

Ing. Dumitru Miron

Acționarea electrică a tramvaielor
folosind scheme cu tiristoare

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

Teza de doctorat în
vederea obținerii titlului
științific de doctor inginer

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

Timișoara - 1977

INSTITUTUL POLITEHNIC TIMIȘOARA	
BIBLIOTECA	
Colecția 554964	
Volumul nr.	554964
Dulap	332 1 ^a ff

C U P R I N S

	<u>Pag.</u>	
Cap.1.	Introducere	1-12
Cap.2.	Studiul sistemelor de acționare electrică a tramvaielor folosind schemele cu tiristoare	12-19
2.1.	Necesitatea preocupărilor în acest domeniu.	12-13
2.2.	Scheme cu tiristoare ale mutatoarelor utilizate la alimentarea motoarelor electrice de acționare a vehiculelor destinate transportului în comun urban	13-19
Cap.3	Variatorul de tensiune continuă și principalele lui utilizări aplicabile schemelor de acționare cu motoare de curent continuu cu excitație serie.	19-49
3.1.	Comutația forțată cu acumulator de energie capacitivă.	19-23
3.2.	Scheme de bază ale variatoarelor de tensiune continuă utilizate în acționările electrice de mare putere.	23-31
3.3.	Comanda variatoarelor	32-34
3.4.	Utilizarea variatorului de tensiune continuă în schemele de acționare cu motoare de curent continuu cu excitație serie	34-39
3.4.1.	Variația continuă a tensiunii la bornele motorului	35-37
3.4.2.	Variația prin impulsuri a rezistenței	36-37
3.4.3.	Variația prin impulsuri a inductanței	37-39
3.5.	Influența frecvenței de lucru a variatorului	39-48
3.5.1.	Influența frecvenței asupra variatorului	39-40
3.5.2.	Influența frecvenței asupra sarcinii	40-41
3.5.3.	Influența frecvenței asupra sursei de alimentare	41-44
3.5.4.	Influența frecvenței asupra instalațiilor de telecomunicații și de semnalizare	44-48
3.6.	Condiții pentru asigurarea continuității funcționării schemelor cu variatoare	48-49

..//..

	<u>Pag.</u>
Cap.4. Variatorul de tensiune continuu la schemele de pornire, modificarea turației și frînarea electrică a motoarelor de curent continuu cu excitație serie utilizate în tracțiunea electrică urbană	49-82
4.1. Utilizarea variatorului pentru pornirea motorului de tracțiune	49-56
4.2. Variatorul de tensiune continuu în schemele de modificare a turației motorului de tracțiune	56-64
4.3. Utilizarea variatorului în schemele de frînare electrică	64-82
4.3.1. Frînarea reostatică	64-74
4.3.2. Frînarea electrică cu recuperare de energie	75-82
Cap.5. Prezentarea unor scheme cu variator de tensiune continuu utilizate în tracțiunea electrică urbană	83-90
Cap.6. Studiu teoretic și experimental al unei scheme cu variator de tensiune continuu pentru acționarea electrică a tramvaiului la noi în țară.	90-117
Cap.7. Implicațiile tehnico-economice ale folosirii variatorului de tensiune continuu în schemele de acționare electrică a tramvaielor	117-125
Cap.8. Rezultate obținute	126-139
Concluzii	140-142
Anexe	143-145
Tabele	146-152
Bibliografie	153-165

CAP. I. INTRODUCERE

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 care poate fi întâlnit în toate marile orașe ale lumii nu a făcut decât să confirme odată în plus utilitatea tramvaiului în rezolvarea necesităților legate de transportul urban în comun. Avantajele de necontestat ale tramvaiului: capacitate mare de transport, siguranță în funcționare, conducere ușoară, ușurința întreținerii, economicitatea transportului, au constituit argumentele principale prin care s-a combătut tendința semnalată cu câțiva 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 și cu capacitate de transport marită.

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 și mai recent motorul liniar) nu au putut conduce la argumente care sub aspectul tehnic și economic să justifice renunșarea la sistemul clasic [18]

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 pornire, modificarea vitezei de mers și de frânare [28] .

..//..

Perfecționările aduse schemelor clasice de acționare a tramvaielor nu au putut elimina unele dezavantaje generate de aceste scheme și anume: variația în salturi a curentului motoarelor în perioadele de pornire, modificarea turației și frînare cu repercursiuni negative asupra forței de tracțiune și a aderenței, tendința de patinaj determinată de conectarea în serie a motoarelor și a rezistențelor, consumul de energie electrică în rezistențe, trecerea de la o conexiune la alta necesită manevre care complică schema, numărul mare de contacte mecanice care constituie puncte slabe ale schemei de acționare.

Aceste considerente m-au determinat ca în cadrul tezei de doctorat să studiez posibilitatea folosirii schemelor cu tiristare la acționarea electrică a tramvaiului și problemele ce se vor rezolva în această situație.

În prezent toate firmele specializate în construcția de echipamente pentru tracțiune electrică urbană s-au oprit la soluția de a îmbunătăți sistemul actual prin folosirea variatorului de tensiune continuă pentru pornire, modificarea vitezei de mers și frînare în locul reostatului.

Primele vehicule de transport urban alimentate de la linia de curent continuu și acționate de motoare de curent continuu au intrat în exploatare în 1967 la Chicago și San Francisco [95].

Preocupări intense și realizări remarcabile au înregistrat și firmele AEG și ACEC iar în faza avansată de experimentări se găsesc RSC și URSS [33 35 41 58]

Și în țara noastră cercetările în acest domeniu au fost demarșate în anul 1966 de către un colectiv de specialiști de la ICPE - București, care a și realizat prototipurile echipamentului de acționare cu variator de tensiune continuă pentru troleibuz și pentru tramvai.

Aceste scheme sînt prezentate în cap.5 din teza.

Diferențele între diferitele sisteme adoptate de firmele constructoare sînt neesențiale din punct de vedere principal fiecare firma cautînd o simplificare cît mai mult posibilă a schemei de acționare sau a schemei variatorului paralel cu obținerea unor performanțe, tehnice-economice superioare.

Se remarcă totuși schema realizată de firma ACEC (fig.42) care permite prin manevre simple atât pornirea și modificarea vitezei de mers cât și frînarea mixtă a vehiculului.

În cadrul lucrării am studiat și posibilitatea utilizării redresoarelor comandate și a invertoarelor în acționarea electrică a tramvaiului dar am ajuns la concluzia că aceste scheme nu se justifică nici chiar în cazul orașelor în care urmează să se introducă tramvaiul pentru transportul în comun.

În această situație am realizat și propus spre brevetare o schemă de acționare electrică a tramvaiului folosind variatorul de tensiune continuă (fig.50) [66]

Comparativ cu schemele utilizate de alți autori această schemă este mai simplă, conține un număr mai redus de contacte și de elemente semiconductoare și are o fiabilitate mai mare datorită faptului că fiecare variator poate alimenta singur cele două motoare de tracțiune. În funcționare normală variatoarele sînt comandate decalat astfel că elementele filtrului de rețea se dimensionează pentru o frecvență dublă față de frecvența de lucru a variatorului.

Indiferent de schema realizată, folosirea variatorului de tensiune continuă în schemele de acționare electrică a tramvaiului prezintă următoarele avantaje : [35]

- ameliorarea condițiilor de tracțiune prin eliminarea pulsațiilor forței de tracțiune și folosirea deplină a aderenței;

- realizarea frînării electrice cu recuperare de energie cu mai multă ușurință, fără a complica schema de acționare;

- reducerea securilor de curent la pornire;

- alimentarea individuală a motoarelor nu pune nici o problemă;

- întreținere mai ușoară și mai puțin costisitoare datorită reducerii numărului de contacte mecanice;

- se pot obține vehicule pentru mai multe sisteme de curent;

- se poate introduce mai ușor automatizarea;

./.

- se obține economii importante de energie electrică.

În capitolul 2 am făcut un studiu asupra sistemelor de acționare electrică a trăsniilor folosind scheme cu tiristoare enumerând mai întâi schemele ce pot fi aplicate în rezolvarea acestei probleme ținând 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 monofazat [18], am studiat variantele de mutare posibile de utilizat în această situație evidențiind avantajele 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 sînt analizate schemele mai semnificative propuse de diversi autori [18, 60, 35]. În continuare este tratată problema economizării variațiilor evidențiindu-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.37) și am stabilit curbele din fig.38 pe baza cărora se poate stabili poziția acestei rezistențe în funcție de δ și de parametrii circuitului de frânare.

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

Deasemeni, frânarea electrică recuperativă se poate realiza și la turății mici ale motorului condiția $E > U$ realizându-se ca urmare a tensiunii electromotoare induse în inductanțele circuitului datorită variațiilor foarte rapide ale curentului prin motor cu frecvență egală cu frecvența de lucru a variatorului [67].

În capitolul 5 am prezentat unele scheme de acționare a mijloacelor de transport în comun urban folosind variatorul de tensiune continuă. Este prezentată schema tramvaiului folosită de firma ACEC (fig. 42_a) schema troleibuzului Skoda 9 Tr-T (fig.43), schema tramvaiului tip T și KT realizată de RSC (fig.44), două scheme realizate de firma Siemens (fig.47,48) precum și schema tramvaiului Timis 1 realizată de ICPE București (fig.49).

..//..

În capitolul 6 am studiat o schema concepută de mine și propusă pentru brevetare (dosar OSIM nr.8168/18.III.1975) pentru acționarea electrică a tramvaiului la noi în țară (fig.50).

Cele două motoare de tracțiune M_1, M_2 , conectate în paralel sînt alimentate de la linia de contact prin două variatoare de tensiune continuă V_1, V_2 funcționînd în regim de comandă decalată.

La funcționarea în regim de tracțiune variatoarele sînt conectate în serie cu motoarele de tracțiune asigurîndu-se o variație continuă a tensiunii de alimentare a acestora de la 30 V la 750 V prin modificarea corespunzătoare a durstei de conducție a tiristoarelor principale ale variatoarelor.

La funcționarea în regim de frînare motoarele funcționează în regim de generator serie autoexcitat cu preexcitare de la baterie, cu înfașurarile de excitație încrucișate. Frînarea este mixtă, cînd tensiunea liniei de contact este mai mică decît tensiunea la bornele motoarelor se realizează frînarea electrică recuperativă.

Cînd tensiunea liniei de contact depășește valoarea nominală, se realizează frînarea reostatică, energia electrică furnizată de motoarele de tracțiune funcționînd în regim de generator serie autoexcitat se disipă în rezistențele de frînare R_{1f}, R_{2f} în circuitul cărora sînt înseriate tiristoarele de frînare T_{31}, T_{32} care sînt stinse tot de către circuitul de stingere.

În funcționarea în regim de frînare variatoarele se conectează în paralele cu indusurile motoarelor de tracțiune iar menținerea curentului de frînare la valoarea impusă este asigurată prin modificarea continuă a raportului ciclic.

..//..

Față de schemele cu tiristoare utilizate pîna în prezent la acționarea electrică a tramvaiului schema prezentată se caracterizează prin următoarele :

1. Variatorul de tensiune continuă (fig.51) este o variantă a variatorului utilizat de firma ACEC la care s-au adus îmbunătățiri în sensul că s-a introdus tiristorul T_4 , prin care se comandă încărcarea condensatorului de stingere. În felul acesta prin tiristorul principal trece numai curentul motorului de tracțiune și se evită solici-
tarea suplimentară a acestuia de către curentul de încărcare a condensatorului.

2. Cele două inductanțe de netezire L_{s1} , L_{s2} sînt cuplate electromagnetic rezultînd valori mai mici pentru aceste inductanțe.

3. Fiecare variator de tensiune continuă funcționează cu frecvență fixă de 200 Hz tensiunea de alimentare a motoarelor fiind modificată prin comanda lățimii impulsurilor, Variatoarele fiind comandate decelat cu o semiperioadă, frecvența undulațiilor curentului absorbit din rețeaua de alimentare și a undulațiilor tensiunii la bornele condensatorului de intrare va fi 400 Hz.

Acest lucru influențează favorabil valoarea undulațiilor mărimilor menționate care este invers proporțională cu frecvența și conduce la valori mai mici ale inductanței și capacității filtrului de intrare.

4. Schema conține un număr mai mic de contacte mecanice și de elemente semiconductoare.

5. În regim de frînare motoarele funcționează în regim de generator serie autoexcitat cu înfașurările de excitație încrucișate menținîndu-se sensul curentului în înfașurările de excitație.

Schemele utilizate la noi în țară pentru acționarea tramvaiului și troleibuzului se caracterizează prin faptul că motoarele funcționează în regim de generator cu excitație separată care prezintă două dezavantaje importante și anume: un consum mai mare de energie electrică și ineficiența frînării electrice la întreruperea tensiunii liniei de contact.

La aceste scheme este necesar sa se controleze separat curentul în înfașurarea de excitație.

6. Comparativ cu schemele utilizate pînă în prezent această schemă are o fiabilitate mai ridicată datorită faptului ca se realizează o schemă structurală tip paralel, fiecare varistor fiind dimensionat pentru a putea să alimenteze singur ambele motoare de tracțiune.

Schema a fost concepută și dimensionată pentru a funcționa cu următoarele caracteristici :

- tensiunea nominală 750 V
- puterea nominală unioară 2 x 150, kW
- curentul unioară 2 x 225 A
- curentul maxim de pornire 2 x 350 A
- frecvența de lucru a varistorului 200 Hz

Am dimensionat principalele elemente ale schemei (circuitul de stingere a tiristorului principal, filtrul de intrare, inductanțele de dețezire și de limitare a valorilor $\frac{di}{dt}$) și în funcție de valorile calculate ale curentilor prin circuit am ales din cataloage elementele se conductoare.

Prin scheme bloc din fig.53 am evidențiat legăturile funcționale ce trebuie stabilite între elementele de bază ale schemei de comandă și cele ale schemei de acționare iar cu ajutorul standului prezentat schematic în fig.54 am determinat caracteristicile mecanice ale motorului pentru diferite valori ale raportului ciclic δ și am studiat comportarea motorului de tracțiune alimentat prin varistor (anexa 2).

Cu ocazia încercărilor a rezultat faptul că la frecvențe de lucru ale varistorului mai mari de 200 Hz reactanța de scăpare a motorului provoacă o amortizare sensibilă a curentului astfel ca se poate renunța la inductanța de dețezire exterioară. Curentul prin motor este suficient de bine filtrat și influența armonicilor curentului asupra încălzirii bobinejului nu este sensibilă. Influența armonicilor curentului asupra comutației motorului a fost evidențiată urmărindu-se uzura periiilor și a colectorului. S-a constatat ca uzura periiilor și a colectorului este practic

aceeași ca și în cazul alimentării motorului în curent continuu.

Faptul ca în timpul pornirii curentul prin motor are o valoare constantă influențează pozitiv funcționarea colectorului. Un mare avantaj al utilizării variatorului asupra comutației este acela ca motorului se aplica întreaga tensiune a liniei de contact numai în plină sarcină și în aceste condiții el funcționează ca un motor de curent continuu.

Din punct de vedere al fenomenelor tranzitorii provocate de întreruperile intempestive ale tensiunii de alimentare s-a constatat ca în cazul alimentării prin variator, șocul de curent la reapariția tensiunii este eliminat.

La repartiția tensiunii, la bornele motorului tensiunea se aplica progresiv astfel că curentul crește exponențial până la valoarea de regim

În cazul schemelor clasice tensiunea la bornele motorului se aplică dintr-o dată iar curentul prin motor crește brusc la o valoare egală cu de două-trei ori curentul de regim și apoi se stabilizează la aceeași valoare (fig.55)

Motorul alimentat prin variator este deci protejat contra supra-curenților provocați de fenomenele tranzitorii. Cât privește impulsurile de tensiune suplimentare, s-a constatat ca acestea nu depășesc nivelul de izolație la care se încearcă în mod normal motorul.

Alimentarea motoarelor de tracțiune prin variator de tensiune continuă are o influență favorabilă și asupra liniei de contact. Pentru aceleași condiții de pornire, curentul absorbit din linia de contact este mai mic în cazul alimentării prin variator comparativ cu cazul folosirii schemei clasice de pornire cu reostat.

Din punct de vedere al caracteristicilor de tracțiune se remarcă două avantaje importante și anume: reglajul continuu al forței de tracțiune în întreg domeniu: F, V și obținerea unor caracteristici $F = f(V)$ mai înclinate care conduc la valori mai mari $\Delta F / \Delta V$, mai ales în domeniul vitezelor mici (fig.56).

Comportarea motorului de curent continuu în cazul alimentării prin variator de tensiune continuă comparativ

cu alimentarea directă de la rețeaua de curent continuu este ilustrată în tabelul anexa 2.

Valorile au fost măsurate în condiții de funcționare normală la sarcină nominală și tensiunea maximă la ieșirea din varistor respectiv la tensiunea nominală de 750 V.

Cu această ocazie au fost evidențiate și performanțele varistorului (tabelul anexa 1).

Din datele prezentate se constată că alimentarea motorului de curent continuu prin varistor influențează foarte puțin parametri funcționali ai acestuia ca și încălzirile diferitelor lui elemente.

Supratensiunile ce apar la bornele varistorului datorite întreruperii curentului nu depășesc valorile tensiunii la care se încearcă în mod obișnuit izolajul echipamentului de tracțiune.

Schema analizată a fost înaintată prin OSIM Intreprinderilor de Transporturi București în vederea utilizării sale la secționarea electrică a tramvaiului de mare capacitate. Menționez de asemenea că schema poate fi utilizată și la secționarea automatului pentru metroul din București.

În capitolul 7 am analizat critic implicațiile tehnico-economice ale folosirii varistorului de tensiune continuă în schemele de secționare electrică a tramvaiului evidențind 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 întrerupere intempestivă de scurtă durată;
- absorbirea unui curent mai mic din rețeaua de alimentare atât în timpul pornirii cât și în funcționare;
- posibilitatea folosirii frînării electrice până la oprirea vehiculului;
- posibilitatea folosirii frînării electrice recuperative fără a complica schema;
- reducerea consumului de energie electrică.

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

Am evidențiat de asemenea că în condițiile actuale fiabilitatea schemelor cu variator de tensiune continuă este mai scăzută comparativ cu a schemelor clasice. De asemenea costul echipamentului de acționare cu variator este cu 50% mai mare.

În capitolul 8 am prezentat pe larg principalele direcții în care au fost orientate cercetările pe care le-am efectuat asupra echipamentelor din componente schemelor de acționare cu variator de tensiune, concluziile și rezultatele experimentale obținute.

