 1,5% și a turației cu 3,5 %;
- Pierderile în cupru cresc cu mai puțin de 1 % iar cele în fier cu aproape 20% la alimentarea prin variator comparativ cu alimentarea directă de la sursă de curent continuu.
- Supratemperatura înfășurărilor motorului nu crește cu mai mult de 25 % și nu depășește valorile admise de STAS.
- Ondularea curentului prin motor scade cu creșterea curentului de sarcină și a gradului de excitație.

O categorie importantă de încercări privește variatorul de tensiune continuă și blocurile electronice avînd în vedere condițiile specifice de pe tramvai respectiv variația în limite largi a temperaturii și umidității, vibrații cu diferite frecvențe, șocuri etc.

Pornind de la aceste considerente, atât variatorul cît și blocurile electronice le-am verificat din punct de vedere al menținerii parametrilor funcționali și de securitate la variația temperaturii ambiante între  $-35^{\circ}\text{C}$  și  $+65^{\circ}\text{C}$ ; la umiditatea relativă de 93 - 98% și temperatura ambiantă de  $25^{\circ}\text{C}$ , la vibrații cu frecvența cuprinsă între 20 Hz și 50 Hz și accelerația 3 g și la scuturături cu frecvența de 120 lovituri pe minut și accelerația 3 g conform condițiilor impuse de normele internaționale.

Încercarea echipamentului la temperatura de  $+65^{\circ}\text{C}$  am efectuat-o timp de două ore într-o etuvă termostată, iar încercarea la  $-35^{\circ}\text{C}$  am efectuat-o tot timp de două ore într-o cameră climatică tip NEMA instalată în cadrul laboratorului de cercetări protecții climatice din I.C.P.E. București.

Încercarea comportării echipamentului la umiditate am efectuat-o menținîndu-l timp de 48 ore într-o cameră climatică avînd umiditatea relativă de 95% și temperatura constantă de  $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$  pe toată durata încercării. La sfîrșitul perioadei am verificat rezistența de izolație a circuitelor față de carcasă cu ajutorul unui indicator de 500 V c.c. și rigiditatea dielectrică a izola-



ției aplicînd timp de 1 minut tensiunea de 3000 V, 50 Hz obținută de la o stație de încercare cu puterea de 2500 V.A. Rezistența de izolație a fost de 2,5 MΩ și nu s-au produs conturnări sau străpungeri ale izolației.

Încercarea comportării la vibrații și scuturături am realizat-o cu ajutorul standurilor speciale existente în ICPE care permit alegerea corespunzătoare a frecvenței și accelerației.

Prin această încercare s-a urmărit să se verifice dacă din punct de vedere mecanic echipamentul este suficient de robust iar solicitările respective nu influențează funcționalitatea acestuia. După această încercare am verificat:

- Variația tensiunii la ieșire în funcție de raportul ciclic
- Intrarea în funcțiune a protecției de tensiune cînd tensiunea de alimentare a variatorului scade sub 500 V și deblocarea acestei protecții la creșterea tensiunii la valoarea de 500 V.
- Intrarea în funcțiune a protecției de curent cînd curentul de sarcină depășește valoarea prescrisă.

O altă categorie de încercări a avut ca scop determinarea încălzirii principalelor elemente ale variatorului în regim de funcționare de durată la sarcină nominală.

Încălzirile ventilelor semiconductoare și ale carcaselor condensatoarelor le-am determinat prin măsurători directe cu termocuple, iar încălzirile înfășurărilor inductanțelor prin metoda variației rezistenței. Valorile obținute la stabilirea regimului termic sînt menționate în tabelul 5 pentru o temperatură ambiantă de 25°C. Se constată că valorile obținute nu depășesc limitele admise de standardele în vigoare.

T a b e l u l 5

P E R F O R M A N T E L E

variatorului de tensiune continuă determinate pe baza încercărilor în laborator.

---

Tensiunea la bornele de ieșire ale variatorului

- |          |                     |
|----------|---------------------|
| - maximă | 0,96 U <sub>c</sub> |
| - minimă | 0,03 U <sub>c</sub> |

...//...

...//...

Tensiunea de alimentare la care se produce blocarea semnalelor de aprindere a tiristoarelor principale	
- maximă	900 V
- minimă	500 V
Curentul maxim de sarcină admis de variator	400 A
Supratensiunea maximă la bornele de intrare ale variatorului datorită funcționării acestuia	1070 V <sub>ev</sub>
Supratemperatura maximă a elementelor componente în regim de funcționare de durată la sarcina nominală <sup>x)</sup>	
- tiristoare principale	36,7°C
- tiristoare de încărcare	30,5°C
- tiristoare de stingere	37,2°C
- tiristoare de frînare	31,2°C
- condensatoare	15,7°C
- diode	37,5°C
- inductanțe	77,5°C

---

<sup>v)</sup> Măsurătorile s-au făcut la o temperatură ambiantă de 25°C

- De o importanță tot așa de mare sînt și încercările prin care se evidențiază influența schemelor cu variator de tensiune continuă asupra caracteristicilor mecanice ale motorului de tracțiune, asupra liniei de contacte, asupra instalației de telecomunicații și asupra consumului de energie electrică.

Determinarea efectului perturbator al schemei cu variator de tensiune continuă asupra instalațiilor de telecomunicații se face cu aparatură corespunzătoare de către laboratoare specializate, autorizate de M.P.T.C.

. După încercarea pe stand, echipamentul cu variator de tensiune continuă a fost instalat pe tramvaiul Timiș 1 și supus încercărilor în condiții de trafic.

Experimentările pe care le-am făcut asupra echipamentului instalat pe tramvai au întregit concluziile teoretice privind influența pe care schemele cu variator o au asupra circuitelor de telecomunicații și telecomandă ca și asupra instalațiilor electrice de pe vehiculul echipat cu astfel de schemă și anume:

- Supratensiuni importante și valori  $\frac{du}{dt}$  ridicate care au provocat distrugerea unor ventile semiconductoare.

- Comenzi false în circuitele de comandă a tiristoarelor.

- Inrăutățirea funcționării unor elemente ale schemei de acționare și de comandă ca urmare a modificării stării normale a tranzistoarelor, inductanțelor, etc.

- Comenzi false în circuitele serviciilor auxiliare de pe vehicul care au condus la apariția de semnalizări false.

- Zgomot supărător produs de inductanța filtrului de rețea.

Pe baza acestor concluzii s-au putut lua măsuri de înlăturare a deficiențelor și de găsire a unor soluții îmbunătățite.

Faptul că metodologia de încercare pe stand și pe tramvai este corectă a fost ilustrat de funcționarea tramvaiului echipat cu variator care a parcurs peste 60.000 km. Anexa 1.

## 8.2. Economia de energie electrică

Măsurătorile efectuate de autor împreună cu colectivul de realizare asupra vehiculelor echipate cu variator de tensiune continuă conform schemelor prezentate în [95] au evidențiat faptul că în condiții normale de trafic, vehiculul echipat cu variator realizează un consum de energie electrică cu peste 35 % mai mic decât cel echipat cu reostat de pornire. Astfel la troleibuz pe o distanță de 28 km cu o sarcină de 9,5 t s-a înregistrat un consum de 107 Wh/t.km la schema cu variator și 165 Wh/t km la o schemă cu reostat. Diferența se mărește substanțial în perioadele de vîrf cînd traseele sînt aglomerate și se circulă cu viteză redusă.