Încercările pe care le-am efectuat asupra echipamentului instalat pe troleibuz și pe tramvai împreună cu colectivul de elaborare au condus la următoarele rezultate: economie de energie electrică de 35 %, accelerații la pornire mai mari cu 10%, pornirea fără securi, curentul luat de la linia de contact în primul moment al pornirii mult mai mic (10 A față de 220 A).

Echipamentul cu tiristoare funcționează corect într-o gamă largă de temperaturi ($-35^{\circ}\text{C} \div +65^{\circ}\text{C}$) și nu este influențat de vibrații și zdruncinări cu accelerația până la 3 g.

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 că 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 cu tiristoare.

..//..:

CAP. 2 - STUDIUL SISTEMELOR DE ACTIONARE ELECTRICA
▲ TRAMVAIEI TOR FOIOSIND SCHEME CU TIRISTOARE

2.1. Necesitatea preocuparilor în acest domeniu.

Printre mijloacele de transport în comun urban utilizate în marile orașe, tramvaiul ocupă un loc de frunte datorita avantajelor pe care le prezinta comparativ cu alte mijloace de transport.

Ca principale avantaje ale tramvaielor pot fi menționate: capacitatea de transport mare, siguranța mare în funcționare, conducerea ușoară, ușurinta întreținerii, economicitatea transportului etc.

Pe baza avantajelor menționate a putut fi combatuta tendința semnalata cu câțiva ani în urma de a se renunța în viitor la acest mijloc de transport în comun datorita poluarii sonore pe care o provoaca și blocării circulației pe un anumit tronson de linie în cazul defectării unui vehicul, trecându-se ^{la} intensificarea cercetarilor pentru realizarea de tramvaie silențioase și cu capacitate de transport mărita.

În noi multe țari din lume s-au facut pași importanți pe linia perfecționării parametrilor tehnico-funcționali ai tramvaielor realizându-se tramvaie articulate, de mare capacitate, silențioase, cu caracteristici de pornire modificare a vitezei de mers și de frinare îmbunătățite [28, 42].

Perfecționările aduse schemelor clasice de acționare a tramvaielor nu au putut elimina următoarele dezavantaje :

- variația în salturi a curentului motoarelor în perioadele de pornire, modificare a vitezei și frinare cu repercursiuni negative asupra forței de tracțiune;
- cuplarea în serie a motoarelor și a rezistențelor accentuează tendința de patinaj;
- în rezistență se consuma o cantitate importantă de energie electrică;

- trecerea de la o conexiune la alta necesita manevre care complică scheme de acționare;

- rezistențele nu pot fi menținute mult timp sub tensiune ceea ce limitează posibilitățile de comandă a tensiunii motoarelor și a vitezei vehiculului;

- numărul ridicat de contacte mecanice care constituie puncte slabe ale schemei de acționare;

Înlăturarea acestor dezavantaje s-a putut realiza numai prin introducerea electronicii de putere în schemele de acționare electrice a mijloacelor de transport în general având drept consecințe :

- ameliorarea condițiilor de tracțiune prin reducerea pulsațiilor cuplului motor grație reglajului continuu al acestuia în funcție de limita de aderență;

- frînarea cu recuperare a energiei se poate realiza cu mai multă ușurință;

- diminuarea costului întreținerii datorită absenței unui număr important de contacte mecanice;

- se pot obține vehicule pentru mai multe sisteme de curent;

- alimentarea individuală a motoarelor nu pune nici o problemă;

- se poate introduce mai ușor automatizarea transportului;

2.2. Scheme cu tiristoare ale mutatoarelor utilizate la alimentarea motoarelor electrice de acționare a vehiculelor destinate transportului în comun urban.

Motorul electric utilizat la acționarea mijloacelor de transport în general trebuie să îndeplinească o serie de condiții și anume [18] o mare capacitatea de suprasarcină, să dezvolte un cuplu mare la pornire fără ca acesta să fie influențat esențial de variațiile tensiunii la linia de contact, să permită frînarea electrică și să poată fi folosit cât mai mult la puterea pentru care a fost construit, să fie robust din punct de vedere mecanic fără a depăși gabaritul impus de considerentele tehnice și economice.

Din acest punct de vedere în tracțiunea electrică pot fi folosite motoarele de curent continuu cu excitație serie (fig. special la mijloacele de transport în comun urban), motorul monofazat serie cu colector de curent alternativ, motorul serie cu colector de curent ondulat, motorul esincron trifazat cu rețerul în scurtcircuit, motorul asincron trifazat cu rețerul bobinat, motorul liniar.

Motorul de curent continuu cu excitație serie s-a dovedit ca îndeplinește în cel mai înalt grad cerințele ce se impun motoarelor de tracțiune: stabilitate electrică și mecanică, distribuție uniformă a sarcinii între motoarele de tracțiune de pe aceeași unitate motoare, influență redusă a variației tensiunii de la linia de contact asupra curentului absorbit de motoare și deci asupra forței de tracțiune, utilizarea cât mai bună a aderenței, bună comportare în exploatare.

Motorul serie cu colector de curent ondulat se apropie cât mai mult din punct de vedere al satisfacerii cerințelor impuse în tracțiunea electrică de motorul de curent continuu cu excitație serie.

Motorul serie cu colector de curent alternativ deși din punct de vedere al caracteristicii mecanice se apropie destul de mult de motorul de curent continuu cu excitație serie, are unele dezavantaje care îl fac să fie trecut pe un plan secundar. Între acestea menționăm problemele legate de comutație, puterea pe pol mult mai redusă decât la motoarele de tracțiune de curent continuu.

Motorul trifazat, cu toate că prezintă unele avantaje remarcabile (are o construcție simplă, este robust, are randament ridicat și nu are colector) nu s-a găsit utilizarea pe scară largă în tracțiunea electrică din mai multe motive cele mai importante fiind legate de sistemul de alimentare, rigiditatea caracteristicii mecanice, funcționarea pe porțiuni instabile a caracteristicii mecanice în perioade pornirii, variația cuplului în funcție de tensiunea de alimentare. Pentru a putea fi utilizat în tracțiunea electrică urbană, chiar în condițiile liniei de contact de curent alternativ monofazat sînt necesare scheme complicate de reglare ale caror costuri nu sînt deloc de neglijat.

Motorul asincron liniar prezintă multiple avantaje față de toate motoarele electrice rotative destinate acestui scop. Dintre acestea menționăm pe cele mai importante :

- simplitatea și robustețea construcției
- întreținerea extrem de ușoară
- puterea specifică mai mare
- frînarea sigură și eficientă

Montat pe vehicul, motorul liniar conferă acestuia o serie de avantaje:

- posibilitatea de a dezvolta eforturi de tranziție și de frînare mari și independențe de aderență;
- realizarea unor viteze mari cu consum de energie redus datorită reducerii rezistențelor de deplasare;
- silențiozitate.

Până în prezent utilizarea motorului liniar în tracțiunea electrică se află în faza experimentală în unele țări și se preconizează extinderea lui pentru acționarea mijloacelor de transport.

Utilizarea lui pentru acționarea mijloacelor de transport în comun urban implică rezolvarea unor probleme deosebit de complicate care în etapa actuală nu se justifică.

Pentru motivele menționate am considerat că nu este necesară prezentarea în cadrul lucrării a schemelor de muta-toare cu tiristoare care pot fi folosite la alimentarea motoarelor de curent alternativ monofazat cu colector, a motoarelor asincrone și a celor liniare.

Din considerente tehnice și economice, mai ales în cazul transportului în comun urban alimentarea motoarelor de tracțiune se face prin linie de contact în curent continuu sau cu curent alternativ monofazat.

Ținând seama de aceasta, muta-toarele statice cu tiristoare destinate tracțiunii electrice pot fi : [6 1]

- redresoare comandate care transformă curentul alternativ de tensiune și frecvență constantă în curent continuu de tensiune reglabilă;

- invertoare - care transformă curentul continuu în curent alternativ de frecvență constantă și tensiune variabilă.

- convertoarele statice care transformă curentul alternativ cu o anumită tensiune, o anumită frecvență, în curent alternativ cu alte valori ale acestor mărimi;

- variatoarele de tensiune continuă care transformă un curent continuu de tensiune constantă într-un curent continuu de tensiune variabilă.

Privind tracțiunea electrică urbană rezultă următoarele:

- redresorul comandat se folosește la vehicule electrice alimentate din linia de contact în curent alternativ monofazat acționate cu motoare serie de curent continuu, sau cu motoare serie cu colector de curent ondulat (fig.1) [6].

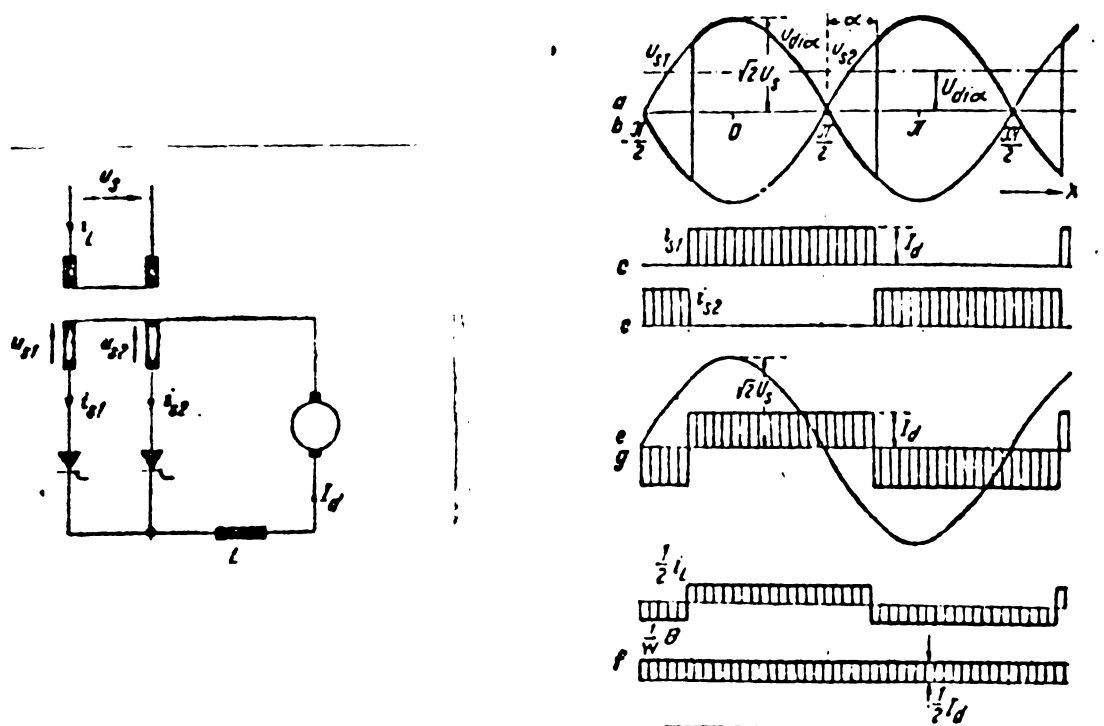


Fig.1 - Alimentarea motorului de curent continuu prin redresor comandat.

a - schema de principiu

b - variație în timp a principalelor mărimi.

Redresorul comandat este un mutator cu comutație de la rețea adică stingerea tiristoarelor și trecerea curentului de pe o ramură pe cealaltă, este produsă de tensiunea din circuitul de comutare în momentul anularii curentului prin ventili. Momentul aprinderii tiristoarelor poate fi comandat asigurându-se astfel la ieșire o tensiune continuă a carei mărime variază în funcție de unghiul de comandă α care reprezintă tocmai unghiul de întârziere a apariției curentului pe faza care conduce în timp ce faza tensiunii este impusă de rețeaua de alimentare în curent alternativ.

Tensiunea la ieșire este dată de relația :

$$U_c = k U_2 \cos \alpha \quad (1) \quad [61]$$

Puterea activă variind direct proporțional cu tensiunea continuă U_c va fi și ea o funcție de $\cos \alpha$

$$P = k_a \cos \alpha \quad (2) \quad [61]$$

Dacă amplitudinea curentului continuu este constantă rezultând în circuitul alternativ un curent constant, puterea reactivă a armonicii fundamentale este dată de relația

$$Q = k_r \sin \alpha \quad (3) \quad [61]$$

Rezultă că prin folosirea acestei scheme apare un consum suplimentar de putere reactivă care duce la înrăutățirea factorului de putere. Creșterea unghiului de comandă conduce la modificarea conținutului de armonici ale tensiunii și curentului atât în rețeaua de alimentare cât și în circuitul de sarcină de curent continuu.

O reducere a valorii curentului reactiv și a ondulațiilor curentului continuu se realizează prin inserarea mai multor scheme comandate succesiv pe partea de curent continuu.

Principalul avantaj al schemei constă în faptul că poate funcționa și în regim de invertor permițând frînarea electrică cu recuperare a energiei datorită inversării tensiunii pentru $\alpha \geq 90^\circ$.

50
332

Totuși, dezavantajele menționate și în plus costul ridicat însoțit de greutatea echipamentului aferent fac ca schemele cu redresoare comandate să nu-și găsească aplicabilitatea în alimentare motoarelor de curent continuu cu excitație serie destinate acționării vehiculelor electrice pentru transportul în comun urban.

- Variatorul de tensiune continuă întâlnit în literatura de specialitate sub denumirea de Chopper sau reglor [4; 100] se folosește la vehiculele electrice alimentate din linie de contact în curent continuu acționate cu metebre de curent continuu cu excitație serie (fig.2).

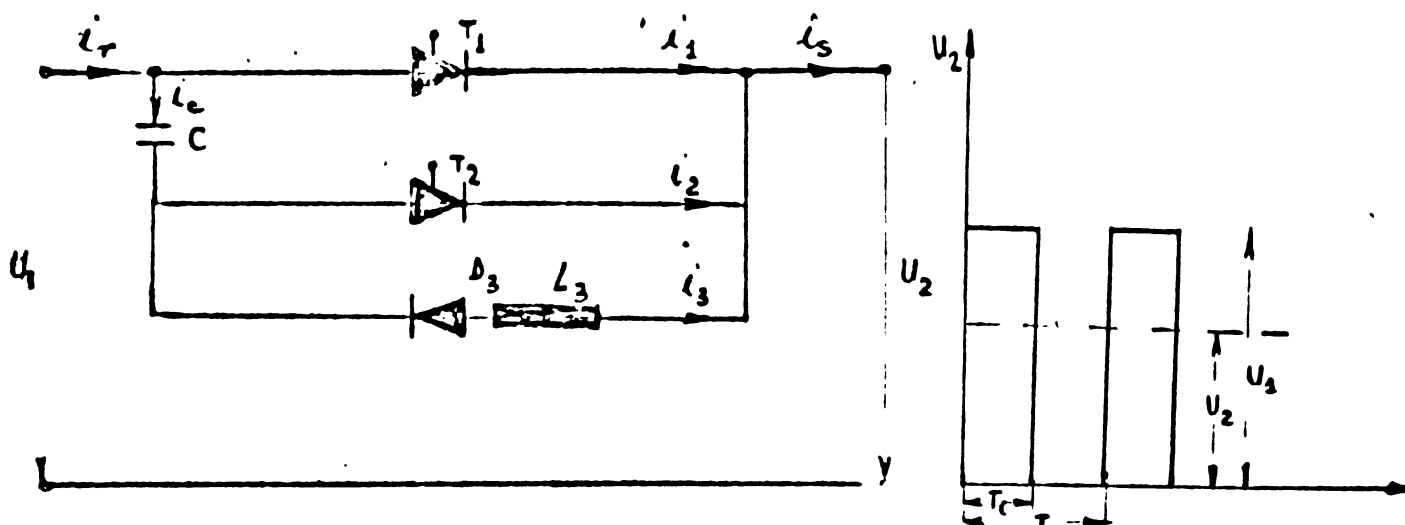


Fig.2 - Variator de tensiune continuă cu circuit de stingere în paralele cu tiristorul principal.

Variatorul de tensiune continuă este un mutator static comandat cu comutație artificială.

La mutatoarele cu comutație artificială stingerea tiristoarelor nu mai poate fi asigurată în mod natural prin tensiunea de alimentare [60].

Tensiunea de comutație este obținută fie de la surse auxiliare de tensiune, fie de la acumulatori de energie. În cazul Chopperului tensiunea de comutație este obținută de la condensatoare.

Pe lângă schema anterioară, schema cu Chopper prezintă următoarele avantaje: este mai ieftină conținând un număr mai redus de ventile, nu consumă energie reactivă din rețeaua

alimentare, undulațiile curentului și tensiunii sînt mai reduse, posibilitățile de reglare sînt îmbunătățite putîndu-se comanda stît momentul aprinderii și momentul stingerii tiristoarelor. Cu această schema la bornele sarcinî se asigură o tensiune continuă variabilă dată de relația

$$U_2 = c \cdot U_1 \quad (4) \quad [35]$$

$c = \frac{\alpha}{\pi}$ poartă denumirea de raport ciclic sau perioadă relativă de conducție.

Comperînd din toate punctele de vedere soluțiile posibile a fi adoptate pentru acționarea electrică a tramvaiului folosind scheme cu tiristoare rezulta că cea care corespunde cel mai bine scopului propus este schema cu variator de tensiune continuă.

Cap.3. -Variatorul de tensiune continuă și principiile lui utilizări aplicabile schemelor de acționare cu motoare de curent continuu cu excitație 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 capacitiv. În [60] este descris pe larg fenomenul comutației forțate folosind în acest scop un condensator.

Schema de principiu este prezentată în fig.3 iar variația în timp a curenților și tensiunilor în fig.4 [60.]

..//..

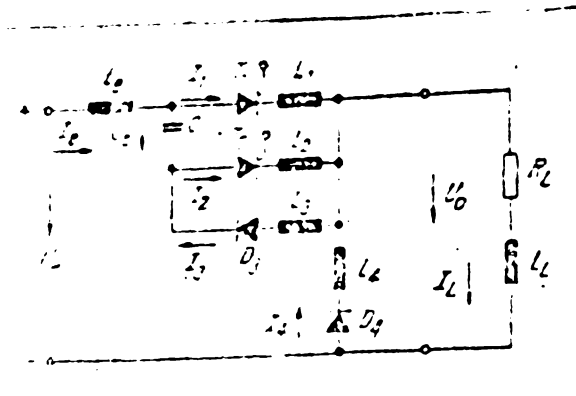


Fig.3 - Scheme de principiu a părții de forță a unui variator de tensiune continuă alimentând o sarcină rezistiv-inductivă.

În figură s-au notat :

- T_1 - tiristor principal
- T_2 - tiristor de stingere
- C - condensator de stingere
- D_4 - diodă de restă liberă.

Se definesc următoarele elemente :

- T - perioada de reglare
- T_1 - durată de conducție

$$\frac{T_1}{T}$$

durată relativă de conducție sau raport ciclic

La începutul intervalului de timp considerat tiristorul principal T_1 este aprins. Condensatorul C a fost încărcat anterior la tensiunea U_c cu polaritate negativă. În momentul t_1 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.

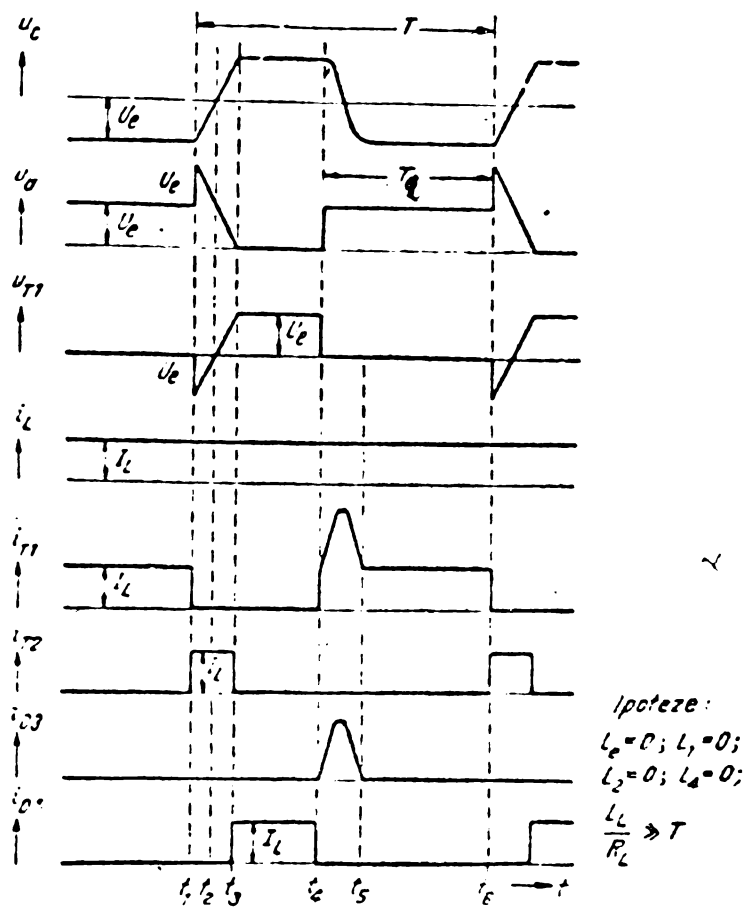


Fig.4 - Variația în timp a curenților și tensiunilor.

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 $2 U_0$, scade, astfel ca în momentul t_3 când tensiunea pe condensator este egală cu tensiunea sursei, se anulează. Prezența diodei de sumtare 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 descarcare D_4 . În acest moment procesul de comutație forțată s-a încheiat.

Din cele prezentate rezultă că ciclul de funcționare a unui varistor 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 diagramei din fig. 4 se pot stabili condițiile care asigură o funcționare corespunzătoare a schemelor cu comutație prin condensator și anume :

$$\left. \begin{aligned} t_{\text{blocaje}} = t_2 - t_1 &= \frac{U_c C}{I_L} \geq t_r \\ t_{\text{comutație}} &= 2 U_c \frac{C}{I_L} \end{aligned} \right\} (5)$$

unde :

T_{blocaje} - 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.

U_c - 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 fără a se modifica 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 circulează 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 baza ale variatorului de tensiune continuă utilizate în acționările electrice de mare putere

Literatură de specialitate [18 35 60] tratează o mulțime de scheme de variatoare de tensiune continuă care pot fi clasificate din mai multe puncte de vedere și anume:

- În funcție de modul de conectare a circuitului de stingere cu sarcina se 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 se vor prezenta cele mai semnificative scheme de variatoare întâlnite în literatură și se vor analiza în mod critic avantajele și dezavantajele fiecăreia în parte.

Una din schemele variatoarelor este cea prezentată deja în fig.3 [60].

Schema funcționează cu frecvența de lucru constantă.

$$\int U_c dt = \sigma U_c \quad (6)$$

Dezavantajul acestei scheme constă în faptul că la stingera 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

$$\int_0^{t_2} i_2 dt = \int_0^{t_3} i_3 dt \quad (7) \quad [60]$$

- 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.5 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 curenților și tensiunilor este prezentată în fig.6 [60].

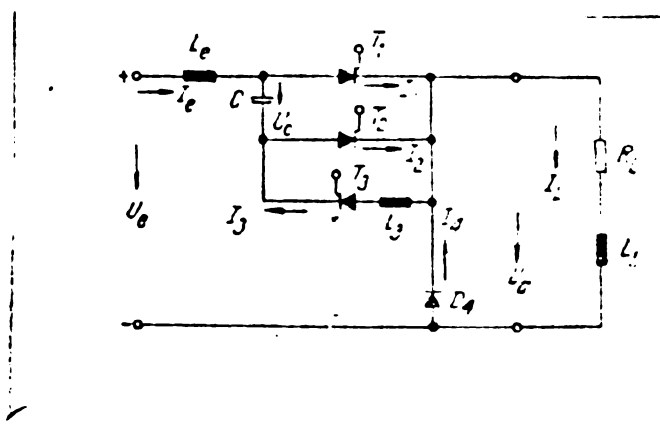


Fig.5 - Variator de tensiune continuă cu tiristor în circuitul de inversare a polarității tensiunii pe condensator.

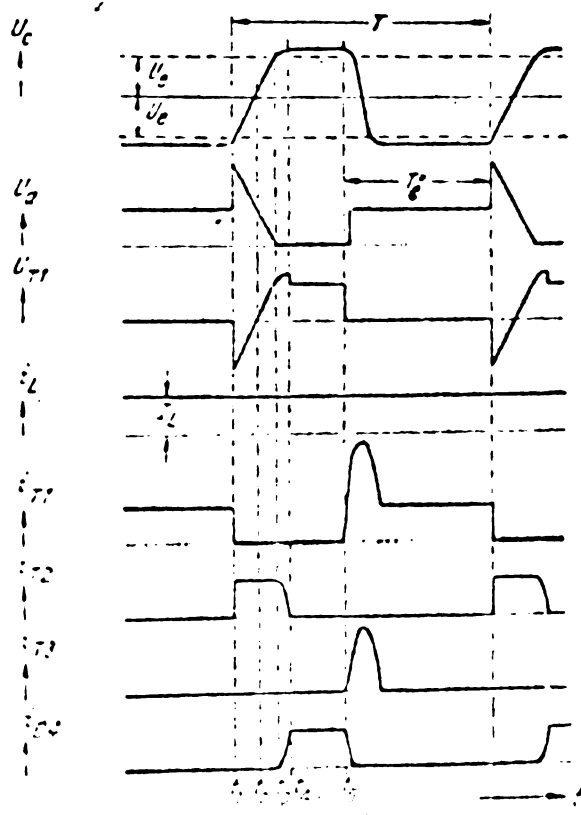


Fig.6 - Variația în timp a curenților și tensiunilor variatorului din fig. 5.

Schema prezintă două evenimente 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; nu mai apare curentul care circulează prin sursă în sens invers și care conduce la descărcarea parțială a condensatorului.

În fig.7 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 durate relative de conducție ridicate.

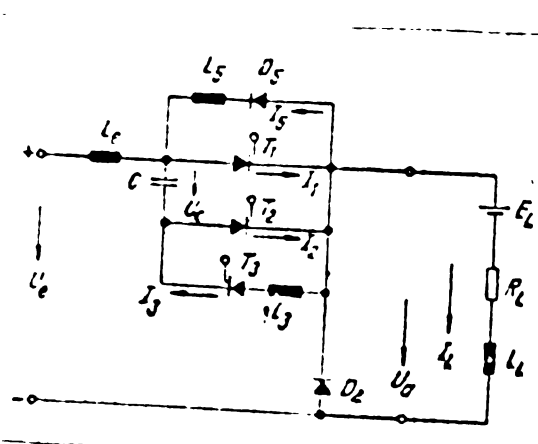


Fig.7 - Variator de tensiune continuă cu circuit auxiliar de reîncărcare.

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.

Datorita 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 ca și această schemă are dezavantajul ca încărcarea condensatorului de stingere se face prin sarcină și ca întotdeauna la pornirea variatorului trebuie să se asigure mai întâi 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. 7 este schema cu circuite separate de reîncărcare și de inversare a polarității tensiunii pe condensator prezentată în fig. 8 [60].

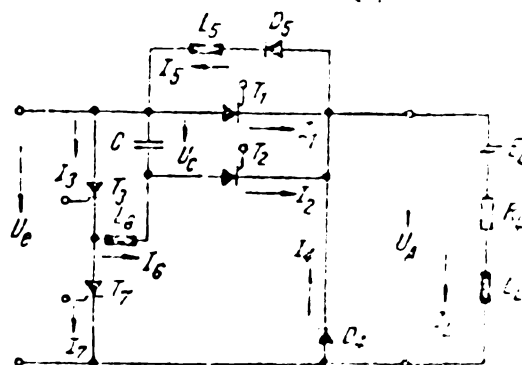


Fig.8 -Variator de tensiune continuă cu circuite separate de reîncărcare și de inversare a polarității tensiunii pe condensator.

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 până 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 oricând, 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_3 , aprinderea lui T_2 .

În schemele de acționare a tramvaiului realizate de ACBC s-a extins variatorul de tensiune continuă cu circuit de stingere conectat în paralel cu sarcina pe catodul tiristorului principal fapt pentru care astfel de variatoare poartă denumirea incorectă de variatoare cu circuit de stingere pe catod.

Schema de principiu a unui astfel de variator este prezentată în fig. 9. În [35] este deschis, pe larg nodul 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 sarcinii.

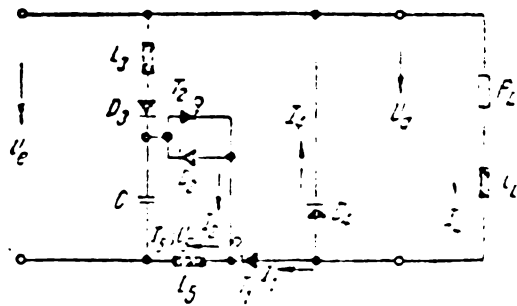


Fig.9 - Variator de tensiune continua cu circuit de stingere în paralel cu sarcina.

- 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 stărilor 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 scționarea 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] .

În fig.10 este prezentată schema de principiu a variatorului realizat de ACEC pentru comanda schemelor de scționare în tracțiunea electrică [35] .

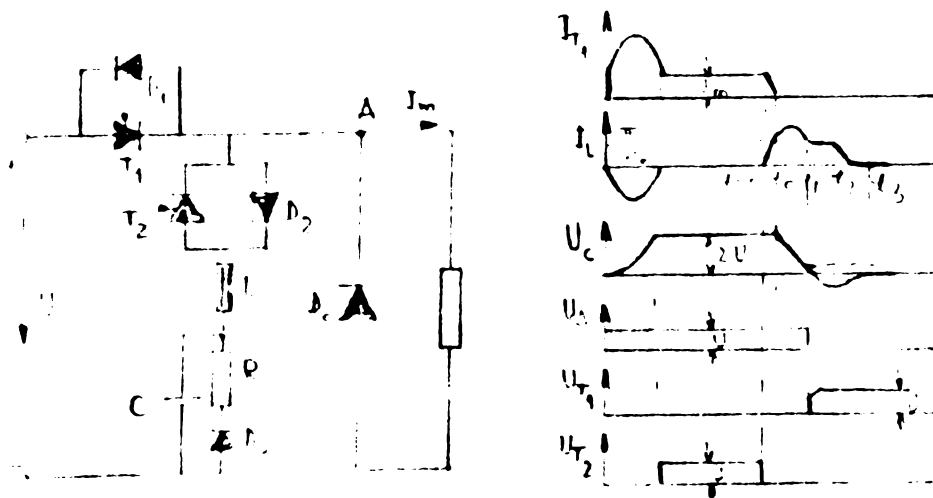


Fig.10 - Variator de tensiune continuă realizat de ACCEC

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 alta parte la bornele circuitului oscilant LC prin intermediul diodei D_2 . Condensatorul C se va încărca la tensiunea "U". Când se da 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 când 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 curenți de sarcină zero, poate fi folosită și la sarcini care conțin t.e.m. permițînd durate relative de conducție de la zero la 1.

În fig.11,12 sînt prezentate schemele variatoare de tensiune continuă elaborate de ICPE București [94].

Aceste scheme se caracterizează printr-o funcționare sigură urmărindu-se protejarea ventilelor semiconductorilor la variațiile rapide ale curentului și tensiunii prin conectarea în serie cu tiristorul principal și cu diode de roata liberă a unor inductanțe de limitare a lui

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

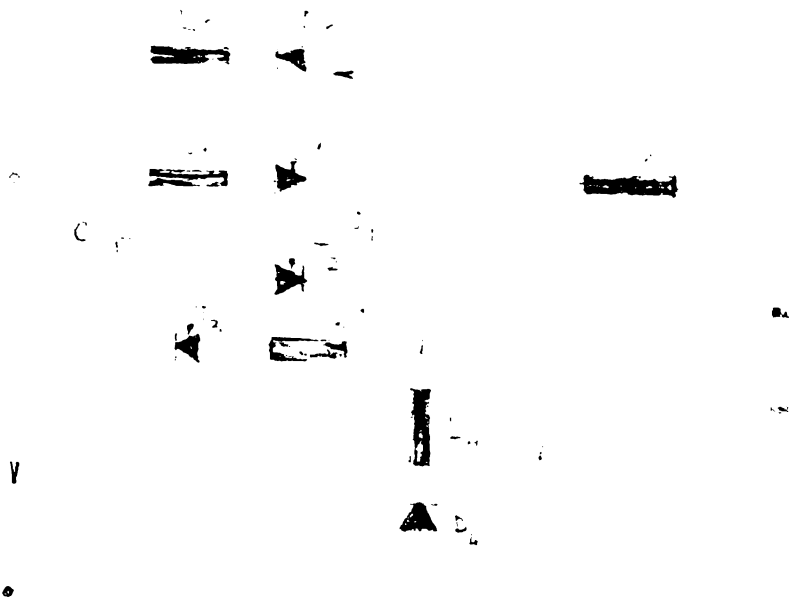


Fig.11- Schema varistorului de tensiune continuă cu încarcarea condensatorului în serie în sarcina realizată de ICPE Buc.

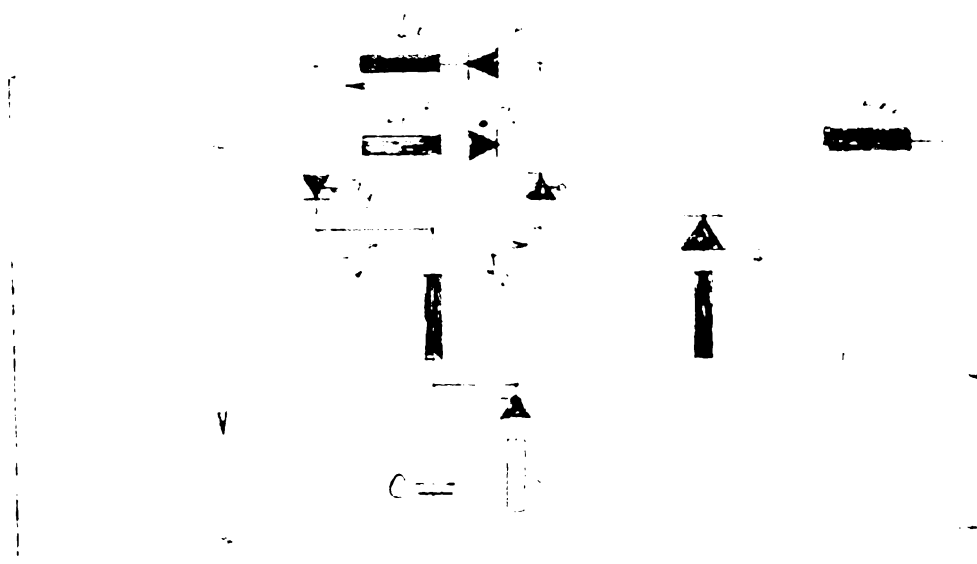


Fig.12- Schema varistorului de tensiune continuă cu încarcarea condensatorului independent de sarcină realizată de ICPE.

3.3. Comanda varistoarelor

Schema de comandă este prezentată principial în fig.13 în care pentru simplificare variatorul e reprezentat printr-un întreruptor electronic, V și o diodă de descarcare D [60].

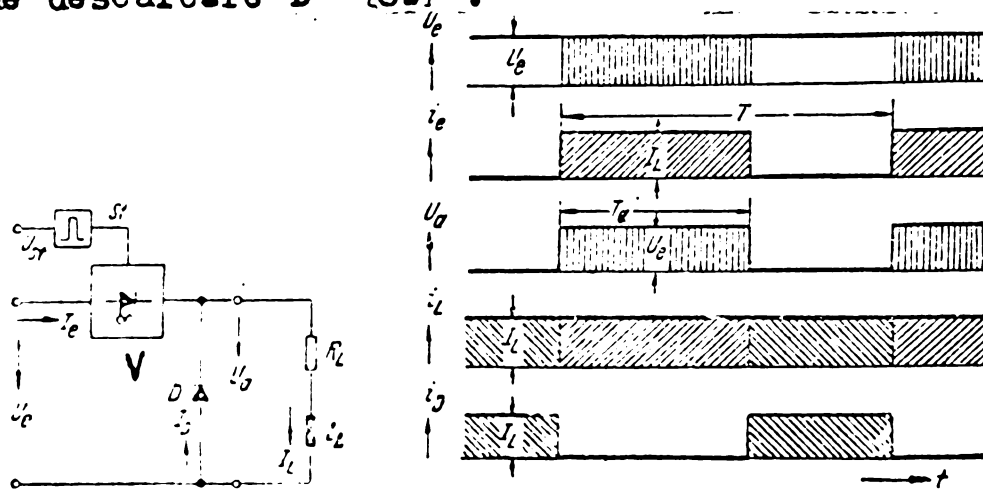


Fig.13 - Variator de tensiune continuă idealizat.

Variația în timp a tensiunilor și curenților.

Întreruptorul va fi închis printr-un impuls de comandă și va fi deschis prin impulsul următor. Se presupune că proprietățile întrepruptorului sînt ideale, timpul de comutație infinit mic iar constanta de timp a circuitului de sarcină este mai mare decît perioada T .