## CAPITOLUL 9 . C O N C L U Z I I

Dezvoltarea electronicii de putere a determinat preocupări intense pentru realizarea de scheme cu tiristoare care să poată fi folosite la acționarea electrică a mijloacelor de transport în comun urban.

La ora actuală s-au impus și se extind schemele cu variator de tensiune continuă (Chapper) care prezintă avantajul că folosesc echipamentul de bază existent (linia de contact de curent continuu și motorul c.c. cu exertație serie); asigurând performanțe funcționale și caracteristici tehnice și economice superioare.

Din prezentarea particularităților folosirii schemelor cu variator de tensiune continuă în acționările cu motor de curent continuu cu exertație serie pentru pornire, modificarea turației și frânarea electrică, rezultă avantajele acestor scheme comparator cu schema clasică cu reostat de pornire.

Funcționarea variatorului de tensiune continuă în schemele de acționare electrică a tramvaiului este însoțită de apariția unor fenomene electromagnetice pe baza cărora se poate explica posibilitatea realizării frânării electrice în condiții mult mai avantajoase decât în cazul schemei clasice.

.. In schemele de acționare a tramvaiului este avantajos să se folosească comanda decalată a variatoarelor și dimensionarea corespunzătoare a fiecărui variator pentru a putea comanda ambale motoare de tracțiune.

Schemele cu variator de tensiune continuă oferă condiții bune și avantajoase pentru obținerea unor accelerații la pornire mai mari și cu o variație adecvată pentru preîntâmpinarea șocurilor, pentru folosirea rațională a puterii motoarelor de tracțiune, prin controlul aderenței și înlăturarea pericolului de patinaj, pentru evitarea șocurilor de curent în cazul întreruperilor intempestive și permit obținerea unor economii importante de energie electrică.

Motorul de tracțiune din fabricația curentă a IMEB poate fi folosit cu succes în schemele de acționare cu variator de

tensiune continuă deoarece performanțele acestuia și încălzirea înfășurărilor și miezului nu sînt influențate sensibil de funcționarea variatorului cînd se lucrează cu frecvențe de ordinul sutelor de Hz.

Variatorul de tensiune continuă și echipamentul de comandă aferent funcționează bine la temperaturi ale mediului ambiant cuprinse între  $-35^{\circ}\text{C}$  și  $+65^{\circ}\text{C}$  și umiditate relativă de pînă la 98 % ca și în condiții de vibrații cu frecvența de pînă la 50 Hz, și accelerația de 3 g și scuturături cu frecvența de pînă la 120 lovituri pe minut și accelerația 3 g.

Schemele de acționare cu variator de tensiune continuă și motor de curent continuu cu exertație serie se pot modela pe calculator analogic și în acest fel studierea lor nu mai pune probleme de procurare de echipamente și piese costisitoare.

În cadrul tezei am următoarele contribuții personale:

- Relațiile deduse în capitolul 4 pe baza cărora se determină limitele între care variază curentul prin motorul de tracțiune ca și valorile curentului mediu la pornire, modificarea vitezei și frînare electrică în funcție de raportul ciclic și de elementele circuitului.

- Schema de acționare analizată în capitolul 6.

- Modelarea pe calculator analogic a schemei elaborate și determinarea pe această bază a elementelor schemei și studierea cu ajutorul modelului a comportării acesteia în diferite regimuri de funcționare.

- Elaborarea metodologiei și realizarea standului pentru încercarea echipamentului cu variator de tensiune continuă pentru troleibuz și pentru tramvai.

Nu se poate emite pretenția că problemele legate de utilizarea schemelor cu variator de tensiune continuă pentru acționarea electrică a tramvaiului sînt rezolvate în totalitate și complet.

În țara noastră realizările în acest domeniu sînt doar la început dar suficient de promițătoare pentru a justifica intensificarea preocupărilor atît pe linia cercetărilor pentru fundamentarea teoretică a problemelor noi cît și a elaborării

de scheme și de elemente care să conducă la valorificarea la maxim a avantajelor oferite de acest sistem și la rezolvarea cerințelor privind creșterea fiabilității, reducerea prețului de cost și a gabaritului subansamblilor.

In încheiere autorul aduce calde mulțumiri tovarăgului prof.dr.ing.E. Seracin pentru îndrumarea permanentă și sprijinul acordat la realizarea lucrării, precum și tovarăgilor dr.ing.I.Străinescu și ing.H. Oană și conducerii I.C.P.E. - București pentru ajutor și condițiile create bunei desfășurări a experimentărilor.

PRELUCRAREA DE TRANSPORT IN COMUN  
TIMISOARA

Bv. Leontin Sălăjan 56

nr. de decont. 30.70.6.02.01 B.N.R.S.R. Timișoara

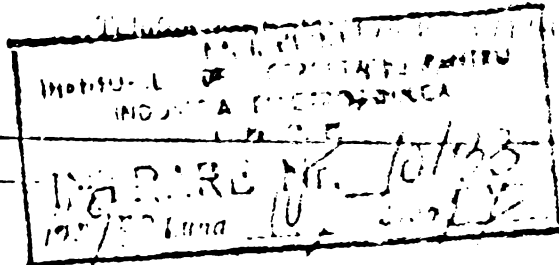
Data 16.04.1979 nr. 4434 dos. DEVE. DPM

Subiect

-----

-----

*Dr. D. Ciocan*  
*16.04.1979*



INSTITUTUL DE RESEARCHURI PENTRU  
INDUSTRIA ELECTROTEHNICA  
- BUCUREȘTI -  
Bul. T. V. Vladimirescu 45-47  
Sector 6

La adresă dvs. nr. 136/2901/79 prin care ne trimiteți a schema  
electrică nouă cu variatoare de tensiune continuă pentru acționarea  
tramvaielor echipate cu două motoare de tracțiune și totodată solicita  
ți date privind comportarea în exploatare a tramvaiului 230, vă comu  
nicăm următoarele:

1/ Având în vedere penuria de energie pe plan național precum  
și posibilitățile tehnice și de execuție creștute în țara noastră,  
apreciem ca oportuna aplicarea schemelor cu variatoare de tensiune  
continuă pt. acționarea tramvaielor.

Considerăm că pentru rezolvarea integrală a problemei, este  
necesar ca schema să asigure și frînarea electrodinamică.

2/ Vagonul Timiș nr. circulație 230 echipat cu variatoare de  
tensiune continuă prezintă următoarele probleme:

- în documentația de execuție nu au fost operate toate modi  
ficările constructive efectuate de ICRP pe vagon în anul experimental  
și în perioada următoare, fapt care creează dificultăți la efectuarea  
reparațiilor și în special la depanarea echipamentului electronic.

- întreținerea vagonului este deficitară datorită necesității  
unei munci mai mari, a lipsei bernelor speciale de control și a  
tehnologiei de control;

- siguranța frînării electrodinamice nu a fost realizată de  
cât după ultimele modificări constructive executate în 1978 în prezent  
efectuându-se în continuare testarea acestuia;

- vechiul bloc de alimentare de j.t. avea fiabilitate scăzută  
(a necesitat înlocuiri) iar noul bloc montat se află în testare;

- filtrul de netezire este prea voluminos;

- echipamentul prezintă un zgomot de fond;

- este necesar ca întregul echipament să fie realizat din  
componente omologate pentru condiții grele de exploatare (de fiabilitate  
tota mare);

- rulajul vagonului este pînă în prezent de 59857 km;

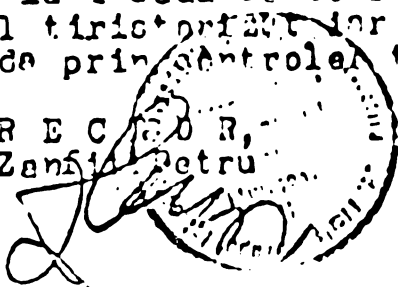
- în ceea ce privește economia de energie, aceasta nu a fost de  
terminată din motive de lipsă de aparate de măsură.