În condițiile unei tensiuni de alimentare constantă valoarea medie a tensiunii de ieșire poate fi variată continuu între zero și U_e prin variația duratei relative de conducție δ care reprezintă raportul între intervalul de conducție T_1 și perioada T . Variația sub formă de impulsuri a tensiunii de ieșire U_a conduce în general la un curent de sarcină I_L avînd un continut de armonici superioare. În ipoteza $T \ll \frac{L_L}{R_L}$ curentul va fi bine filtrat de inductanța circuitului de sarcină. Prin sarcină va circula un curent practic continuu. Curentul prin sursa de alimentare va fi pulsatoriu avînd valoarea medie

$$I_e = \delta I_L \quad (8)$$

Durata relativă de conducție δ 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 repertul între constante de timp a sarcinii și perioada 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 frecvența apar în întregime numai la frecvența maximă.

Dacă variatorul este inclus într-un circuit de reglare a curentului așa cum se arată în fig. 14 se poate aplica o comandă bipozițională a curentului de sarcină. În acest caz nici intervalul de conducție și nici frecvența nu sînt constante.



Fig.14- Variator de tensiune continuă idealizat, cu reglare bipozițională. Variație în timp a curentului prin sarcină.

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

Frecvența de lucru depinde de lățimea benzii de toleranță Δi , de constante de timp a sarcinii și de mărimea valorii impuse a curentului (fig.15) 60

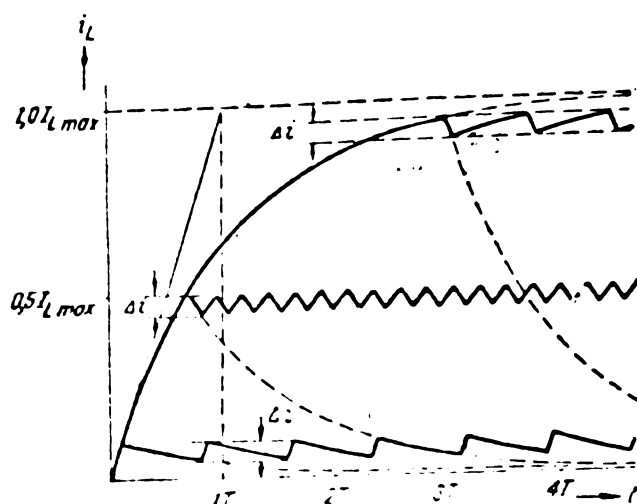


Fig.15 - Variația în timp a curentului pentru trei valori diferite ale valorii impuse ale curentului de sarcină.

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 0,1 și 0,9 și o frecvență mai ridicată pentru 0,1 și 0,9 [35]

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

3.4. Utilizarea varistorului de tensiune continuă în schemele de acționare cu motoare de curent continuu cu excitația 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 varistorul 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.16)

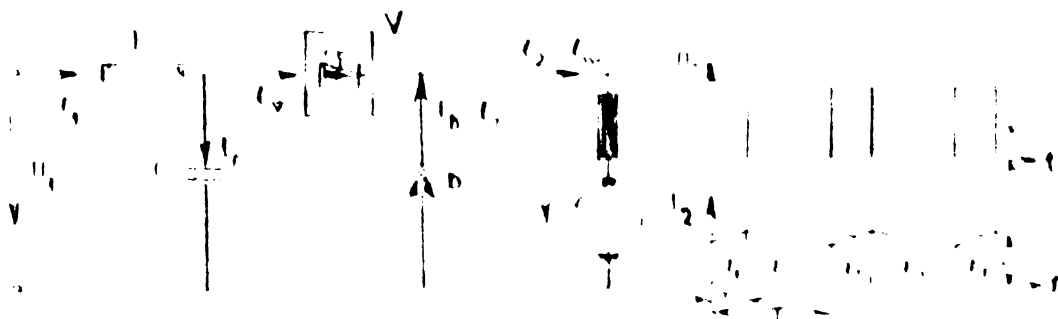


Fig.16 - Variația prin impulsuri a tensiunii de alimentare.

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

Domeniul de reglare este cuprins între zero ($\delta = 0$) și U_e (când $\delta = 1$).

Diode D conectată în paralel cu motorul asigură circulația curentului prin motor în perioade când variatorul de tensiune este blocat.

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

În scopul reducerii ondulațiilor curentului de sarcină, comutarea acestuia de la sursa de alimentare pe circuitul de roata 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 când circuitul conține inductanțe are rolul de înmagazinare a energiei în perioadele în care alimentarea sarcinii este întreruptă ($T-T_1$) cedînd-o sarcinii când 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.

Variind 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 metoda clasică de variație a tensiunii de alimentare.

3.4.2. Variația prin impulsuri a rezistenței.

Conectând varistorul de tensiune continuă în derivație pe o rezistență R se va obține o variație a valorii acesteia conform relației :

$$R_{ef} = (1 - \delta) R \quad (9)$$

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

Deoarece rezistența R este inserată în circuitul de sarcină (fig.17) variația tensiunii la bornele acesteia se realizează variind prin impulsuri valoarea rezistenței R .

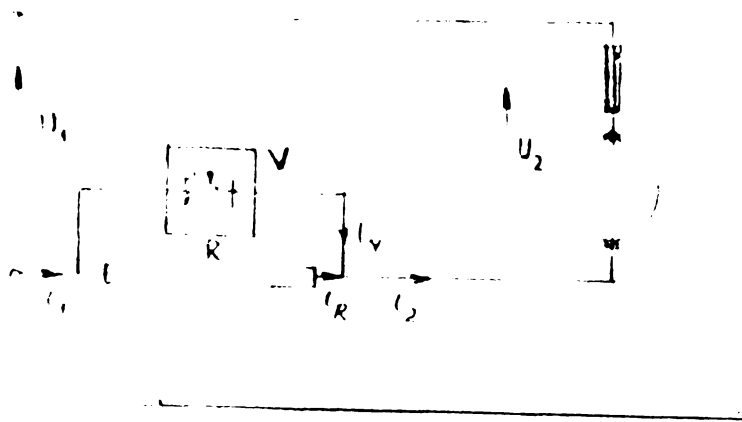


fig.17 - Variația prin impulsuri a valorii rezistenței.

Curentul de sarcină i_2 va rezulta prin însumarea curentului ce străbate varistorul (i_v) în perioadele de conducție ($0 \leq t \leq T_1$) cu curentul ce străbate rezistența (i_R) în perioadele când varistorul este blocat ($T_1 \leq t \leq T$). Introducerea rezistenței în circuit va corespunde unei diminuari 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.

Daca se dimensioneaza corespunzator, 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 măsura ce turația motorului scade.

3.4.3. Variația prin impulsuri a inductanței.

Cuplînd un variator de tensiune continuă în paralel cu o inductanță se obține o variație a valorii acesteia în funcție de durata relativă de conducție (fig.18)

-ef- α -

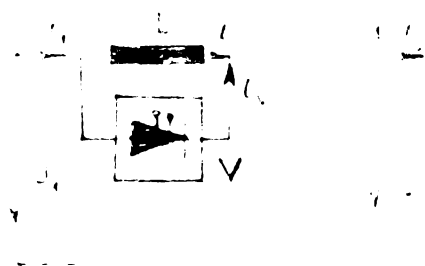


Fig.18 - Variația prin impulsuri a valorii inductanței.

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

Fără de schema folosită pentru variația rezistenței, prezenta inductanței va face ca la aprinderea varistorului curentul prin inductanță să fie menținut pe seama energiei acumulate în inductență așa încât prin varistor va circula diferența dintre curentul de sarcină și curentul prin inductență.

$$i = i_2 - i_L$$

(11)

Dupa stingerea varistorului ($r = 0$) tot ca urmare a efectului inductanței are loc o diminuare a curentului de sarcină la valoarea

$$i_2 = i_L$$

Cu cât durată relativă de conducție σ' și perioade de funcționare T sînt mai mari cu atât curentul i_T va avea o valoare mai mare iar i_L o valoare mai mică. Aceasta conduce la oscilații inadmisibil de mari ale curentului de sarcină. Pentru a preîntîmpina această situație trebuie compensat efectul inductanței printr-o capacitate tampon conectată în paralel la bornele inductanței (fig. 19).



Fig.19- Compensarea efectului inductanței printr-o capacitate tampon.

..//..

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 încarca pînă ce tensiunea sa atinge valoarea tensiunii de la bornele inductanței. În acest timp curentul i_c 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 descarcarea condensatorului C pe inductanță. După inversarea polarității tensiunii de la bornele condensatorului, curentul de sarcină va putea circula și prin dioda D.

Prin variator va circula numai diferența curenturilor. 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 principal să fie cel puțin egal cu 4-5 t_1 (t_1 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 micșorarea frecvenței se mărește limite minime a timpului de blocare, o parte importantă din energia sursei nu poate fi transmisă sarcinii. Din contră, dacă se mărește limite minime 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 varistorului. Se pot distinge trei categorii de energie disipată în varistor care sînt proporționale cu frecvența de reglare: pierderile la comutație în semiconductoare, pierderile în circuitele (R.C) de protecție a semiconductoarelor, pierderile în rezistențe de smorzire.

3.5.2. Influența frecvenței asupra sarcinii [18]

S-a arătat anterior că la alimentarea unei sarcini inductive sau rezistive - inductive prin varistor 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.19' unde sarcina este reprezentată de un motor cu rezistență R_m și inductanță L_m .

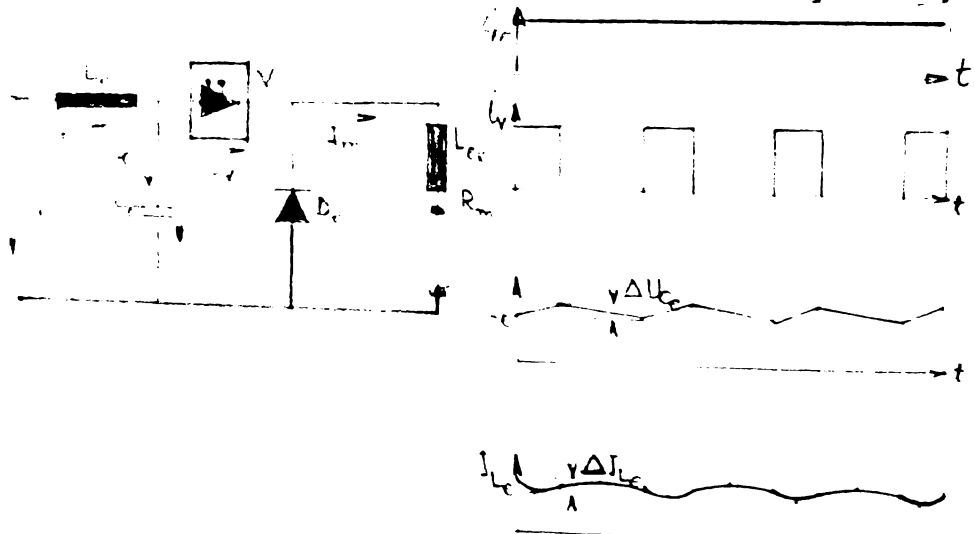


Fig. 19' - Influența frecvenței varistorului asupra sarcinii.

Se poate ușor constata că ondulația este nulă pentru $\alpha = 0$ și $\alpha = 1$ și este maximă pentru $\alpha = 0,5$. Ondulația maximă este dată de relația :

$$\Delta I_{Lm} \max = \frac{U}{R_m} \ln \frac{R_m T}{4 L_m} \approx \frac{U T}{4 L_m} \quad (12)$$

Ondulația 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 sursă cu rezistența 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_e și un condensator C_e (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 $L_e C_e$, deoarece în acest caz rezultă supratensiuni de valoare ridicată.

Condensatorul C_e face posibilă trecerea curenților pulsatori, 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 comutației variatorului) el reduce supratensiunile 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.

Întreruperile 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

$$(U_c)_{max} = \sqrt{\frac{L_e}{C_e}} (I')_{max} \quad (13)$$

Intreruperile provocate de funcționarea normală a variatorului se deosebesc de cazul anterior prin durată scurtă a perioadelor de cuplare și de decuplare. Aceste intreruperi 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 tensiunea ventilelor semiconductoare este determinată de suma $[U_g + (\Delta U_c)_{max}]$.

Presupunind ca curentul de sarcină este perfect constant se poate determina ondulara maximă a tensiunii la bornele condensatorului a carei valoare depinde de durata relativă de conducție :

$$(\Delta U_c)_{max} = \delta \frac{I_m}{\omega_c C_c} t_7 \left(\frac{\pi}{2}, \frac{f_c}{f} \right) \quad (14) \quad [18]$$

unde :

δ - raportul ciclic

I_m - curentul prin sarcină

$$\omega_c = 2\pi f_c = \frac{1}{\sqrt{L_t C_c}}$$

f - frecvența de lucru a variatorului

$$L_t = L_{rețea} + L_c$$

Ecuația prezintă un punct de rezonanță în care amplitudinea maximă a tensiunii tinde către infinit pentru $f=f_c$. 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 ca este mai comod să se păstreze constantă frecvența de lucru a variatorului și să se acționeze asupra frecvenței de rezonanță astfel ca raportul $\frac{f_c}{f} \neq 1$.

Cum frecvența de rezonanță a circuitului de filtrare depinde și de inductanța liniei de contact a carei valoare variază în funcție de poziția vehiculului rezultă că variația raportului $\frac{f_c}{f}$ într-o gamă de vapori care să evite punctul de rezonanță, ar impune reglarea capacității de intrare C_c 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 (12) rezultă că dacă $f \ll f_0$ într-o perioadă de reglare vor apărea mai multe puncte extreme ale tensiunii pe condensator iar ondularea maximă a tensiunii va fi

$$(\Delta U_{ce})_{max} = \frac{2I_m}{\omega_0 C_e} \frac{1}{\sin \pi \frac{\omega_0}{\omega}} \quad (15)$$

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

$$(\Delta U_{ce})_{max} = \frac{I_m}{\omega_0 C_e} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} \frac{\omega_0}{\omega} \right) \quad (16)$$

Tot în fig.19 se prezintă variația în timp a curenților prin elementele circuitului și a tensiunii la bornele condensatorului.

Din cele prezentate rezultă că pentru a limita supratensiunile determinate de funcționarea variatorului la valori rezonabile trebuie să se aleagă $f \gg f_0$. În general pentru dimensionarea economică a elementelor filtrului de intrare se cere îndeplinita condiție

$$f \geq (2-3) f_0 \quad (17)$$

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

$$(\Delta I_c)_{max} = I_m \left[\frac{1}{\cos \left(\frac{\pi}{2} \frac{\omega_0}{f} \right)} - 1 \right] \quad (18)$$

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_0 și C_0 precum și de condiția de independență minimă față de armonice de 50 Hz din curentul liniei de contact. Frecvența de lucru a variatorului este legată la rândul 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 (17) și în același timp să corespundă unor dimensiuni minime pentru elementele filtrului. Astfel frecvența optimă de oscilație corespunde valorii maxime obținute

în condiție 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_f . Aceasta 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 undulației tensiunii pe condensator.

$$\Delta U_{ce, \max} = \frac{I_m T}{2 C_c} \quad (19) \quad [35]$$

Se constată că pentru aceeași undulare a tensiunii capacitățile condensatorului va fi cu atât mai mică cu cât frecvența de reglare va fi mai mare.

Inductanța L_e a filtrului de intrare reduce undalarea curentului 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 prezente curentului alternativ care circulă în rețea poate perturba circuitele de semnalizare sau de telecontrol.

Dacă se ia $\frac{f_0}{f} < \frac{1}{2}$ și se înlocuiește în relația (18) știind că amplitudinea maximă a undulării se obține pentru $\beta = 0,5$ rezultă :

$$\Delta I_{\max} = \frac{I_m T}{324 C_c} \quad (20) \quad [35]$$

Deci pentru aceeași undulare a curentului, 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]

Este lesne 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 d nu poate fi redus sub o anumită limită. Aceasta frecvență nu se alege la întîmplare 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 apărea armonici cu frecvența $\frac{Kf}{p}$ și multiplii acesteia.

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

Rezultă deci că în cazul comenzii decalate curentul din linie va conține pe lînga armonicile produse de stațiile de redresare și frecvențele datorate funcționării variatoarelor, $\frac{Kf}{p}, 2K\frac{f}{p}, 3K\frac{f}{p}$ etc. (armonică aI^a, aII^a, aIII^a, etc. ale frecvenței rezultante intercalate) și $\frac{f}{p}, 2\frac{f}{p}, 3\frac{f}{p}$ 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 acestei 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 minimă a impedanței la frecvența de 50 Hz inclusiv pentru cazul cînd vehiculul se găsește lîngă 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, prin instalarea pe vehicul a unui filtru de intrare suplimentar care să aibă o impedanță suficient de mare pentru frecvențe de 50 Hz. Dimensionarea filtrului pentru frecvențe proprii 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 frecvență prea mare de lucru a varistorului. 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 varistorului rezultă că un compromis între imperativele varistorului, ale sarcinii, ale sursei de alimentare și ale altor instalații electronice a căror funcționare poate fi perturbată și cele legate de dimensiuni și prețul celulei filtrului de intrare.

O soluție foarte interesantă a problemei de alegere a frecvenței este folosirea comenzii decalate. Această constă în utilizarea a două sau mai multe varistoare 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.20 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 varistoare 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 varistorilor de tensiune continuă componente. Tensiunea

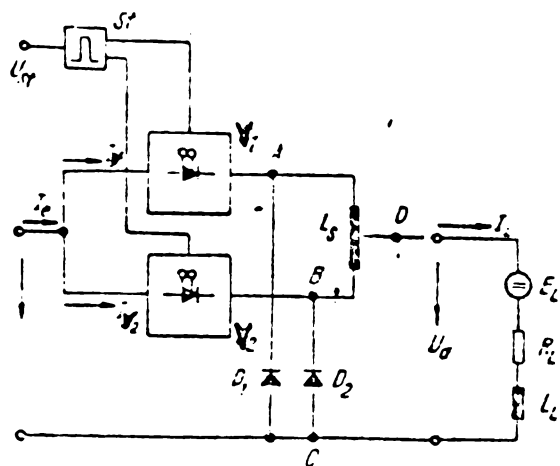


Fig.20 - Schema de principiu a comenzii decalate în cazul unui singur motor de tracțiune.

de ieșire a schemei compuse va fi menținută de bobina 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.

În cazul unui vehicul cu două sau mai multe motoare [60] (fig.21) 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 $\frac{T}{k}$ marimile de intrare (I_1 și U_{ce}) vor oscila cu frecvența $k.f.$ În această situație

$$(\Delta U_{ce})_{max} = \frac{I_m T}{k C_e} \quad ; \quad i_1 \propto I_m$$

și amplitudinile maxime se obțin pentru $\alpha' = 1/2k, 3/2k,$ 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.

..//..

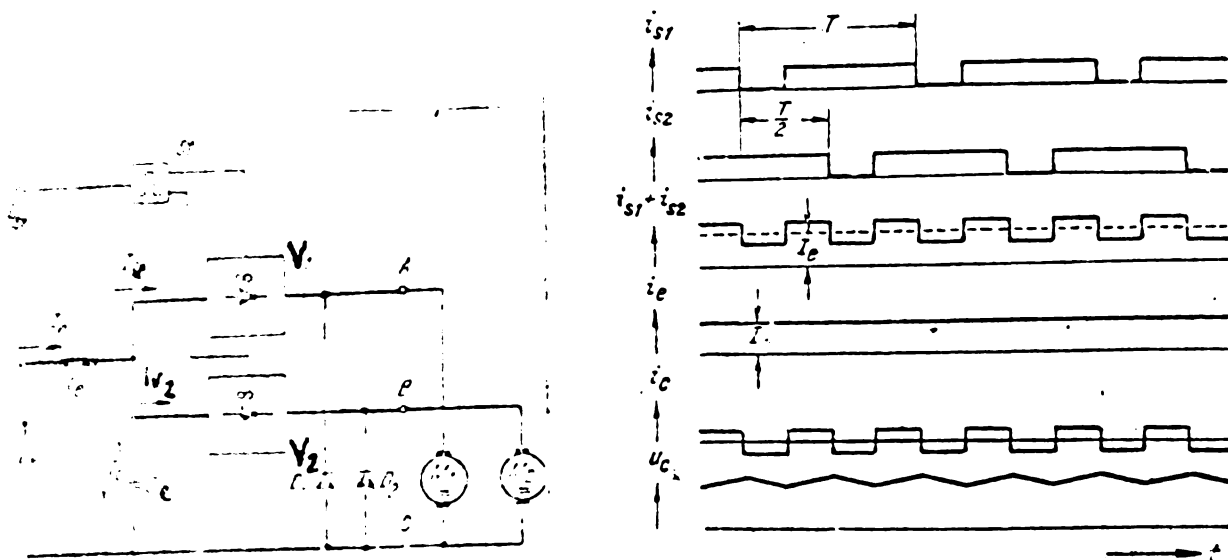


Fig. 21 - Scheme de principiu a comenzii decelate cu doua variatoare de tensiune continua în cazul unui vehicul cu doua sau mai multe motoare.

3.6. Condiții pentru asigurarea continuității funcției onorată schemelor cu variator [18]

Curentul de încărcare a condensatorului filtrului de intrare, poate provoca declanșarea întreruptorului automat dacă nu se asigură o reducere a raportului $\frac{di}{dt}$. Acest lucru se realizează pe de o parte conectând inductanța filtrului de intrare, înaintea condensatorului și pe de altă parte prin intercalarea unei rezistențe de preanclanșare imediat după întreruptor, rezistență care se scurtcircuitează imediat după încărcarea condensatorului. Rezistența de preanclanșare este indicată atunci când pentru limitarea raportului menționat mai sus ar fi necesară supradimensionarea inductanței filtrului.

Întreruperea alimentării variatorului fie ca urmare a declanșării întreruptorului automat fie datorită unui contact necorespunzător între captator și linia de contact sau între contact și sîmă fie la trecerile prin macăze 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 sarcină 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 scderea tensiunii sub limite admise.

Cap.4. Variatorul 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.

4.1. Utilizarea variatorului pentru pornirea motorului de tracțiune

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. 22 și 23.

Fig.22 - Pornirea motorului de curent continuu cu excitație serie prin comanda prin impulsuri a valorii rezistenței.

Fig.23 - Pornirea motorului de curent continuu cu excitație serie prin comanda prin impulsuri a tensiunii de alimentare a motorului.

În scheme din fig.22 modificarea valorii tensiunii la bornele motorului se realizează prin variația continuă a rezistenței de pornire R inseriată în circuitul motorului.

Variația tensiunii la bornele motorului și a curentului prin motor într-o perioadă de reglare în ipoteza $T < \tau$ este prezentată în fig. 24.

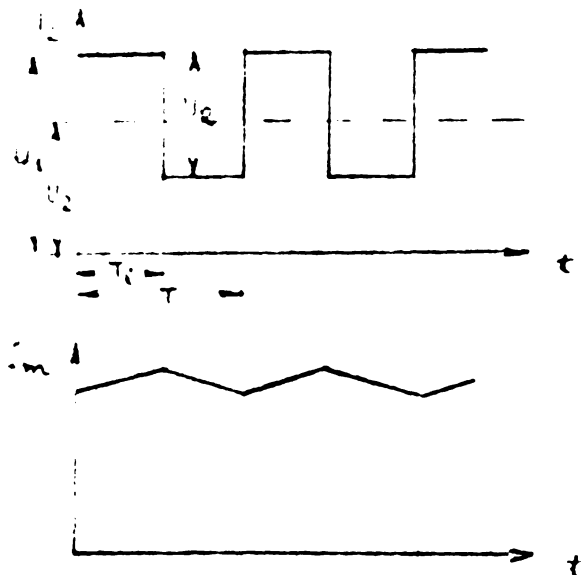


Fig.24 - Variația tensiunii la bornele motorului și a curentului prin motor în perioada pornirii cu schema din fig.22.

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

$$U_1 = (1 - \alpha) R I_m \quad (21')$$

I_m fiind valoarea medie a curentului prin motor.

Variația curentului prin motor este dată de relații:

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

$$U_1 = E + r i + L \frac{di}{dt} \quad (21'')$$

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

$$U_1 = E + (r + R) i + L \frac{di}{dt} \quad (21''')$$

Din relațiile (21''), (21''') se determină legea de creștere, respectiv de scădere a curentului de pornire într-o perioadă de reglare

$$i = \frac{U_1 - E}{r} (1 - e^{-\frac{t}{Z_1}}) - I_{\min} e^{-\frac{t}{Z_1}} \quad (22)$$

$$i = \frac{U_1 - E}{r + R} (1 - e^{-\frac{t}{Z_2}}) + I_{\max} e^{-\frac{t}{Z_2}} \quad (23)$$

unde :

U_1 - tensiunea sursei de alimentare

E - t.e.m. a motorului

r - rezistența înfășurătorilor motorului

L - inductanța înfășurătorilor motorului

R - rezistența de pornire

$$Z_1 = \frac{L}{r}$$

$$Z_2 = \frac{L}{r + R}$$

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

Ținând seama de faptul că la $t = T_i = \delta T$

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

$$I_{\max} = \frac{U_1 - E}{r} (1 - e^{-\frac{\delta T}{Z_1}}) + I_{\min} e^{-\frac{\delta T}{Z_1}} \quad (24)$$

$$I_{\min} = \frac{U_1 - E}{r + R} (1 - e^{-\frac{L \delta T}{Z_2}}) + I_{\max} e^{-\frac{L \delta T}{Z_2}} \quad (25)$$

care conduc la

$$I_{\max} = \frac{\frac{U_1 - E}{r} (1 - e^{-\frac{\delta T}{Z_1}}) + \frac{U_1 - E}{r + R} e^{-\frac{\delta T}{Z_1}} (1 - e^{-\frac{L \delta T}{Z_2}})}{1 - e^{-\frac{L \delta T}{Z_2}} e^{-\frac{\delta T}{Z_1}}} \quad (26)$$

$$I_{\min} = \frac{\frac{U_1 - E}{r} e^{-\frac{L \delta T}{Z_2}} (1 - e^{-\frac{\delta T}{Z_1}}) + \frac{U_1 - E}{r + R} (1 - e^{-\frac{L \delta T}{Z_2}})}{1 - e^{-\frac{L \delta T}{Z_2}} e^{-\frac{\delta T}{Z_1}}} \quad (27)$$

Din aceste relații se pot determina, pentru circuitul dat, variația raportului ciclic δ 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 $E = k\Omega$ și

$$i = \frac{\frac{U_1 - k\Omega}{r} (1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}}) + \frac{U_1 - k\Omega}{r+R} e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}} (1 - e^{-\frac{L\delta}{\tau_2 T}})}{1 - e^{-\frac{L\delta}{\tau_2 T}} e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}}} \quad (28)$$

$$i = \frac{e^{-\frac{L\delta}{\tau_2 T}} \frac{U_1 - k\Omega}{r} e^{-\frac{L\delta}{\tau_2 T}} + \frac{U_1 - k\Omega}{r+R} (1 - e^{-\frac{L\delta}{\tau_2 T}})}{1 - e^{-\frac{L\delta}{\tau_2 T}} e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}}} \quad (29)$$

Curentul mediu de pornire este dat de relația

$$I_m = \frac{1}{T} \left\{ \int_0^{\delta T} \left[\frac{U_1 - k\Omega}{r} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) + I_{min} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right] dt + \int_{\delta T}^{\delta T + \tau_2} \left[\frac{U_1 - k\Omega}{r+R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}) + I_{max} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right] dt \right\} \quad (30)$$

care conduce la expresia

$$I_m = \frac{1}{T} \left\{ \frac{U_1 - k\Omega}{r} \left[\delta T - \tau_1 (1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}}) \right] + \frac{U_1 - k\Omega}{r+R} \left[(1 - \delta) T - \tau_2 (1 - e^{-\frac{L\delta}{\tau_2 T}}) \right] - \tau_1 I_{min} (1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}}) - \tau_2 I_{max} (1 - e^{-\frac{L\delta}{\tau_2 T}}) \right\} \quad (31)$$

Deci considerăm ca în timpul pornirii I_m rămâne constant, se poate scrie relația pentru caracteristica mecanică a motorului. În aceste condiții :

$$U_1 = E + I_m [r + (1 - \delta) R] \quad (32)$$

Din 32 rezultă :

$$\delta = \frac{U_1}{k\phi} - \frac{I_m [r + (1 - \delta) R]}{k\phi} \quad (33)$$

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 măsura ce motorul se accelerează durata relativă de conducție crește astfel ca 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 deosebire că durata relativă de conducție poate fi modificată continuu de la zero la unu astfel ca aceste caracteristici cuprind întregul domeniu dintre caracteristica artificială corespunzătoare la $\delta = 0$ și caracteristica mecanică naturală (fig.25).

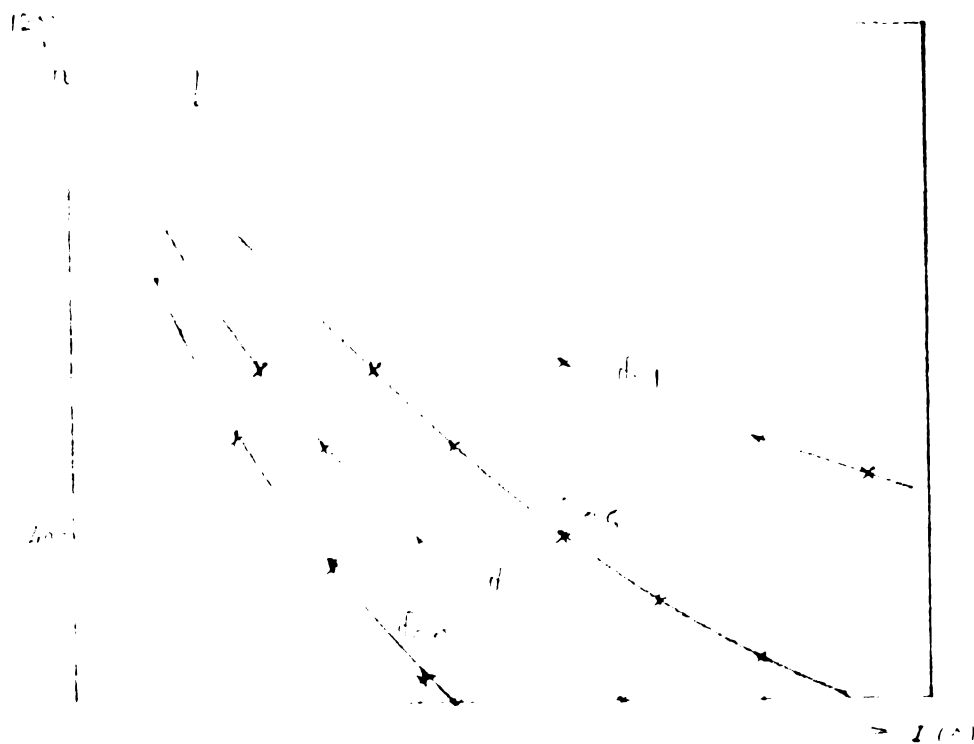


Fig.25 - Caracteristicile mecanice ale motorului în cazul schemei din fig. 22 determinate prin calcul pe baza relației (33)

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

Schemă din fig.23 realizează pornirea motorului de tracțiune modificând continuu tensiunea la bornele motorului prin inserierea variatorului în circuitul de alimentare al acestuia. Așa cum se observă din figură, schema conține în plus dioda D_0 care asigură continuitatea trecerii curentului prin motor în perioadă când variatorul este blocat.

Să 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 ale variatorului.

$$-E + r_1 i + L \frac{di}{dt} = 0 \quad (0 \leq t \leq T_0) \quad (34)$$

$$E = E + r_1 i + L \frac{di}{dt} \quad (T_0 \leq t \leq T) \quad (35)$$

În condițiile motorului saturat rezultă:

$$i = \frac{E - k_n}{r_1} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) + I_{min} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (36)$$

$$i = \frac{E + k_n}{r_1} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) + I_{max} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (37)$$

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

$$I_{min} = \frac{1}{r_1} \left[U_1 \frac{1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau_1}}} - k_n \right] \quad (38)$$

$$I_{max} = \frac{1}{r_1} \left[U_1 \frac{e^{-\frac{(1-\delta)T}{\tau_1}} (1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau_1}})}{1 - e^{-\frac{T}{\tau_1}}} - k_n \right] \quad (39)$$

Valoarea medie a curentului prin motor va fi dată de relația

$$I_{med} = \frac{1}{T} \left\{ \int_0^{T_0} \left[\frac{U_1 - k_n}{r_1} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) - I_{min} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right] dt + \int_{T_0}^T \left[\frac{U_1 + k_n}{r_1} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) + I_{max} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right] dt \right\} \quad (40)$$

care conduce la

$$I_m = \frac{1}{T} \left\{ \frac{U_1 - k_n}{r} \left[\sigma T - Z_1 \left(1 - e^{-\frac{\sigma T}{Z_1}} \right) - \frac{k_n}{r} \left((1 - \sigma) T - Z_2 \left(1 - e^{-\frac{(1 - \sigma) T}{Z_2}} \right) \right) \right] + \right. \\ \left. + Z_1 I_{max} \left(1 - e^{-\frac{L - \sigma T}{Z_1}} \right) + Z_2 I_{min} \left(1 - e^{-\frac{\sigma T}{Z_2}} \right) \right\} \quad (41)$$

In aceste conditii poate fi scrisa relatia :

$$\sigma U_1 = E + r I_m \quad (42)$$

din care rezultă

$$n = \frac{\sigma U_1}{K_e \phi} - \frac{I_m r}{K_e \phi} \quad (43)$$

Caracteristicile mecanice pentru diferite valori ale dăratei relative de conducție σ sînt prezentate în fig. 26

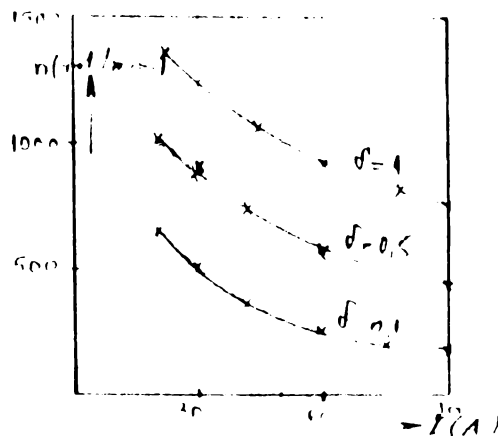


Fig.26 - Caracteristicile mecanice ale motorului în cazul schemei din fig. 23, determinata prin calcul pe baza relatiei (43)

Si în acest caz sînt eliminate socurile forței de tracțiune.

Este evident ca aceasta schemă prezintă avantajul ca pornirea se realizează fara pierderi de energie, lipsind rezistența de pornire.

In schema de pornire cu rezistența pierderile de energie în rezistența în intervalul de timp dt vor fi date de relația

$$W_p = (1 - \sigma^2) R I_m^2 dt \quad (44)$$

Pe tota durata procesului de pornire energie disipată în rezistența de pornire va fi

$$W_p = \int_0^{t_p} (1 - \sigma^2) R I_m^2 dt = R I_m^2 t_p - R I_m^2 \int_0^{t_p} \sigma^2(t) dt \quad (45)$$

Se observa ca 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.22, 23 rezultă ca pe lîngă dezavantajele introducerii unor pierderi suplimentare și a îngustării domeniului de comandă, prima schemă prezintă și doua 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 întreruptorul electronic nu poate depăși produsul dintre curenții de sarcină în momentul întreruperii (I_{max}) și rezistența în paralel.

4.2. Variatorul de tensiune continuă în schemele de modificare a turației motorului de tracțiune

Modificarea turației motorului de tracțiune 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. 22, 23. Din considerente economice se recomandă schema fara pierderi.

Din relația (43) se observa că funcționarea motorului la turație constantă și în condițiile unei sarcini constante presupune menținerea constantă a raportului ciclic. Variația sarcinii atrage după sine modificarea lui δ 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 ^{decît} la pornire, este necesară liniarizarea caracteristicii de magnetizare (fig. 32). În aceste condiții expresia t.e.m. devine

$$E = a_n + b_n I_m \quad (46)$$

I_m fiind valoarea medie a curentului de sarcină.

Variația curentului prin motor în cele două perioade de lucru ale variatorului în baza relațiilor (34) (35) va fi

$$i = \frac{U_1 - a_n}{r + b_n} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + I_{min} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (47)$$

pentru $0 \leq t \leq \delta T$

$$i = -\frac{a_n}{r + b_n} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + I_{max} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (48)$$

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

Valoarea medie a curentului de sarcină va fi dată de relația

$$I_m = \frac{1}{T} \left\{ \frac{U_1 - a_n}{r + b_n} \left[\delta T - \tau \left(1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau}} \right) \right] - \frac{a_n}{r + b_n} \left[(1 - \delta) T - \tau \left(1 - e^{-\frac{(1 - \delta) T}{\tau}} \right) \right] - \tau I_{max} \left(1 - e^{-\frac{(1 - \delta) T}{\tau}} \right) + \tau I_{min} \left(1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau}} \right) \right\} \quad (49)$$

$$\tau = \frac{L}{r + b_n}$$

Se observa că gradul de saturație influențează rapiditatea desfășurării proceselor de variație a curenților în circuit.