Problema determinării consumului de energie prezintă o deose  
bită importanță pentru întreprinderea noastră, în vederea stabilirii  
rentabilității utilizării pe viitor a tramvaielor cu echipamente tris  
torizate.

Din acest motiv vă rugăm să ne puneți la dispoziție pe o pe  
riodă de cca 6 - 12 luni două contoare de cc. (600V) pe care să le mon  
tăm unul pe tramvaiul trisctorizat iar celălalt pe un tramvai de acela  
și tip avînd însă comanda prin controler tip V3A.

act. -----  
LL/CR  
ex. 3  
Anexa 1

D I R E C T O R,  
Ing. Zambă Petru



INGINER S.E.F.,  
dr. ing. Bujor Gh. Gheorghe

M. I. C. M.

ICPE

10. T. MĂDĂRĂȘTI 16-17-18-19-20-21-22-23-24-25-26-27-28-29-30-31-32-33-34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-45-46-47-48-49-50-51-52-53-54-55-56-57-58-59-60-61-62-63-64-65-66-67-68-69-70-71-72-73-74-75-76-77-78-79-80-81-82-83-84-85-86-87-88-89-90-91-92-93-94-95-96-97-98-99-100-101-102-103-104-105-106-107-108-109-110-111-112-113-114-115-116-117-118-119-120-121-122-123-124-125-126-127-128-129-130-131-132-133-134-135-136-137-138-139-140-141-142-143-144-145-146-147-148-149-150-151-152-153-154-155-156-157-158-159-160-161-162-163-164-165-166-167-168-169-170-171-172-173-174-175-176-177-178-179-180-181-182-183-184-185-186-187-188-189-190-191-192-193-194-195-196-197-198-199-200-201-202-203-204-205-206-207-208-209-210-211-212-213-214-215-216-217-218-219-220-221-222-223-224-225-226-227-228-229-230-231-232-233-234-235-236-237-238-239-240-241-242-243-244-245-246-247-248-249-250-251-252-253-254-255-256-257-258-259-260-261-262-263-264-265-266-267-268-269-270-271-272-273-274-275-276-277-278-279-280-281-282-283-284-285-286-287-288-289-290-291-292-293-294-295-296-297-298-299-300-301-302-303-304-305-306-307-308-309-310-311-312-313-314-315-316-317-318-319-320-321-322-323-324-325-326-327-328-329-330-331-332-333-334-335-336-337-338-339-340-341-342-343-344-345-346-347-348-349-350-351-352-353-354-355-356-357-358-359-360-361-362-363-364-365-366-367-368-369-370-371-372-373-374-375-376-377-378-379-380-381-382-383-384-385-386-387-388-389-390-391-392-393-394-395-396-397-398-399-400-401-402-403-404-405-406-407-408-409-410-411-412-413-414-415-416-417-418-419-420-421-422-423-424-425-426-427-428-429-430-431-432-433-434-435-436-437-438-439-440-441-442-443-444-445-446-447-448-449-450-451-452-453-454-455-456-457-458-459-460-461-462-463-464-465-466-467-468-469-470-471-472-473-474-475-476-477-478-479-480-481-482-483-484-485-486-487-488-489-490-491-492-493-494-495-496-497-498-499-500-501-502-503-504-505-506-507-508-509-510-511-512-513-514-515-516-517-518-519-520-521-522-523-524-525-526-527-528-529-530-531-532-533-534-535-536-537-538-539-540-541-542-543-544-545-546-547-548-549-550-551-552-553-554-555-556-557-558-559-560-561-562-563-564-565-566-567-568-569-570-571-572-573-574-575-576-577-578-579-580-581-582-583-584-585-586-587-588-589-590-591-592-593-594-595-596-597-598-599-600-601-602-603-604-605-606-607-608-609-610-611-612-613-614-615-616-617-618-619-620-621-622-623-624-625-626-627-628-629-630-631-632-633-634-635-636-637-638-639-640-641-642-643-644-645-646-647-648-649-650-651-652-653-654-655-656-657-658-659-660-661-662-663-664-665-666-667-668-669-670-671-672-673-674-675-676-677-678-679-680-681-682-683-684-685-686-687-688-689-690-691-692-693-694-695-696-697-698-699-700-701-702-703-704-705-706-707-708-709-710-711-712-713-714-715-716-717-718-719-720-721-722-723-724-725-726-727-728-729-730-731-732-733-734-735-736-737-738-739-740-741-742-743-744-745-746-747-748-749-750-751-752-753-754-755-756-757-758-759-760-761-762-763-764-765-766-767-768-769-770-771-772-773-774-775-776-777-778-779-780-781-782-783-784-785-786-787-788-789-790-791-792-793-794-795-796-797-798-799-800-801-802-803-804-805-806-807-808-809-810-811-812-813-814-815-816-817-818-819-820-821-822-823-824-825-826-827-828-829-830-831-832-833-834-835-836-837-838-839-840-841-842-843-844-845-846-847-848-849-850-851-852-853-854-855-856-857-858-859-860-861-862-863-864-865-866-867-868-869-870-871-872-873-874-875-876-877-878-879-880-881-882-883-884-885-886-887-888-889-890-891-892-893-894-895-896-897-898-899-900-901-902-903-904-905-906-907-908-909-910-911-912-913-914-915-916-917-918-919-920-921-922-923-924-925-926-927-928-929-930-931-932-933-934-935-936-937-938-939-940-941-942-943-944-945-946-947-948-949-950-951-952-953-954-955-956-957-958-959-960-961-962-963-964-965-966-967-968-969-970-971-972-973-974-975-976-977-978-979-980-981-982-983-984-985-986-987-988-989-990-991-992-993-994-995-996-997-998-999-1000

INSTITUTUL DE CERCETARI SI PROIECTARI PENTRU INDUSTRIA ELECTROTEHNICA

TELEFON: 31.41.00-31.66.21

CONT. VIRAMENT: 400.16.70.22 B.I. - SAIB

Institutul de Cercetari si Proiectari pentru Industria Electrotehnica	Research and Design Institute for the Electrical Industry	Forschungs- und Projektierungsinstitut für die Elektroindustrie	Institut de Recherches et Projets pour l'Industrie Electrotechnique
---	---	---	---

Sectia CERCETARE CALITATE

Nr. buletin 770 Date 27.10.1973

BULETIN DE ÎNCERCARE

TEMA Incercări de tip pentru omologare

Nr. tema 9121 Nr. crt. ICPE \_\_\_\_\_  
 Pentru produsul Echipament cu tiristoare RT200 pentru  
actionarea vehiculului de tractiune urbană sau unul sau  
doi motoare de c.c.  
 Eticheta produsului prototip Nr. inv. 1  
 Nr. fabricatiei \_\_\_\_\_ Anul fabric. 1973  
 Fabricat de ICPE - Sectia Actionari Tractiune  
 2. SOLICITANT ICPE - Sectia Actionari Tractiune  
 prin adresa nr. cda-26209/73

1. ÎNCERCĂRILE EFECTUATE

de către:	de la:	Semnatura
<u>Ing. Miron Dtru.</u>	_____	<u>[Signature]</u>
<u>Ing. Săușoșcu I.</u>	_____	
<u>Ing. Volcea M.</u>	_____	
<u>Tohn. Ciottos I.</u>	_____	

2. CONCLUZII

Informit de:  
Ing. Miron Dtru.  
 verificat de șef laborator  
Ing. Papagheorghe Olga

3. CONCLUZIA Produsul a corospuns la incercările efectuate.  
Incercările de la pot. 3.1.12. și 3.1.14. din RT se vor  
efectua după instalare pe tramvai. Concluzia privind omolo-  
garea se va formula după efectuarea acestor incercări.