Pentru modificarea turăției prin slabirea cîmpului se pot folosi mai multe variante de scheme.

Schemă prezentată în fig. 27 se caracterizează prin faptul că variatorul este conectat în paralel cu înfășurarea de excitație a carei inductanță poate fi variată în mod continuu conform relației

$$L_{ef} = (1 - \delta) L_e \quad (50)$$

$$L_{ef} = \frac{(1 - \delta) L_e}{\delta}$$

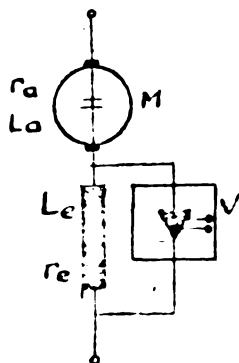


Fig.27 - Slabirea cîmpului motorului prin conectarea variatorului în paralel cu înfășurarea de excitație

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

$$L_a \frac{di}{dt} + r_a i + E \quad (0 \leq t \leq \delta T) \quad (51)$$

$$L_e \frac{di}{dt} + r_e i + E \quad (\delta T \leq t \leq T) \quad (52)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} &= -\frac{E}{T} \\ E &= E_0 e^{-\frac{t}{T}} \end{aligned}$$

Rezultă următoarele relații de variație a curentului

$$\frac{E}{r_a} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \right) + I_{min} e^{-\frac{t}{T_1}} \quad (0 \leq t \leq \delta T) \quad (53)$$

$$\frac{E}{r_e} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) + I_{max} e^{-\frac{t}{T_2}} \quad (\delta T \leq t \leq T) \quad (54)$$

Curentul mediu prin motor este dat de relația

$$I_{rot} = \frac{1}{T} \left\{ \frac{U_1 - E}{r_a} \left[\sigma T - z_1 \left(1 - e^{-\frac{\sigma T}{z_1}} \right) \right] + \frac{U_1 - E}{r} \left[(1 - \sigma) T - z_2 \left(1 - e^{-\frac{(1 - \sigma) T}{z_2}} \right) \right] + z_2 I_{max} \left(1 - e^{-\frac{(1 - \sigma) T}{z_2}} \right) + z_1 I_{min} \left(1 - e^{-\frac{\sigma T}{z_1}} \right) \right\} \quad (55)$$

unde

$$z_1 = \frac{L_a}{r_a}$$

$$z_2 = \frac{L}{r}$$

Fluxul motorului va fi dat de relația

$$\phi = (1 - \sigma) L_e I_e$$

Deoarece $\tau_c = \frac{L_e}{r_e}$ curentul de înfașurare de excitație nu se anulează decât la $\sigma \pm 1$; această situație trebuie evitată fie prin schema de comandă care nu permite creșterea valorii lui σ 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 suțtare.

În [18] este analizată o schemă asemănătoare schemei clasice de slabire a cîmpului varistorului, fiind conectat la bornele rezistenței de suțtare (fig. 28)

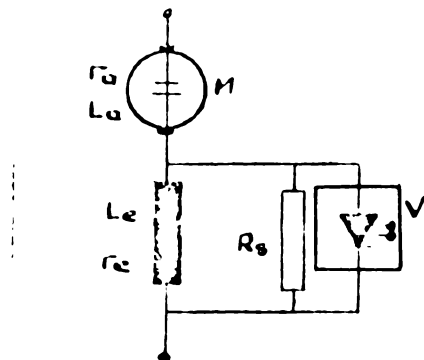


Fig.28 - Slabirea cîmpului prin comandă prin impulsuri a valorii rezistenței de suțtare.

Rezistențe de sântare R_s se alege în funcție de valoarea inițială admisibilă a coeficientului de subexcitare și de tensiune maximă admisibilă pe tiristorul principal care corespunde valorii maxime a curentului rotoric și valorii minime a coeficientului de subexcitare α_{\min} .

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

$$U_{\text{med}} = \alpha \cdot I_{\text{rot}} \cdot r_e \quad (57)$$

dar

$$U_{\text{med}} = \alpha \cdot I_{\text{rot}} \cdot r_e \quad (58)$$

deci

$$\alpha = \frac{U_{\text{med}}}{I_{\text{rot}} \cdot r_e} \quad (59)$$

se știe însă că

$$\alpha = \frac{R_s}{r_e + R_s} \quad (60)$$

Însă rezistența echivalentă de sântare este dată de relația

$$R_{\text{ec}} = (1 - \sigma^2) R_s \quad (61)$$

care conduce la relația

$$\alpha = \frac{R_s}{\frac{r_e}{1 - \sigma^2} + R_s} \quad (62)$$

Din 60' și 62' rezulta

$$r_e = \frac{1}{\alpha} R_s (1 - \sigma^2) (1 - \alpha) \quad (63)$$

care introdusă în (59) conduce la

$$U_{\text{med}} = I_{\text{rot}} R_s (1 - \alpha) (1 - \sigma^2) \quad (64)$$

Din 64' se poate stabili legea de variație a dăratei relative de conducție σ^2 în funcție de coeficientul de subexcitare α

$$\sigma^2 = 1 - \frac{\alpha r_e}{R_s (1 - \alpha)} \quad (65)$$

În rezistențe de sântare au loc pierderi de energie a caror valoare într-o perioadă de reglare este dată de relația

$$W_{R_s} = \int_0^T I_{R_s}^2 R_s dt \quad (66)$$

Dar

$$I_{R_s} = I_{rot} (1-\alpha) \quad (67)$$

și

$$R_s = \frac{\alpha r_e}{(1-\alpha)(1-d)} \quad (68)$$

Introducînd (67) (68) în (66) rezulta

$$W_{R_s} = \int_0^T I_{rot}^2 \frac{\alpha(1-\alpha)}{1-d} r_e dt \quad (69)$$

În relațiile de mai sus α reprezintă un parametru care variază în timp, marimea lui fiind determinată de marimea vitezei în fiecare moment care se comanda prin raportul ciclic d .

Valoarea medie a curentului prin rotor este dată de relația

$$I_{rot.m} = \frac{1}{T} \left\{ \frac{U_1 - E}{r_a} \left[dT - z_1 \left(1 - e^{-\frac{dT}{z_1}} \right) \right] + \frac{U_1 - E}{r_a + \alpha r_e} \left[(1-d)T - z_2 \left(1 - e^{-\frac{(1-d)T}{z_2}} \right) \right] + z_2 I_{max} \left(1 - e^{-\frac{(1-d)T}{z_2}} \right) + z_1 I_{min} \left(1 - e^{-\frac{dT}{z_1}} \right) \right\} \quad (70)$$

unde

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= \frac{L_a}{r_a} \\ z_2 &= \frac{L_a + L_e}{r_a + \alpha r_e} \end{aligned} \right\} \quad (71)$$

Este cunoscut faptul că slabirea cîmpului la motoarele de curent continuu cu excitație serie nu poate fi făcută pînă la valori mai mici de 20-25 % [18]. În aceste condiții durata relativă de conducție nu poate depăși valoarea 0,87 ^{S.N.C.F.} realizat o schemă de acționare la care slabirea de cîmp se realizează elegant cu ajutorul unui montaj simplu [36] Schema este prezentată în fig. 29.

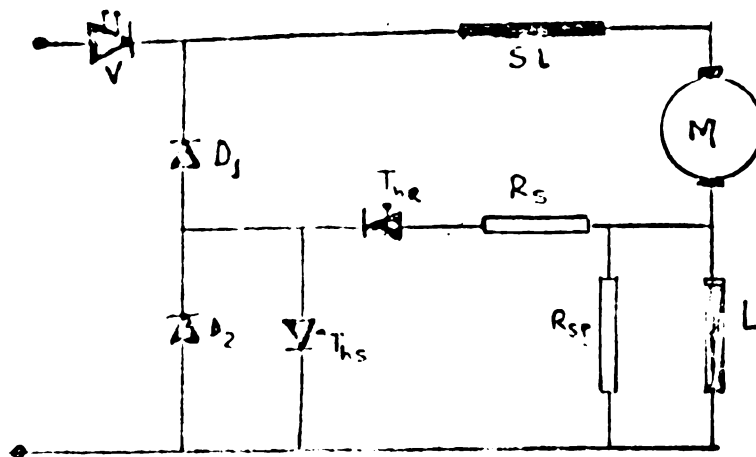


Fig.29 - Schemă pentru slăbirea cîmpului folosită de S.N.C.F.

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

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

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

-Tiristorul principal aprins T_S aprins. Curentul circula 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 permițînd blocarea lui T_S .

Se poate folosi și șuntajul independent cînd variator este legat în paralel cu înfășurarea de excitație și cu rezistența de șuntaj permanent. Se asigură un reglaj continuu și suplă.

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

Analizând sub toate aspectele această problemă în cazul tramvaiului s-a ajuns la următoarele concluzii :

1. Slăbirea câmpului în cazul motoarelor de tracțiune nu poate să depășească 20-25 % din considerente tehnice. În aceste condiții variatorul utilizat pentru slăbirea de câmp trebuie să aibă o construcție specială cu o gamă mai restrânsă de reglare care să nu permită funcționarea cu durate relative 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 câte un variator pentru slăbirea câmpului 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 câmpului în cazul tramvaiului la noi în țară nu se justifică din punct de vedere economic având în vedere că un asemenea echipament este destul de costisitor iar funcționarea motorului în regim de câmp 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 câmpului în trepte cu contactoare numărul treptelor variind de la un constructor la altul. Astfel firmele AEG, Siemens și Skoda 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 câmp se realizează în două trepte cu contactoare.

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

4.3. Utilizarea variatorului în schemele de frînare electrică.

4.3.1. Frînarea reostatică

Este cunoscut faptul că în schemele clasice frînarea reostatică se realizează de regulă în regim de generator autexcitat care debitează pe o rezistență a cărei valoare se micșorează treptat pe măsură scaderii 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.30.

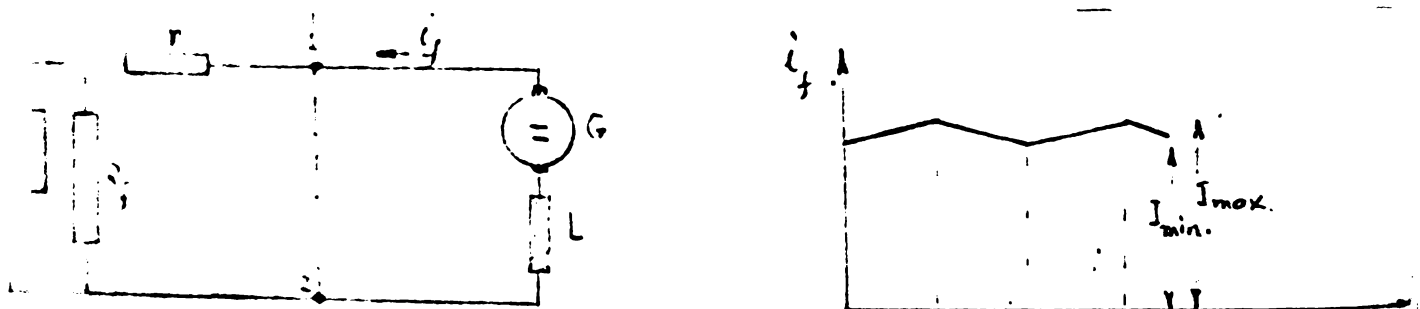


Fig.30 - Schema de principiu a frînării reostatice.

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

Scrînd relațiile tensiunilor la bornele fiecărui dipol în decursul unei perioade de reglare se obține.

- Pentru dipolul activ :

$$U_{12}^{(1)} = \kappa_e \phi n - L \frac{di_f}{dt} \quad (72)$$

- Pentru dipolul pasiv :

$$U_{12}^{(2)} = i_f [\Sigma r + (1 - \delta) R] \quad (73)$$

Condiția de funcționare stabilă este dată de egalitatea

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

$$\kappa_e \phi n - L \frac{di_f}{dt} = i_f [\Sigma r + (1 - \delta) R] \quad (74)$$

Sau

$$L \frac{di_f}{dt} = \kappa_e \phi n - i_f [\Sigma r + (1 - \delta) R] \quad (75)$$

Reprezentînd grafic în planul U, I_f termenii din partea dreapta a relației (75) se obțin curbele din fig. 31 [18]

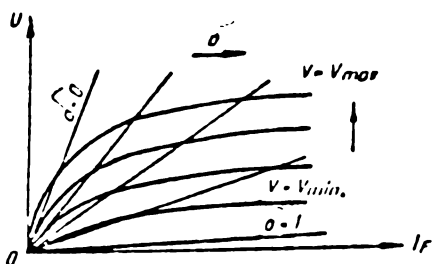


Fig.31 - Influența raportului ciclic asupra înclinării drepte de sarcină.

Se observa influența raportului ciclic δ asupra înclinării drepte de sarcină.

Din figure rezultă :

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

b) Turația minimă pînă la care motorul poate fi frînat corespunde valorii $\delta = 0$.

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

d) Frinarea motorului în domeniul turațiilor scăzute se realizează la valorile mici ale lui σ .

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

Stabilitatea funcționării este asigurată dacă

$$\frac{d}{dt} (L \frac{di_f}{dt}) < 0 \quad \text{sau}$$

$$\frac{dE}{di_f} < r + (1 - \sigma) R \quad (76)$$

Rezultă necesitatea precizării valorii $\frac{dE}{di_f}$ care se poate face numai liniarizînd caracteristica $E=f(i_f)$ (fig.32).

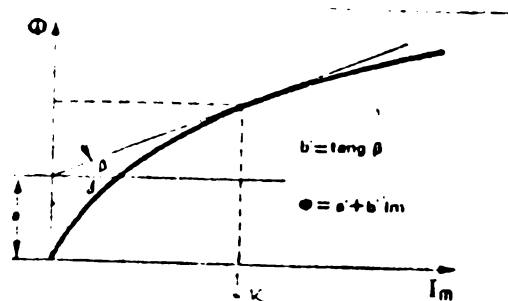


Fig.32 - Liniarizarea caracteristicii de magnetizare.

$$E = a + b i_f \quad (77)$$

Am ținut seama de faptul că pentru regimul stabil de funcționare, curentul de frinare corespunde unei valori $i_f = i_{f0}$.

$$\frac{dE}{di_f} = \frac{d}{di_f} (a + b i_f)$$

adică

$$\frac{dE}{di_f} = b \quad (78)$$

Înlocuind 78 în (76) rezultă

$$b < r + (1 - \sigma) R \quad (79)$$

Interesează cazul cînd termenul din dreapta din relația (79) are valoare maximă ($\sigma = 0$)

Rezultă :

$$R > b n - \varepsilon r \quad (80)$$

Din (80) rezultă că rezistența de frînare trebuie astfel aleasă încît chiar pentru turația maximă curentul de frînare să nu depășească valoarea admisibilă.

În general în timpul procesului de frînare este necesară reglarea curentului debitat de generator între o valoare maximă I_{\max} și o valoare minimă $I_{\min} = \frac{1}{\beta} I_{\max}$

$$1 \leq \beta \leq 5 \quad [18].$$

Valoarea rezistenței de frînare se determină astfel încît la turația maximă să asigure curentul minim, adică

$$R = \frac{a n_{\max} + b n_{\max} I_{\min}}{I_{\min}} \quad (81) \quad [35]$$

respectiv

$$R = \beta \frac{a n_{\max} + b n_{\max}}{I_{\max}} \quad (82)$$

Tensiunea maximă la bornele rezistenței de frînare, deci la bornele chopperului va fi :

$$(U_R)_{\max} = R I_{\max} = \beta a n_{\max} + b n_{\max} I_{\max} \quad (83)$$

Tinînd seama de faptul că tensiunea maximă la bornele generatorului este

$$(U_G)_{\max} = a n_{\max} + b n_{\max} I_{\max}$$

rezultă

$$(U_R)_{\max} - (U_G)_{\max} = a n_{\max} (\beta - 1) \quad (84)$$

Se observă că variatorul este solicitat la o tensiune mai mare decît tensiunea generatorului, tensiune care este cu atît mai mare cu cît mașina este mai saturată.

În cazul unei mașini saturate $U_V = \beta (U_G)_{\max}$

Pentru a reduce solicitările de tensiune și a evita supradimensionarea tiristoarelor variatorului se poate face apel la reducerea excitației mașinii la viteze mari sau la diviziunea rezistenței de frînare.

Se știe însă ca reducerea curentului de excitație duce la diminuarea cuplului de frînare, fenomen nedorit. Din această cauză s-a impus metoda divizării rezistenței de frînare (fig.33) [18]

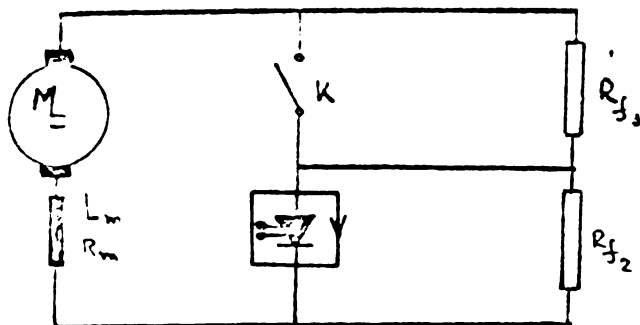


Fig.33 - Divizarea rezistenței de frînare

Rezistența de frînare s-a divizat în două părți egale variatorul conectându-se la bornele uneia dintre ele. Cealaltă jumătate poate fi conectată cu ajutorul unui întreruptor. În această situație tensiunea la bornele variatorului este jumătate din tensiunea ce apare la bornele rezistenței de frînare.

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 data fiind frecvența ridicată de lucru a acestuia și inerța 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.30.

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

$$i = \frac{a_1}{R_1 + b_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \right) + I_{min} e^{-\frac{t}{T_1}} \quad (85)$$

Cînd variatorul este blocat ($\sigma T \leq t \leq T$) curentul scade conform relației

$$i = \frac{a_2}{R_2 + b_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) + I_{max} e^{-\frac{t}{T_2}} \quad (86)$$

Relațiile (85) (86) au fost determinate în ipoteza liniarizării relației $E = f(\theta)$ conform celor menționate anterior :

$$z_1 = \frac{L}{sr - bn}$$

$$z_2 = \frac{L}{R + sr - bn}$$

În prima perioadă curentul crește pînă la valoarea maximă I_{max} corespunzătoare la $t = \frac{1}{2} T$ iar în următoarea perioadă scade la valoarea minimă I_{min} corespunzătoare la $t = T$

$$I_{max} = \frac{an}{sr - bn} \left(1 - e^{-\frac{dT}{z_1}} \right) + I_{min} e^{-\frac{dT}{z_1}} \quad (87)$$

$$I_{min} = \frac{an}{R + sr - bn} \left(1 - e^{-\frac{T}{z_2}} \right) + I_{max} e^{-\frac{T}{z_2}} \quad (88)$$

Din sistemul de ecuații (87) (88) se pot determina valorile I_{max} I_{min} obținându-se

$$I_{max} = \frac{an}{sr - bn} \frac{1 - e^{-\frac{dT}{z_1}}}{1 - e^{-\frac{dT}{z_1}} e^{-\frac{T}{z_2}}} + \frac{an}{R + sr - bn} e^{-\frac{dT}{z_1}} \frac{1 - e^{-\frac{T}{z_2}}}{1 - e^{-\frac{dT}{z_1}} e^{-\frac{T}{z_2}}} \quad (89)$$

$$I_{min} = \frac{an}{R + sr - bn} \frac{1 - e^{-\frac{T}{z_2}}}{1 - e^{-\frac{dT}{z_1}} e^{-\frac{T}{z_2}}} + \frac{an}{sr - bn} e^{-\frac{T}{z_2}} \frac{1 - e^{-\frac{dT}{z_1}}}{1 - e^{-\frac{dT}{z_1}} e^{-\frac{T}{z_2}}} \quad (90)$$

Curentul prin motor variază între cele două valori date de relațiile (89) (90), după legea descrisă de relațiile (85) (86) așa cum se arată în fig.34.

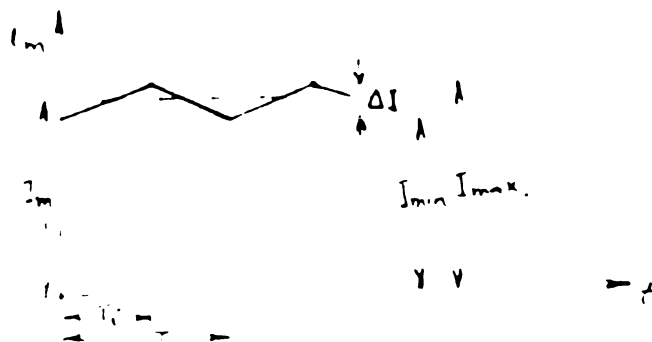


Fig.34 - Curbele, corespunzătoare relațiilor (85) (86)

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

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T i dt \quad (91)$$

care după efectuarea calculelor conduce la expresia

$$I = \frac{1}{T} \left\{ \frac{a n}{s n a n} \left[d T - z_1 (1 - e^{-\frac{dT}{z_1}}) \right] + \frac{a n}{R + z_1 r - b n} \left[(1 - d) T - z_2 (1 - e^{-\frac{(1-d)T}{z_2}}) \right] + z_1 I_{min} (1 - e^{-\frac{(1-d)T}{z_2}}) + z_1 I_{min} (1 - e^{-\frac{dT}{z_1}}) \right\} \quad (92)$$

Ecuația (92) descrie în toată complexitatea sa procesul de frinare reostatică în schemele cu variator stabilind legatură de interdependențe între marimile fizice, mecanice și electrice ale acționării. Dacă chopper-ul lucrează la frecvență constantă (cazul cel mai des întâlnit) se poate determina raportul ciclic $0 \leq d \leq 1$ astfel ca frinarea la viteză dată, n , să fie realizată la curentul de frinare impus.

Variația curentului de frinare provoacă un transfer periodic de energie între elementele circuitului.

Ecuațiile de echilibru al tensiunilor din circuite în cele două perioade de lucru ale variatorului vor fi când variatorul conduce

$$E - L \frac{di_f}{dt} = i_f z r \quad (93)$$

Când variatorul este blocat

$$E - L \frac{di_f}{dt} = i_f [z r + (1 - d) R] \quad (94)$$

Dacă amplificăm relațiile (93) (94) cu $i_f dt$ se obține

$$E i_f dt = L i_f di_f + i_f^2 z r dt$$

sau

$$E i_f dt = \frac{1}{2} L di_f^2 + i_f^2 z r dt \quad (95)$$

respectiv

$$E i_f dt = \frac{1}{2} L di_f^2 = [\Sigma r + (1-s)R] i_f^2 dt \quad (96)$$

Termenul $E i_f dt$ reprezintă energia electrică furnizată de generatorul în intervalul de timp dt datorită rotației rotorului pe seama energiei cinetice înmagazinate în vehicul. Conform celor menționate anterior $E = (a + bi)n$.

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

Termenii $i_f^2 \Sigma r dt$, $[\Sigma r + (1-s)R] i_f^2 dt$ reprezintă energia disipată sub formă de căldură în rezistențele circuitului.

Din relațiile (95) (96) rezultă următoarele :

a- În perioada când 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 când variatorul este blocat, energia electrică produsă de mașină însumată cu energia electrică ce ia naștere pe seama energiei magnetice înmagazinate în inductanța 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. Acest lucru nu poate fi realizat în schemele clasice.

Este cunoscut faptul că funcționarea mașinii în regim de generator serie autoexcitat necesită o preexcitare a acestuia de la o sursă de tensiune continuă. Pe de altă parte, așa cum s-a arătat mai sus conectarea variatorului în paralel cu rezistența de frînare face ca acesta să fie solicitat la tensiuni apreciabile. Pentru eliminarea acestor neajunsuri se recomandă folosirea unei scheme de frînare reostatică ca cea din fig. 35.

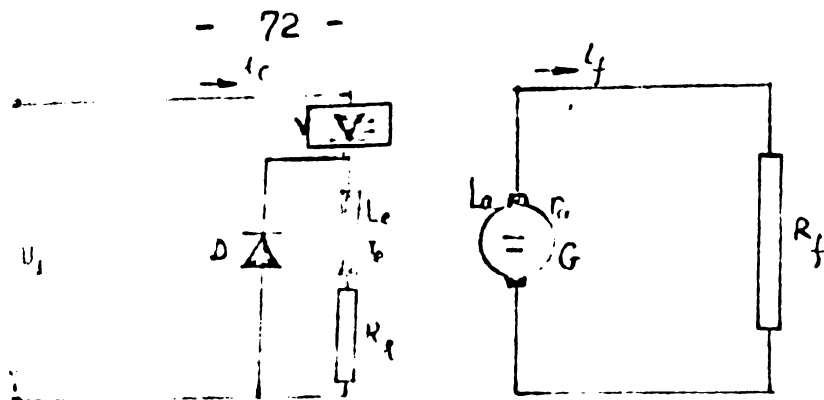


Fig. 35 - Frînarea reostatică cu excitație separată prin comanda prin impulsuri a curentului de excitație.

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

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

$$E = k_e \phi \omega \quad (97)$$

$$E = (r_0 + R_f) I_f \quad (98)$$

Rezultă

$$I_f = \frac{E}{r_0 + R_f} = \frac{k_e \phi \omega}{r_0 + R_f} \quad (99)$$

$$M_f = K_m \phi I_f = \frac{k_m k_e \phi^2 \omega}{r_0 + R_f} \quad (100)$$

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. 35 folosește variatorul pentru modificarea curentului de excitație rezistența de frînare rămânând constantă.

De acest fel de schemă s-a utilizat la troleibuzul TV 20 asupra căreia am efectuat experimentari.

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

$$U_e = L_e \frac{di_e}{dt} + (r_e + R_f) i_e \quad (101)$$

pentru $0 < t < t^*$ (variatorul conduce)

$$L_e \frac{di_e}{dt} + r_e i_e = 0 \quad (102)$$

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

care conduc la relațiile

$$i_e = \frac{U_1}{R_l + r_e} \left(1 - e^{-\frac{t}{z_1}} \right) + I_{min} e^{-\frac{t}{z_1}} \quad (103)$$

pentru $0 \leq t \leq dT$

$$i_e = I_{max} e^{-\frac{t}{z_2}} \quad (104)$$

pentru $dT \leq t \leq T$

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

$$I_{max} = \frac{U_1}{R_l + r_e} \frac{1 - e^{-\frac{dT}{z_1}}}{1 - e^{-\frac{dT}{z_1}} e^{-\frac{T}{z_2}}} \quad (105)$$

$$I_{min} = \frac{U_1}{R_l + r_e} e^{-\frac{T}{z_2}} \frac{1 - e^{-\frac{dT}{z_1}}}{1 - e^{-\frac{dT}{z_1}} e^{-\frac{T}{z_2}}} \quad (106)$$

Relațiile (105) (106) au fost deduse din (103) (104) înlocuind $t = dT$ respectiv $t = T$

Din (103) (104) rezultă

$$I_{em} = \frac{1}{T} \left\{ \frac{U_1}{R_l + r_e} \left[dT - z_1 \left(1 - e^{-\frac{dT}{z_1}} \right) \right] + z_1 I_{min} \left(1 - e^{-\frac{dT}{z_1}} \right) + z_2 I_{max} \left(1 - e^{-\frac{L-d}{z_2} T} \right) \right\} \quad (107)$$

În relațiile de mai sus

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

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

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

$$i_{e \max} = \frac{U_{\max}}{R_e + r_e} = 60 \text{ A}$$

(108)

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

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

$$U_{\max} = i_{e \max} (R_e + r_e)$$

(109)

Pentru cazul considerat $i_{e \max} = 220 \text{ A}$ rezultînd

$$U_{V \max} = 110 \text{ V}$$

Valoarea rezistenței de frînare rezulta din condiția

$$U_{V \max} = i_{e \max} R_f$$

(110)

obținîndu-se

$$R_f = \frac{U_{V \max}}{i_{e \max}}$$

(111)

Φ_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 eficientă decît cea de la schemă de frînare dinamică în ~~motor~~ care totuși 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 rezistențe 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, acest constituind principalul dezavantaj al schemei descrise evidențiat și în exploatarea tramvaiului Timiș 1 comandat

prin variator de tensiune continuu.

4.3.2. Frînarea electrică cu recuperare de energie

În cazul tracțiunii electrice în curent continuu cu motoare serie utilizând 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 decât la anumite viteze (cca. $1/4$ sau $1/2$ din viteză maximă [19] aceasta fiind turajia 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.

Principial procesului de recuperare este prezentat în fig.36.

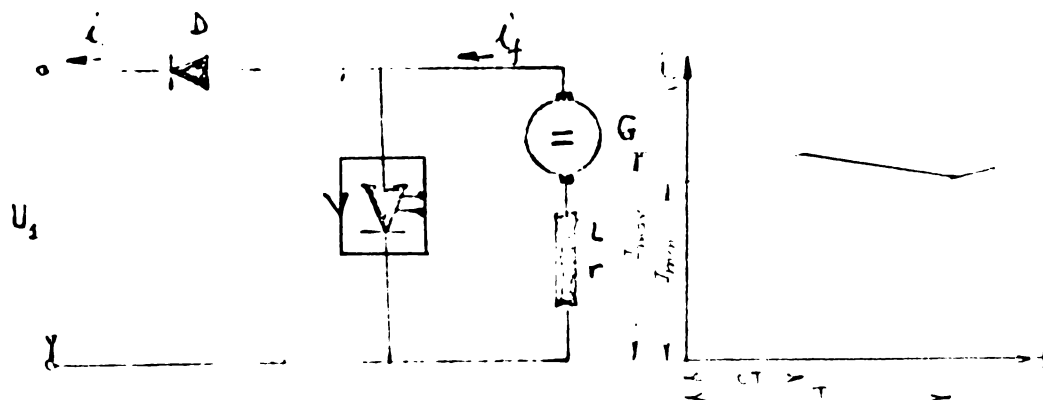


Fig.36 - Schema de principiu a frînării cu recuperare de energie.

Cînd variatorul conduce ($0 \leq t \leq t_1$) mașina este scurtcircuitată iar curentul debitat crește conform relației

$$i = \frac{an}{r-bn} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) + I_{ma} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (112)$$

Cînd variatorul este blocat ($t_1 \leq t \leq T$) tensiunea la bornele sale este egală cu tensiunea sursei de alimentare iar curentul debitat scade conform relației.

$$\frac{a_0 - U}{r + b_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) + I_{max} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (113)$$

$$\tau = \frac{L}{r + b_1}$$

Procedind ca și în cazul relațiilor (81) (88) (91) se găsesc expresiile pentru I_{max} , I_{min} , I_{med} .

$$I_{max} = \frac{a_0}{r + b_1} - \frac{U}{r + b_1} \frac{e^{-\frac{dT}{\tau_1}} \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau_1}} \right)}{1 - e^{-\frac{T}{\tau_1}} e^{-\frac{dT}{\tau_1}}} \quad (114)$$

$$I_{min} = \frac{a_0}{r + b_1} - \frac{U}{r + b_1} \frac{1 - e^{-\frac{T}{\tau_1}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau_1}} e^{-\frac{dT}{\tau_1}}} \quad (115)$$

$$I_{med} = \frac{1}{T} \left\{ \frac{a_0}{r + b_1} \left[dT - \tau_1 \left(1 - e^{-\frac{dT}{\tau_1}} \right) \right] + \frac{a_0 - U}{r + b_1} \left[(1-d)T - \tau_1 \left(1 - e^{-\frac{(1-d)T}{\tau_1}} \right) \right] + \tau_1 \left[I_{min} \left(1 - e^{-\frac{dT}{\tau_1}} \right) + I_{max} \left(1 - e^{-\frac{(1-d)T}{\tau_1}} \right) \right] \right\} \quad (116)$$

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

$$U_{med} = U(1-d) \quad (117)$$

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 $0 \leq t \leq dT$ (variatorului conduce) și I_m în timpul $dT \leq t \leq T$ (variatorului 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 celor 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

$$\left. \begin{aligned} r < b_n \text{ (rezultă din relația lui } Z_1) \\ u_n + b_n I_{m, \max} < U_1 + r I_{m, \max} \text{ (rezultă din fig. 36)} \end{aligned} \right\} (118)$$

Primul membru al ultimei inegalități reprezintă f.e.m. a generatorului la sfârșitul intervalului $t = \sigma^1 T$. Ea trebuie să fie mai mică decât tensiunea relației de alimentare adunată cu căderea de tensiune ohmică din motor. Când frînarea se face la turație mare este imposibil să fie realizată această condiție fără a introduce rezistențe de limitare care se scurtcircuitează când viteza vehiculului scade.

În această situație (fig. 37) scriind relația de egalitate a tensiunilor la bornele comune ale celor doi dipoli la sfârșitul perioadei de reglare se obține :

$$E - L \frac{dI_f}{dt} = I_f (\Sigma r + (1 - \sigma) (I_f R + U_1)) \quad (119)$$

pentru fig. 37 a

$$E - L \frac{dI_f}{dt} = I_f (\Sigma r + R) + U_1 (1 - \sigma) \quad (120)$$

pentru fig. 37 b.

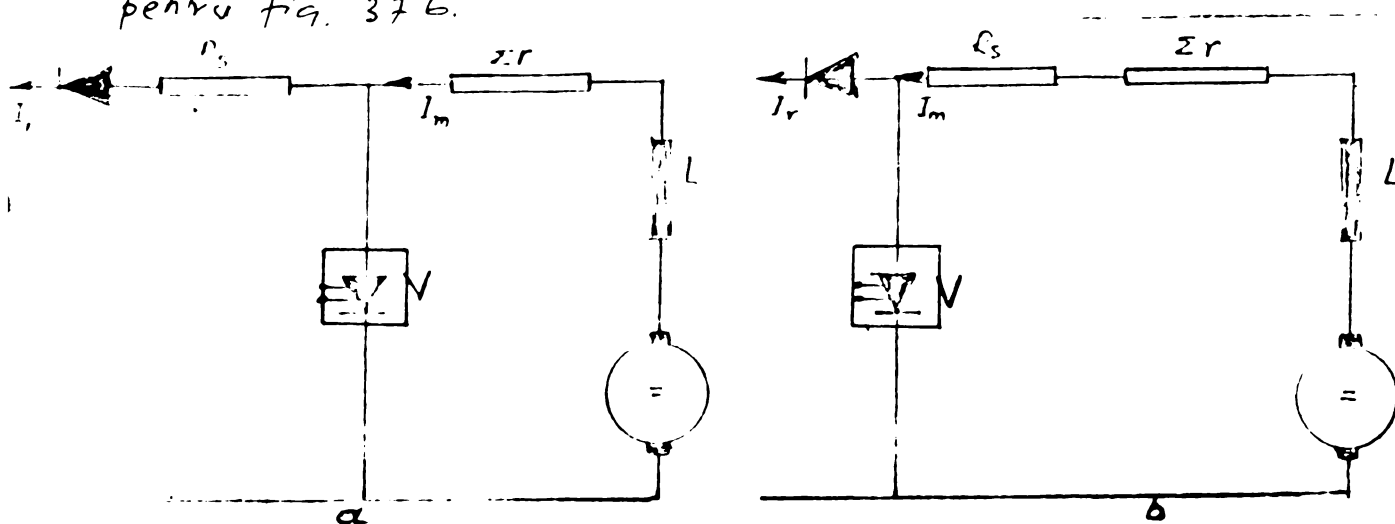


Fig. 37 - Limitarea curenților de frînare cu ajutorul unei rezistențe suplimentare

- a) între variator și sursă
- b) între variator și motor

Considerând regimul stabilizat și admitând mașina saturată, pentru o aceeași viteză de deplasare rezultă :

$$I_1 = \frac{E - (1-d) U_1}{Zr + (1-d)R} \quad (121)$$

$$I_2 = \frac{E - (1-d) U_1}{Zr + R} \quad (122)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{Zr + R}{Zr + (1-d)R} \geq 1 \quad (123)$$

Din cele de mai sus rezulta urmatoarele :

a- Daca se mențin constante viteza și curentul de frinare va fi necesare o creștere a duratei relative de conectare δ cind rezistența este conectata între motor și variator ($d > d''$)

Acest lucru are drept consecința diminuarea corespunzătoare a gamei de reglaj.

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

c- Pierderile în rezistența suplimentară vor fi

$$P_1 = I_1^2 (1-d)R \quad (124) \text{ pentru primul caz}$$

$$P_2 = I_2^2 R \quad (125) \text{ pentru cel de al doilea caz}$$

$$\frac{P_1}{P_2} = (1-d) \frac{I_1^2}{I_2^2} = \frac{1-d}{\left(1 - \frac{dR}{Zr+R}\right)^2} = \frac{1-d}{(1-kd)^2} \quad (126)$$

$$k = \frac{R}{Zr+R} < 1$$

$$\text{sau } 0 < 1 - \frac{dR}{Zr+R} \leq 1 \quad ; \quad 0 \leq 1-d \leq 1.$$

Rezulta ca marimea raportului $\frac{1-d}{(1-kd)^2}$ trebuie studiată în funcție de coeficientul k și de raportul δ , ciclic δ

$$f_1(\delta) = 1-d$$

$$f_2(\delta) = (1-kd)^2 = k^2\delta^2 - 2k\delta + 1$$

Reprezentind grafic aceasta relație pentru diferite valori ale lui k ($k = 0 \dots 1$) se obțin o serie de paralele al caror minim se găsește pe axa absciselor (fig.38) avind toate ca punct comun punctul de coordonate $(0,1)$.