4. APROBAREA DE ȘEF SECȚIEI

Ing. M. Dâmboiu \_\_\_\_\_

5. APROBAREA DE DIRECTOR

Dr. ing. Fl. Tănăsescu \_\_\_\_\_

Buletinul nr. \_\_\_\_\_ din \_\_\_\_\_

NOTA: Incercările se vor efectua în condițiile prezentate în prezentul buletin



1. T E M A

1.1. Identificarea temei

Incercări de tip pentru omologare

1.2. Produsul : ECHIPAMENT CU TIRISTOARE RT200 PENTRU  
ACTIONAREA VEHICULELOR DE TRACȚIUNE URBANA  
CU UNUL SAU DOUA MOTOARE DE C.C.

1.3. Cărbacteristici tehnice

- tensiunea nominală 750 V
- curentul unioar 225 A
- puterea nominală unioară 150 kW
- tensiunea de ieșire din  
reglor modificată continuu între 8% și 95%  
din tensiunea rețelei
- frecvența pulsațiilor max. 350 Hz  
min. 120 Hz
- curentul de pornire 350 A

1.4. Nr. bucăți încercate : 1

2. NECESITATE SI MOTIVARE

Incercările au fost solicitate de ICPE - Secția  
Acționări - Tracțiune în cadrul comenzii 26209/73

3. NORME DE INCERCARE

Incercările s-au efectuat conform normei interne  
elaborate de ICPE și discutate cu factorii interesați  
în ședința din data de 22.05.1973

4. PROGRAMUL SI REZULTATUL INCERCARILOR

4.1. Verificarea de ansamblu și de bună execuție a  
echipamentului

S-a efectuat conform NI pot. 4.1.

Rezultat : corespunde

4.2. Verificarea funcționării corecte a blocului de alimen-  
taro și a blocului de comandă pentru variația tensiunii  
la bornele acumulatorului de pe vehicul între 21V și  
29 V



de joasă tensiune și de 2500 V pentru cele legate la tensiunea rețelei obținându-se valori mai mari de 20 Mohm.

Rigiditatea dielectrică s-a verificat la tensiunea alternativă de 50 Hz având  $1 kV_{ef}$  pentru blocurile de joasă tensiune și  $3 kV_{ef}$ , pentru cele legate la tensiunea rețelei.

Rezultat : corespunde

4.9. Verificarea la încălziri

S-a efectuat conf. pot. 4.9. din N.I. echipamentul funcționând timp de o oră la curentul nominal de 225 A. Temperaturile măsurate sînt sub valorile prevăzute în N.I.

Rezultat : corespunde

Încercarea s-a repetat pentru curentul de suprasarcină de 300 A timp de 3 minute.

Rezultat : corespunde

4.10. Rezistența la umiditate

Echipamentul a fost ținut în camera climatică timp de 48 ore la umiditatea de 95% și temperatura 20°C. S-a verificat rezistența de izolație și rigiditatea dielectrică.

Cutia inductanțe	40 Mohm
Variator tiristoare	8 Mohm
Inductanță filtru	2,5 Mohm
Transformator impuls	200 Mohm
Condensator filtru	80 Mohm

Rezultat : corespunde

4.11. Rezistența la vibrații

S-a efectuat în următoarele condiții :

- frecvență 20 Hz
- accelerație 3 g
- durată 2 ore

Rezultat : corespunde

4.12. Verificarea funcționării corecte la temperaturile



DR. T. VLADIMIRESCU Nr. 45-47  
BUCHURESTI 6

TELEFON: 01.400-3176.20  
C/III MIRAMIR: 400.16.70.22 01 - SPAN

Институт исследования и проектирования для электротехнической промышленности	Research and Design Institute for the Electrical Industry	Forschung und Projekt-Institut für die Elektroindustrie	Institut de Recherches et Projets pour l'Industrie Electrotechnique
--	---	---	---

CERCETARE CALITATE

Nr. buletin 250 26.III.74

DECLARATIE DE AUTENTICITATE

Incereri de tip partial

1. TEMA

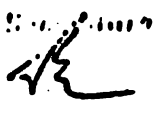
Nr. temă 9121 Nr. cit. ICPE:  
Pentru produsul: Echipament cu tiristoare pentru acționarea vehiculelor de tracțiune urbană.

Felul produsului: prototip Nr. inv.: 1  
Nr. fabricație: ICPE Anul fabric.: 1973  
Fabricat de: ICPE

2. SOLICITANT

prin adresa nr. 26209/73

3. INCERCARILE EXECUTATE

de către: ing. Miron D. de la:   
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
cu conducerea:

4. BULETINUL

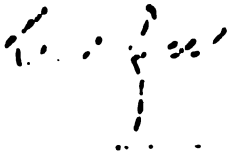
elaborat de: ing. Miron D.  
verificat de șef laborator: ing. Popogheorghe O. 

5. CONCLUZIA:

Produsul a corespuns la încercările efectuate.  
Având în vedere și rezultatele din buletinul nr. 770/73. Se propune omologarea.

6. APROBAT DE ȘEF DE SECȚIE

ing. M. Dâmboiu

APROBAT DE DIRECTOR:  
ing. I. Tanasosca 

I. T E M A

- 1.1. Incercări de tip parțiale.
- 1.2. Produsul : Echipament cu tristoare MT.200 pentru acțiunea vehiculelor de tracțiune urbană cu unul sau două motoare de c.c.
- 1.3. Nr.bucăți încercate : 2
- 1.4. Caracteristici tehnice :
  - tensiunea nominală : 750 V sau 600 V
  - curentul nominal : 255 A
  - puterea nominală unioară : 150 kW

II. Necesitate și motivare

Incercările au fost efectuate la cererea Societii Acționari-Tracțiune din ICPS pentru completarea buletinului nr.770/73 în vederea omologării prototipului.

III. Rezultatul încercărilor

- 3.1. Incercarea la duranta.

Echipamentul s-a montat pe vehicul și a funcționat timp de 72 (șaptezecișidouă) ore. Tramvaiul a fost încărcat cu sarcina nominală de 14 tone.  
Echipamentul s-a comportat bine.  
Rezultat - corespunde
- 3.2. Verificarea echilibrului curenților prin cele două motoare.

Verificarea s-a efectuat sub sarcina nominală atât la pornire, cât și în funcționare conform N.I. pct.4.16.  
Rezultat - corespunde

IV. Concluzii

Echipamentul a corespuns la încercările efectuate.  
Având în vedere și rezultatele din buletinul nr.770/73 se propune omologarea.

- 141 -  
B I B L I O G R A F I E

- 1° x x x - Anwendungsmöglichkeiten von Frequenzthyristoren aus der UdSSR. Mitteilung der Zentralen Leitstelle für Applikation im Elektronikhandel Berlin. In: Elektrik, RDG, 25 nr.6 iunie 1971 p.159
- 2° Andrușciuk, V.V. - Analiz elektromagnitnih proteșov tirstornih Sirotne impulsnih preobrozovatelei. In: Elekticestvo, URSS, nr.2, febr. 1973 p.36-39
- 3° Bihoi, Gh. - Contribuții la îmbunătățirea performanțelor locomotivelor Diesel - electrice prin slăbirea continuă a cîmpului motoarelor electrice de tracțiune cu excitație serie, cu referire la locomotiva Diesel electrică CFR 060-DA și 060-DA-1. Teză de doctorat - Timișoara 1974.
- 4° Bossi, J.H. Löcker, H. Winkler, K. - Couplage de convertisseurs de traction sous caténaire à courant alternatif et continu. In: Bulletin de L'Association Suisse des Electriciens nr.1-1971 p.6-17.
- 5° Buckel, R.M. - Repercussion de la Commande par thyristors d'engins - moteurs de Chemins de fer à courant continu ou alternatif sur des installations de télécommunications et de signalisation. In: Bulletin de L'A.S.E. nr.1. 1971, p.66 75.
6. Boileau, R. - L'électricité dans les transports. L'électricité et les transports sur rail. La freinage électrique des engins de traction. In: Revue Général de L'Électricité, Franța Tomul 52, nr.5, mai 1973 p.345-361 ; // :

- 7° Buyse, H., Woitrin, D. - Accélération et freinage progressifs des véhicules électriques.  
In: Revue Générale de L'Electricité, Franța Tomul 52, mai 1973, p.360-365.
- 8° Bochi, G. - Actionarea reversibilă a motoarelor de c.c. cu tiristoare.  
In: Electrificazione, Italia, nr.5 mai 1971 p.257-260.
- 9° Berliou, R. - Les thyristors, organes de commutation en courant continu  
In: Revue Générale de L'Electricité, Tomul 79, nr.11, dec.1970 p.907-913.
- 10° Boțan, V.N. - Reglarea vitezei sistemelor de acționare electrice. Editura Tehnică, București 1974.
- 11° Bogoevici, N., Brașon, M., Seracin, E. - Acționări electrice. Probleme și aplicații industriale.  
Ed. Tehnica - București 1963.
- 12° Brașovan, M., Seracin, E. - Metode noi de proiectare a acționărilor electrice.  
Ed. Academiei R.S.R. București 1968
- 13° Baechler, U. - Répercussions causées par des véhicules moteurs alimentés par thyristors.  
In: Bulletin ASE nr.1., 1971, p.76-79.
- 14° Cassie, A. - Compte rendu d'essais et de mesures à la S.N.C.F. sur des engins de traction équipés de hacheurs.  
In: Revue Générale de L'Electricité, Franța, nr.4, mai 1973, pag.249-253.
- 15° Cassie, A. - Les applications des thyristors en traction électrique.  
In: Revue Générale de L'Electricité Franța nr.6, iunie 1971, p.509-519.
- 16° Chauprade, R. - Les thyristors dans les systèmes de conversion d'énergie.  
In: Revue Générale de L'Electricité Franța, nr.5, iunie 1971, p.431-436.



17. Cochat, Marcel - Le Véhicule électrique urbain.  
In: Revue Française de L'Electricité  
nr.237,1972 , p.24-31.
18. Cantemir, Lorin - Traçtiune electrică. Editura didactică  
Oprisor, Mircea și pedagogică - București 1971.
19. xxx - CEI - Publicație 77- 1968  
Regles applicables à l'appareillage  
électrique de traction
20. xxx - CEI - Publicație 164-1964  
Recommandations dans le domaine des  
grandeurs et unités utilisées en  
électricité.
21. xxx - CEI Publicație 165-1973 - Règles pour  
les essais des véhicules moteurs de  
traction après achèvement et avant mise  
en service.
22. xxx - CEI Publicația 349-1971-Règles ap-  
plicables aux machines électriques  
tournantes des véhicules ferroviaires  
et routiers.
23. Dierkens, F. - Propositions sur des véhicules élec-  
triques.  
In: Electricité, Belgia, nr.147,1971,  
p.37-40.
24. Dubais, R. - Les thyristors, organes de commutation.  
Commutation à la fermeture.  
In: Revue Générale de L'Electricité,  
França, tomul 79, nr.11, dec.1970,  
p.902-906.
25. Demidov, L.S. - Repartiția curentului între tiristoarele  
conectate în paralel.  
In: Elektrotehnika, URSS, nr.6-iunie 1973,  
p.8-11.
26. Daškeviçi, B.A. - Povišenie effektivnosti ispolzovania  
elektricheskoj energii V elektrotransporte  
In: Elektricoostro, URSS, nr.9, sept.1972-  
p.15-19.

- 144 -
27. Dottor, K., Faust, W. - Regleur électronique de c.c. pour un trolleybus  
In: Revue B.B.C. oct. 1966, p. 180-187
28. x x x  
- L'Équipement électrique des nouvelles voitures articulées du pré-metro de la STIB  
In: ACEC Revue nr. 1-1973 p. 3-20
29. Erler, K.  
- Applikation von Lincormotoren im Transportwesen. In: Elektrik, RDG 25, nr. 6, juin 1971, p. 211-212.
30. x x x  
- Elektrofahrzeuge in der BRD.  
In: Elektrik, RDG 27, nr. 5, mai 1973 p. 231-232.
31. x x x  
- Entwicklung von Elektromobilen.  
In: Elektrik, 27 nr. 11, nov. 1973, p. 570
32. Efremov, I.S. Mosiagin, G.K.  
Rozenfeld, E.U.  
- O vibore optimalnogo napriajenia dla linii skorostnogo tramvaia.  
In: Elektricitstvo URSS nr. 10, oct. 1972 p. 73-78
33. First, Antonia  
- Frimenenie impulsnogo preabrozovatalia postoiannog toka V tramvaiah tipa T i KT 3-ia mejdunarodnaia noucino, tehnicoskaia konferenčia ob elektronnih avtomatizirovannih privodah.  
CSSR, Praga, oct. 1971.
34. Feller, F.  
- Fortschritte bei der Putschsteuerung von Gleichstromfahrmoztren.  
In: Elektrik, RDG, 25, nr. 6, juin 1971 p. 223-225.
35. Gouthiere, J.,  
Gregoire, J., Hologne, H.  
- Les magneurs a thyristors en traction électrique  
In: ACEC Revue nr. 2-1970.
36. Gaudichon, M.  
- L'Électricité dans les transports sur rail. Emploi des thyristors en traction électrique. In: Revue Générale de L'Électricité, France, Tomul 82, nr. 5, mai 1973, p. 335 - 344.
37. Geiger, D.E.  
- Duty cycle speed control of low inductance c.c. motors.  
In: Control Engineering, SUA, 20 nr. 11 nov. 1973, p. 69-71.

38. Glozenko, T.A. - Poluprovodnikovie preabrozovalotf v elektrificadah postainnogo toka. Ed. Energiya, Leningradskor Otdelenie 1973.
39. Germanier, R. și Hintze, H. - Determination du circuit de puissance des véhicules moteurs à thyristors alimentés en courant alternatif. In: Bulletin ASS nr.1, 1971, p.46-54.
40. Hennebert, C. - Essais et mesures de perturbations dues à une motrice à hachure de courant In: Revue, Générale de L'Electricité, Franța nr.4, aprilie 1973, p.254-258.
41. Hvostov, S.V., Gavrilov, J.I.A. - Vagon metropolitens s impulsnim reguliravaniem skoroste pri puske i tormojenii. In: Elektricesstvo, URSS nr.9., sept.1972 p.19-25.
42. Jeany, F. - Thyristorové řízení pohonu - cesta k racionalizaci spotřeby energie. (Reglarea tiristorică a acțiunilor - calea raționalizării consumului de energie). In: Elektrotehnika, RSCS, nr.11, 1973 p.318-321.
43. Jacques, L. - Les véhicules électriques. Aperçu des réalisations actuelles. In: Bulletin - SREF, Belgia, an 89, nr.2, 1973, p.103-109.
44. Jeany Frantisek - Thyristorové řízení pohonu tramvaje - racionalni vyuziti energie v tramvajové dopravě. In: Elektrotehnik RSCS nr.5, mai 1973 p.126-129-
45. Kapustion, D.I. - K.viboru shemf tiristornogo preabrozovalotelia elektrovazov poromonnogo toka s recuperativnim tormojeniem. In: Elektrotehnika, URSS, nr.6, 1973, p.5-9
46. Kostka Vlastimil - Conceptia și reglarea acțiunii vehiculelor electrice In: Elektrotehnik, Praga ,nr.10.1974, p.296-301.

47. Kill, E. - Die Elektrotechnik in spurgebundenen Verkehr der Zukunft.  
In: E.T.Z.A. RFG, nr.12,44, 1973, p.717-725.
48. Kolosnikov, M.V. - Obratimie preobrazovatelii i nekotore voprosi teorii venteluin shon.  
In: Elektricesstvo, URSS nr.9, sept. 1972, p.30-36.
49. Klein, Denys - Les moteurs linéaires nouvelles. Jeunesse des transports collectifs.  
In: Revue Française de L'Electricité nr.239, 1972, p.58-72.
50. Kollax, E.W., Foley, P.E. - Semi-conducteurs de puissance pour engins moteurs à redresseurs de la Pem Central. Transportation Co.  
In: Bulletin ASE nr.1, 1971, p.35-43.
51. Kulikovskii A.A. - Spravocinik po radio elektronike Tom 3 Izdatelstvo Energia, Moscova 1970.
52. Kosicka, M. - Calculul caracteristicilor mecanice ale sistemelor tiristorizate de acționare electrică.  
In: Prace Instytutu Elektrotechniki EPB vol.23, nr.88, p.109.
53. Leroy, J., Guibereau, S. - Le hacheur de courant Késar en traction. Réalisation et perspectives d'avenir pour le métropolitain.  
In: Revue Générale de L'Electricité, Franța, tomul 82, nr.4, aprilie 1973, p.243-248.
54. Lococinikov, A.L., Orlov, G.E. - K raschetu impulsnoi sistomi regulirvania elektriceskih mašin a no revno vřrahennim moduliatorom sirinĩ impulsov.  
In: Elektricesstvo nr.8., august 1972, p.65-69.
55. Leitenberger, W. - Repousseion des automaticees commandées par thyristors sur le service des installations de signalisation et de télécommunications des voies varrovi-aires.  
In: Bulletin ASE nr.1, 1971, p.80-81.
56. Lowe, T. - Controlul variatoarelor cu tiristoare și introducerea curentului armonic

- în circuitul<sup>44</sup> de cale.  
 In: Proceedings of IEE, Anglia 1974, vol.121,  
 nr.4., pag.269.
57. Meyer, Monfred -Über die Kommutierung mit Kapazitivem  
 Energiespeicher.  
 In: E.T.Z., RFG nr.2, febr.1974, p.79-85.
58. Mraz, František-La système de réglage par impulsions à  
 thyristors, du trolleybus Skoda.  
 3-ia mejdunarodnaia naucno- tehnicaskaia  
 konferenția ob elektronaih avtomatizirovanih  
 privodeh. CSSR, Praga oct.1971.
59. Moser, E., Pinter, F.-Hochleistungsmotoren für elektrische  
 Triebfahrzeuge.  
 In: Bulletin ASE, Elveția, 65 , nr.5, martie  
 1974, p.321-331.
60. Meyer, Monfred -Tiristoarele în practică. Mutatoarele cu  
 comutație forțată.  
 Ed.Tehnică, București - 1970
61. Mältgen, Gottfried-Tiristoarele în practică, Mutatoarele cu  
 comutație dol la rota.  
 Ed.Tehnică, București 1960.
62. x x x -Memoratorul inginerului electrician.  
 Ed.Tehnica, București ,1974.
63. Miklosi, Corneli  
 și Sora, Constantin-Tracțiunea electrică.  
 Editura de stat didactică și pedagogică  
 București -1961.
64. Meyer, E. -Que attendent les chemins de fer de l'uti-  
 lisation des thyristors sur leurs Engins-  
 moteurs. In: Bulletin de L'Association  
 Suisse des Electriciens.nr.1, 1971,p.1-5.
65. Moser, R. -Le moteur de traction alimenté par ré -  
 dresseur contrôlé ou par hacheur.  
 In: Bulletin ASE nr.1, 1971, pag.19-28.
66. Miron D. -Schemă cu variator de tensiune continuă  
 pentru acționarea electrică a tranvaiului.  
 Dosar OSIM nr.81684/18.III.1975. (Brevet 72289)
67. Miron D. -Cu privire la unele aspecte tehnico-econo-  
 mice ale utilizării schemelor cu tiristoare  
 în acționarea electrică a mijloacelor de  
 transport în comun urban.  
 In: Electrotehnica, Electronica și  
 Automatica nr.1., ian.1976.

68. Miron D.

- Contribuția privind studiul frînării electrice a motoarelor de curent continuu cu excitație serie, utilizate la acționarea vehiculelor destinate transportului în comun, urban, în cazul alimentării acestora prin variația de tensiune continuă.

Comunicare susținută la cea de-a XII-a Sesiune de comunicări științifice a ICPE, București 1976.

69. Miron D.

- Cu privire la modificarea turației motorului de curent continuu cu excitație serie utilizat la acționarea electrică a vehiculelor prin slăbirea cîmpului folosind scheme cu variator de tensiune continuă.

Comunicare susținută la cea de-a XII-a Sesiune de comunicări științifice a ICPE București - 1976.

70. Meintz, K.

- Elektronische Gleichstromsteuerung von aus Fahrlösungen gespeisten Gleichstrom-Triebfahrzeugen.

In: E.T.Z. - A vol.187, nr.5, 1966 p.165-170.

71. Melellan, P.

- Variatoare cu tiristoare ce folosesc un condensator în punte pentru comutare
- In: Proceedings of IEE, Anglia, 1975, vol.122, nr.5.

72. Nikoloff, I.

- Stabilitätsprobleme bei Antrieben mit Gleichstromsteller für fahrleitungsgespeiste, Gleichstromtriebfahrzeuge.
- In: Elektrik, RDG, 26, nr.12 dec.1972 p.269-371.

73. Nikoloff, I. și alții-Gleichstromstellerschaltungen mit Energierückspeisung aus dem Kommutierungskreis.

In: Elektrik, RDG, nr.4, aprilie 1974, p.181-183.

74. Negreanu, A.

- Frecvența optimă la reglarea motoarelor serie de curent continuu prin lățimi de impulsuri de tensiune.

Teza de doctorat 1970

75. Opreșor, M., Diaconescu, M.,  
Moga, V. - Reglarea în impulsuri a motorului  
serie de c.c. In: Buletinul In-  
stitutului Politehnic Iași fascico-  
lele 3-4- 1972, secția III, p.157-16
76. Opreșor, M. și colectiv - Caracteristicile de reglaj pentru  
o schemă îmbunătățită de comandă  
a mașinii serie de curent continuu  
In: Electrotehnica 21(1976)nr.7. p.  
p.259-263.
77. Pieșkalov, V.D., Rogocev, A.I. - Comandă optimă după pierderile  
de energie a unei acționări elec-  
trice pe principiul redresor  
coiandat - motor.  
In: Elektromehanika, URSS, nr.10  
oct.1974, p.1162-1165.
78. Pinciuk, I.S. - Comanda separată a convertizorului  
în punte cu tiristoare debitând  
pe un motor de c.c.  
In: Elektrotehnika, URSS, vol.42,  
nr.10, oct.1971, p.15-17.
79. Peter, M.J. - Die Grenzen des di dt von Thyris-  
toren und Schutzmethoden.  
In: Elektrik, RDG nr.6, iunie 1971  
p.266-267.
80. Peter, M.J. - L'Evolution des équipements et  
électroniques sous l'influence  
des thyristors.  
In: Revue Générale de L'Electricité  
Tomul 79, nr.11, dec.1970, p.914-921
81. Pezzani, R. - Limites d'utilisation des thyris-  
tore, triacs et redresseurs de  
puissance en régime de impulsions,  
In: L'Electricien industriel,  
Franța, nr.2167, dec.1974, p.369-377
82. Reiche, W. - La commande des convertisseurs de  
courant.  
In: ETZ-A, RDG, vol.95, nr.91, 1974,  
p.446,449.
83. Soloduh, I.A. - O vilianii ventilnogo elektropri-  
voda na pitaiusciuu sot.  
In: Elektrotehnika, ZRSS, nr.10, 1974  
p.75-78.

84. Scholtis, G. - Comenzi tiristorizate pentru acționări feroviare în c.c.  
In: Modern Railways, Anglia, vol.28, nr.277 oct.1971, pag.152-153.
85. Strellon, Downes, J.M. - Controlling speed with thyristor circuits.  
In: Electrical Review, Anglia, nr.19, aprilie 1974, p.402-405.
86. Săvescu M. și alții - Circuite electronice vol.III.Ed.Tehnică, București 1974.
87. x x x - Simpoziu über die Anwendung Sowjetischer thyristoren.  
In: Elektrik, RDG nr.9, sept.1974, p.451-458.
88. x x x - STAS 5679-68 Motoare electrice de curent continuu pentru tracțiunea urbană. Condiții generale.
89. x x x - STAS 1893-72 Mașini electrice rotative. Condiții tehnice generale de calitate.
91. x x x - STAS 7814-73 - Mașini electrice de curent continuu. Metode de încercare.
91. x x x - Secwest, Italia  
Thyristors phase control applications switching applications 1974.
92. Străinescu Ion - Variator de curent continuu cu tiristoare. Dosar OSIM nr.16.536/1974.
93. Străinescu, Ion, Dan, Ion-Sistem și echipament pentru acționarea vehiculelor echipate cu două sau mai multe motoare de curent continuu cu excitație serie.  
Brevet de invenție nr. 79832.
94. Străinescu Ion - Contribuții la schemele automate optime de acționare curent continuu-curent continuu în tracțiunea electrică cu aplicație în tracțiunea urbană în R.S. România.  
Teza de doctorat, București 1974.
95. x x x - Drehzahlregler für Gleichstromantriebe mit Thyristoren.  
In: Biuletten tehniko ikonomicoskoi informacii, URSS, nr.9, 1974, p.37.
96. Thierolf, H. - Drehzahlregler für Gleichstromantriebe  
In: EMA, RFG, Vol.53, nr.10, 1974, p.104-106



- 151 -
97. Timmel, H., Kahus, H.K. - Bemerkungen zur Zweipunktgeschwindigkeitsregelung von Linearmotorantrieben.  
In: Elektrik, RDG, nr.9, sept.1974, p.484-488.
98. Tunsoiu Gheorghe - Acționări și automatizări electrice  
Ed. Didactică și Pedagogică, București 1968.
99. Venemaus, W.D. - Traction en courant continu à thyristors. Problemes et experiences de N.S.  
In: Bulletin de L'Association Suisse de Electriciens nr.1, 1971, p.29-34.
100. Vondrašek, František - Impulsné preobrazovateli a točící zrcena ccaostvo commutirujícího kontaktu. 3-a Mejdunaradniai naučno-technická konforenčia pe electričeskím automatizirovaním privodam. Praga, oct.1971.
101. x x x - Les Vehicules électriques en Japon,  
In: Electricité automobile et techniques spécialisées nr.419, oct.1974, p.37.
102. x x x - La variation de vitesse des moteurs à courant alternatif de moyennes et grandes puissances par variateurs statiques de fréquences.  
In: ACEC Revue nr.12, 1974.
103. Wagner, Rudolf - Thyristortechnik für Gleichstrombahnen  
In: Siemens Zeitschrift nr.10, oct.1974 p.780-784.
104. Walter, K., Wolf, G.U. Böhn - Zug mit Gleichstrom stellern-Steuernung  
In: Elektrik, Rdg. 26, nr.9, sept.1972, p.219.
105. Zwicky, R. - Bases théoriques de L'Influencement de circuits à courant faible par des enginsmoteurs alimentés par thyristors  
In: Bulletin ASE nr.1, 1971, p.45-55.
106. Proceedings. - Ninth national symposium on reliability quality control.  
San Francisco, ianuarie 1963.
107. Proceedings. - Eighth national symposium on reliability quality control.  
San Francisco, ianuarie 1960.

108. Efemov, U.C. Metodica rasceta termoznoge reas-  
tata v impulsnoi sistema slediasca  
ge elektriceskege tarmojenis.  
In:Elektricesstve nr.8, aug.1970  
p.46-50
109. Miron,D. - Cîteva considerații privind implica-  
țiile tehnico-economice ale utili-  
zării variatorului de tensiune con-  
tinuă în schemele de acționare to  
electrică a tramvaiului.  
In: Electrotehnica 25,nr.6, august 86  
1977 p.240-246.
110. - Les hacheurs à thyristors en trac-  
tion électrique.  
In:ACEC Revue nr.1-2/1976 p.3-22- .
111. Garnier,J.P.Riondel,P.P. - Dispozitive de comandă electrice 62  
pentru vehicule motoare cu tiris-  
toare. ul  
In:Revue Brown-Boveri, Elveția io  
1976 vol.63, nr.3, p.160
- 112 Savoskin, AM.,Feoktiskov,V.P.-Motorul de tracțiune ca element al  
sistemului de reglare automată. i-  
In:I.z.v.u.z.Elektromecanica,URSS  
1976,nr.8,p.829 nr
113. Waidmann, W. - Acționarea cu curent trifazat a  
vehiculelor decurent continuu.  
In:Siemens Zeitschrif,RFG,1976, u.  
vol.50.nr.7,p.493
114. Scăreanu,P, Popovici,D - Variator de tensiune continuă cu  
două pulsuri cu utilizare în trac-  
țiunea electrică.  
In:Buletinul științific al IPT  
Tomul 22, fascicolă 1,ianuarie  
iunie 1977 p.174-176
- 115.Popovici D;Scăreanu,P - 177  
iunie 1977 p.177-178
- 115.Popovici D;Scăreanu,P - Problema energiei recuperate la  
frînarea vehiculelor autonome  
comandate în impulsuri.  
Comunicare prezentată la sesiunea  
de comunicări a IPT 13-15 mai 1977
- 116.Popovici D; Scăreanu. P. -Stabilirea comenzii variatorului

- de tensiune continuă la alimentarea unui motor de c.c.  
In: Buletinul științific și Tehnic al IPT, Tomul 22, fascicola 1 1977 p.174-176
117. Fildan M; Sora I; Seracin, E  
Balaci I  
Studiu și realizarea unei noi soluții de acționare electrică la electrocarul de 3 tone folosind variatorul static de tensiune continuă.  
In: Buletinul Științific și Tehnic al IPT, Tomul 22, Fascicola 1977, p.187-188.
118. Helmut von Mällendorf,  
Rudolf Wagner  
Stromrückgewinnung durch Nutzbremse  
Von Schienenfahrzeugen in Manver  
In: ETZ a nr 6, iunie 1978 p.334-338.
119. Srăinescu, I.  
Echipament electric de acționare pentru autobuz electric. Contract 589/74
120. Bencze, I; Bogosi J. Laszle, T  
Development of DC-AC converters used in vehicles driven by asynchronous motors.
121. Kelemen, A  
Acționări electrice  
Editura didactică și pedagogică București 1976.
122. Murphy J.M.D.  
Thyristor control of A.C motors  
Editura Pergamon Press Oxford 1970
123. Hamod, A.  
Phase-controlled circulating current cycloconverter-induction-motor drive using rotating intragroup reactor.  
In: Proc.I.E.E., Anglia, vol.124, nr. 1977, p.865.
124. Smith, G A  
Static scherbins system of induction-motor speed control  
In: Proc.I.E.E. Anglia, vol.124 nr. 1977 p.557.
125. Garabet, T.  
Utilizarea redresoarelor comandate în acționări electrice  
Editura Tehnică București, 1969
126. Schieman, R.G. Wilkes, E.A.  
Solid-state control of electric  
Jordon, H.E.

drives.<sup>154</sup>

In: Proceedings of the I.E.E.E. USA  
vol.62,nr.12,1974 p.1643.

127. Stretton -Downes, J

Controlling speed with thyristor circuits.

In: Electrical Review, Anglia, vol.194,  
nr.14,1974 p.402.

128. x x x

Aplicații ale motoarelor electrice cu  
turație variabilă IDT București 1970

129. Nitschke, H.J.

Szabalyozatt fordulatszamn MS kevers  
Karbantartast to.

In Electrotehnika, R.P.Ungară vol.66.n<sub>26</sub>  
7-8 -1973 p-273

130 Kollensperger, D

Az aramiranyitos Motor

In: Electrotehnika, R.P.Ungară vol.66  
nr.7-8-1973 p.261.

131. Gogoiu, A.S.A

Tendințe actuale în utilizarea triris-  
toarelor 62

I, Buletinul I.P. Brașov vol.9.1967 p.23 11

132. Harris, W.R ; Morgan , R.A.

Alegerea acționărilor cu motor de cu-  
rent alternativ 10

In: Machine Design, SUA, vol.47 nr.5,  
1975 p.92

133. Bollack, J.J.

Some guidelines the applications of  
adjustable speed AC drivers. 1-

In: I.E.E.E. Trans. on ind. appl. SUA?  
vol.1A-9, nr.6 1973 p.764 nr

134. Elger, H Wehner, G

Neue Simoreg- Kompanageraete u.

In: Siemens, Zeitschrift, RFG, vol 52 nr.4.  
1978 p.212.

135. Ochs, T.A.

When to use variable frequency AC mo-  
tor drive. 2

In: Control engineering, SUA, vol 24 nr.9  
1977 p.58.

136. Wilson, C

Variable speed drives the A.C. challen-  
ge.

In: Electrical Times , Anglia nr 4427  
1977 p.12

137. Kirk, E, W.G.

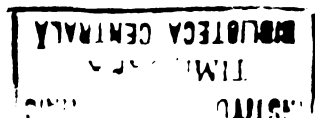
Inverter drives on pay for themselves. 11

In: Electrical Times, Anglia nr.4427  
p.9.

138. Murphy, T

Industrial application of inverter

./.



- " -
- 155 -
- drives.  
In:Electrical Review, Anglia vol.201.  
nr.24,1977 p.22.
- 139.Lacronx,G.  
Reglage de vitesse des moteurs asyn-  
crones.  
In: L'electricien Industrial,França  
vol.87 nr.2164.1974 p.161
140. Nezdánov,I.V.  
Invertory na tiristorah  
Editura Energia, Moscova 1965
141. Van Leuven,J  
Optimale wellenloopt van mischstrommoto-  
ren.  
In: ETZ-A-R.F.G. vol.93 nr.2 1972,p.86
- 142.Green,H.E.  
Inverter-fed induction motors  
In: Works engineering, Anglia nr.4.  
1973 p.21.
- 143.Faure,A  
Convertisseurs de fréquence statiques.  
In: La technique moderne,França,vol.62  
nr.7-8,1970 p.309
144. x x x  
Invertor driven induction motors could  
be preferred system for train propulsion  
In:Electrical review,Anglia,vol.192  
nr.17 1973 p.607.
- 145.Falk,M  
Nouveautés dans la gamme des converti-  
sseurs statiques vertion  
In:Revue Brown-Boveri,Elvetia,vol63,nr  
3,1976 p.203.
146. Sander,A  
Les variateurs de vitesse electroni-  
ques pour moteurs a courant continu.  
In: R.G.E.França,vol.85.nr.10.1976  
p.809
147. x x x  
Les hacheurs a thyristors en traction  
electrique  
In:ACEC Revue nr.1-2 /1976 p.3-22-
148. Parlov,I.V.  
Realizatiya trebuemoi harakteristiki  
filtra dya electropodriynogo sostava  
sirotuo-impulsnom regulirovanien  
In:Eletricestvo nr.1/1977 p.68-71
- 149.P.dr.Bruyne  
Les thyristors de puissance à conducti-  
on inverse an integration judicieuse  
dun thyristor e dune diode.  
In:R.G.E.Tomul.87 nr.5 mai 1978  
p.359-364

150. x x x Manualul inginerului electrician,  
vol. VI.
- 151 Komencky, Tan Stridačovÿ pohon pro vozidia  
mestake hromandÿ dopravy.  
In : Electrotechnik, RSC, nr.7/79  
p. 202 - 205.
152. Chevallier, G; Coyet, R Modèlisatlon sur calculateur ana-  
Guiraudie, C logique des machines òlectriques  
tenant còmpte de lhystèresis et  
de la saturation de linducteurs  
In: Revue Generale de LElectri-  
cité Tomul 84, nr.9, septembrie  
1975 p.626 - 631.
153. Miron D. Contribuții privind calculul sche-  
melor cu variatoare de tensiune  
continuu pentru acționarea electri-  
că a tramvaiului cu motor de curen-  
continuu cu excitație serie.  
In: E.E.A - Electrotehnica, 28(1980  
nr.1, p.16 - 19.
154. Miron D. Contribuții privind studiul scheme-  
Oană H. lor cu variatoare de tensiune con-  
tinuu pentru acționarea electrică  
a tramvaiului.  
In: E.E.A. - Electrotehnica, 28(198  
nr.8  
o. 350 - 354.
155. Miron D. Studiul unei scheme cu variator de  
Oană H. tensiune continuu pentru acționarea  
electrică a tramvaiului prin mode-  
lare pe calculator.  
Comunicare susținută la sesiunea de  
comunicări tehnico-științifice a  
I.P.B. 24 - 25 oct.1980.