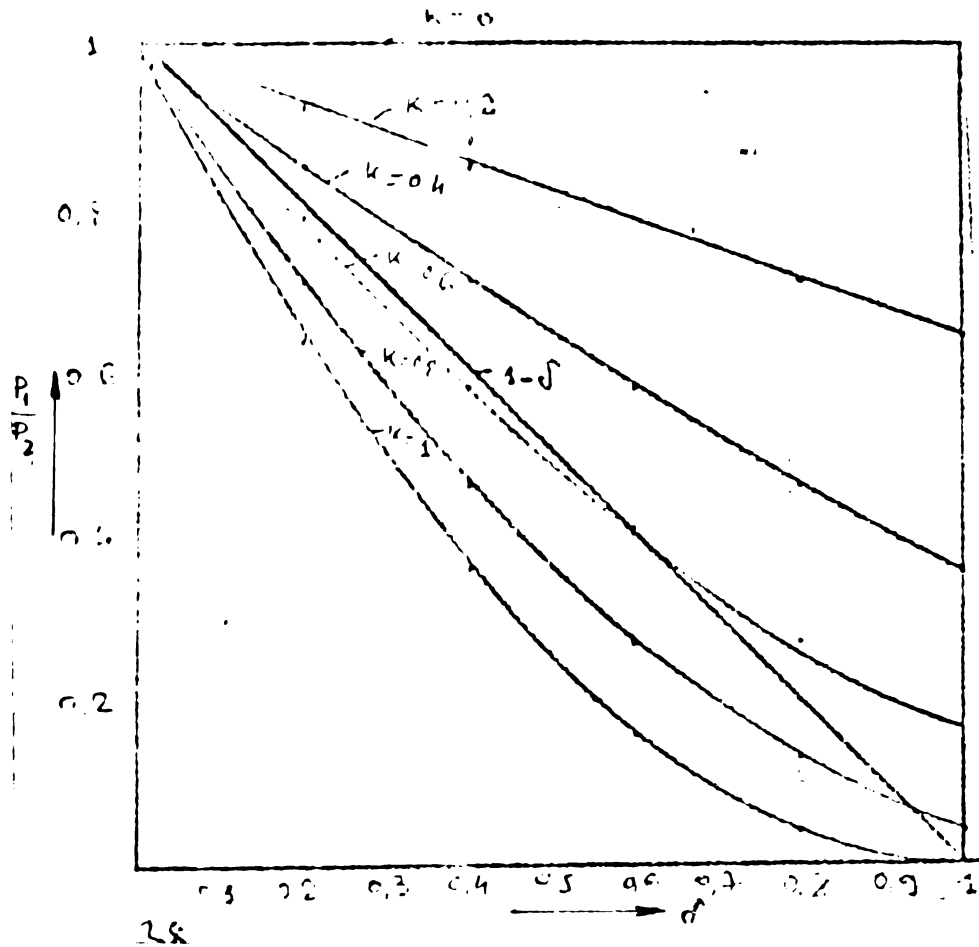


Fig. 38- Curbele corespunzatoare relației 126 în funcție de raportul ciclic δ pentru diferite valori ale raportului $\frac{R}{\Sigma r + R}$

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

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

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

- pentru $\frac{R}{2\pi n R} \leq 0,6$ adoptarea soluției privind colectarea rezistenței suplimentare trebuie să se facă numai în funcție de durata cât chopperul funcționează cu $\delta \leq 0,5$.

În 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.

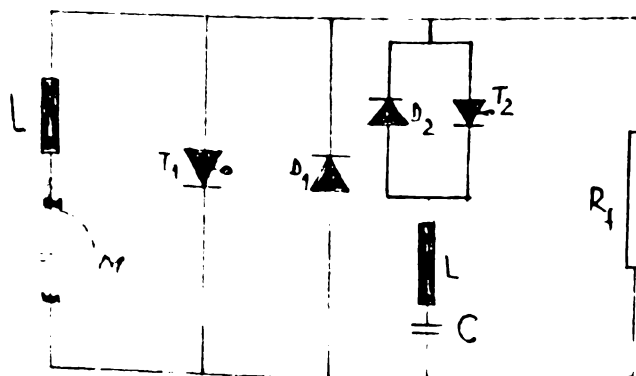
Din fig. 36 rezultă că recuperarea energiei are loc numai în intervalul $t = (1 - \delta)T$. În acest interval trebuie să fie îndeplinită condiția $U_1 > U_{t1}$, de această dată U_1 fiind tensiunea la bornele variatorului privit dinspre dipolul activ. Aceasta tensiune ia naștere ca suma între tensiunea electromotoare indusă în mașina datorită rotației rotorului sub influența energiei cinetice a maselor în mișcare și tensiunea indusă în inductanțele circuitului datorită variației fluxului magnetic care în perioade menționate, datorită scaderii 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 δ pînă ce ajunge la $\delta = 1$ când are loc frînarea în scurtcircuit.

Trecerea pe la valoarea δ_1 la valoarea $\delta_2 > \delta_1$ se consideră pînă cînd curentul de frînare care nu trebuie să scadă sub valoarea $I_{f, \min}$.

În fig. 39 este prezentată o variantă de schemă cu variator pentru frînarea reostatică [35].

Fig. 39
Schemă cu variator
pt. frînarea reostatică



Dacă $R_f \geq 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ circuitul de descarcare al condensatorului este aperiodic. Tensiunea la bornele condensatorului tinde aperiodic către valoarea $U_c = R_f I_f \text{ max.}$

Dacă $R_f < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ tensiunea la bornele condensatorului variază după legi periodice amortizate.

În fig.40 este prezentată schema unui variator pentru frînarea cu recuperare de energie [35].

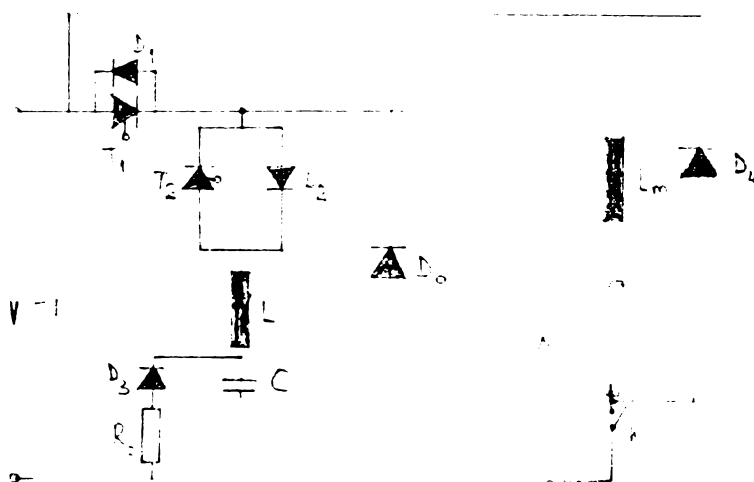


Fig.40. Schema cu variator pentru frînarea cu recuperare de energie.

Energia cinetică a motorului se transformă în energie electrică și se transmite inductanțelor L_s și L_m care constituie un rezervor de energie de unde se restituie rețelei de alimentare în cantități cu atât mai mari cu cât durata de conducție a lui T_2 este mai lungă decât durata lui T_1 .

Această înseamnă că, presupunând că aprinderea lui T_1 se realizează cu frecvență constantă, faza impulsurilor de amorțire a lui T_2 , de aceeași frecvență, realizează valoarea medie a curentului motorului și în consecință, cuplul de frînare.

În fig. 41 este prezentată schema cu variator pentru frînarea mixtă [35].

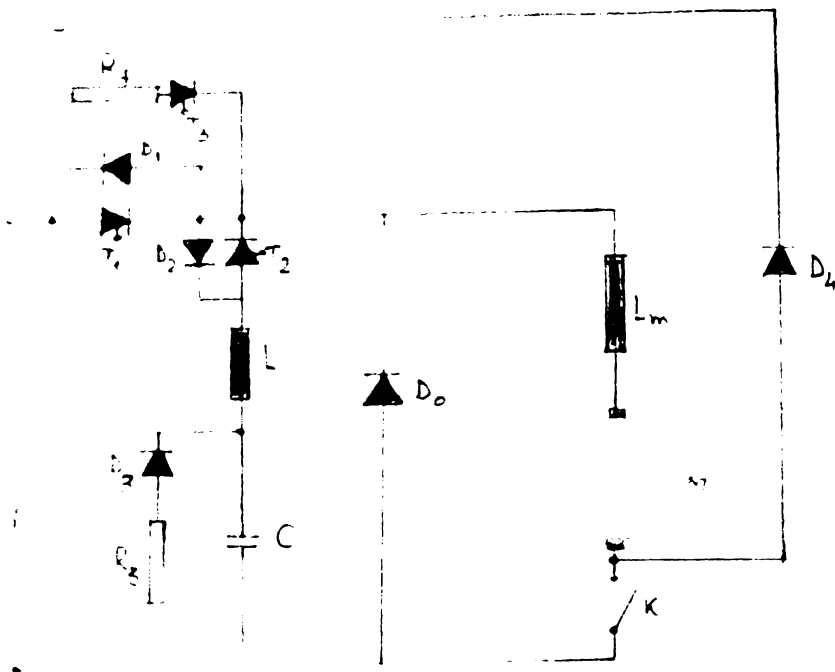


Fig.41 - Scheme cu varistor pentru frînarea mixta.

Faça de scheme precedenta, aceasta schema conține un dipol suplimentar (rezistența de frînare R_f în serie cu tiristorul T_3) în paralel cu tiristorul principal.

Interesul principal al acestei scheme consta în faptul că permite frînarea mixta o parte din energie fiind restituita rețelei iar o parte se disipează în rezistența de frînare.

Pentru realizarea acestui mod de frînare se aprinde tiristorul T_3 cu un timp t_r reglabil între momentul de aprindere a tiristorilor T_1 și T_2 . Înainte de aprinderea lui T_3 motorul funcționează în regim de frînare prin recuperare. În momentul t_3 se aprinde T_3 și curentul motorului se închide prin rezistența de frînare R_f și T_3 . Dacă tensiunea $R_f I_f$ este inferioară tensiunii rețelei de alimentare, curentul I_o se anulează. Curentul prin rezistența de frînare R_f continue să circule pînă la amorsarea lui T_1 . În acest moment curentul de frînare circule prin T_1 . Energia disipată în rezistența R_f va fi cu atât mai mare cu cît amorsarea lui T_3 va fi mai lungă decît a lui T_2 . Cînd rețeaua nu admite frînarea prin recuperare (tensiunea rețelei este superioară unei valori prestabilite) schema realizează o frînare pur reostatică aprinderea lui T_3 făcîndu-se cu o întîrziere suficientă față de a lui T_2 . Reglarea fazei impulsurilor de aprindere a lui T_3 permite realizarea unui dozaj între cele două moduri de frînare.

Cap.5. - Prezentarea unor scheme cu variator de tensiune continuă utilizate în tracțiunea electrică urbană.

În fig.42 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 frinare D_4 , motoare, contactor de conectare în tracțiune KT. În timp ce tiristorul principal este blocat curentul motoarelor se închide prin dioda D_0 .

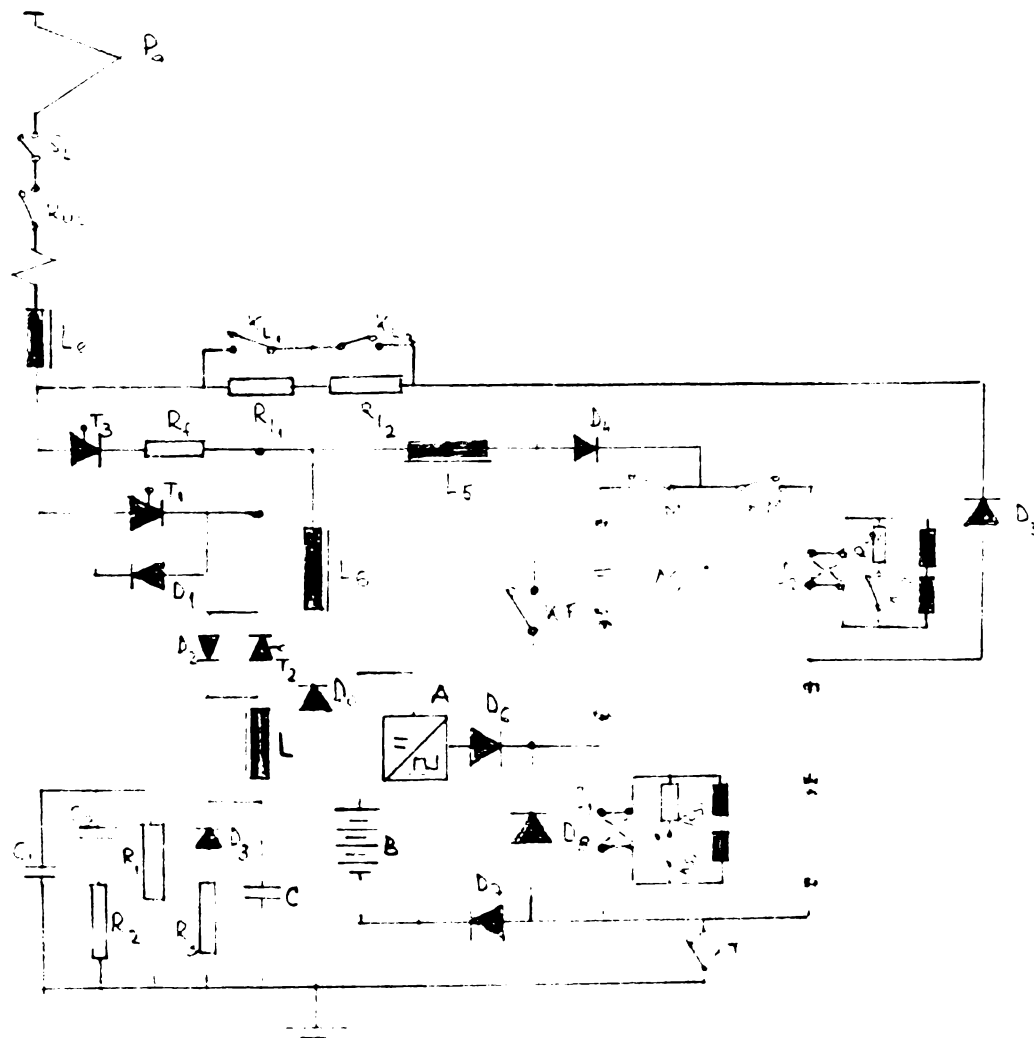


Fig.42 - Schema de principiu a tramvaiului ACEC.

frînarea este mixta. Energia cinetică se transformă în energie electrică care se restituie rețelei. Dacă pe rețea sînt prezente vehicule care funcționează în regim de tracțiune și absorb energie 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. Aceasta selecție se face automat la fiecare perioadă de reglare și înconștient, 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 considera 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_6 , 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 , inductanțele L_5 și contactorul KF.

În fig. 43 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 întreruptorului cu tiristoare V după schimbarea polarității liniei de contact.

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

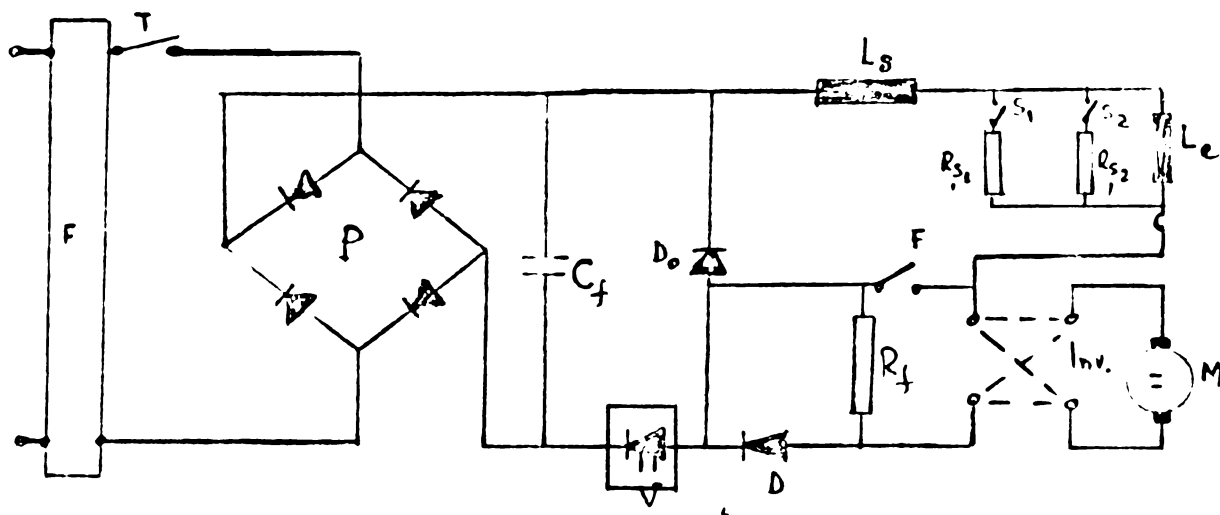


Fig.43 - Schema de principiu a troleibuzului Skoda tip 9 Tr-T.

La funcționarea în tracțiune este conectat contactorul T iar în frînare contactorul F contactoarele S_1, S_2 folosesc pentru scurtarea înfășurării de excitație.

La funcționarea în tracțiune, când tiristorul principal este aprins curentul trece prin contactorul T, puntea redresoare P, inductanța de netezire L_S , înfășurarea de excitație L_e , inductorul M, dioda D și variatorul V. Când tiristorul principal este stins, curentul motorului se închide prin dioda D_0 .

La frînarea reostatică, când tiristorul principal conduce, generatorul debitează în scurtcircuit (contactorul T este deschis iar contactorul F închis).

Când tiristorul este blocat, curentul debitat de generator se ramifică în rezistența de frînare și în înfășurarea de excitație. Motorul funcționează ca generator cu excitație în paralel.

Schema din fig. 44 reprezintă instalația de forță cu variatoare de tensiune continue pentru acționarea electrică a tramvaielor tip T și KT din RSC (regimul de tracțiune). [35]

Cele două grupuri de motoare cu excitație serie se comandă decalat de la același convertizor de impulsuri.

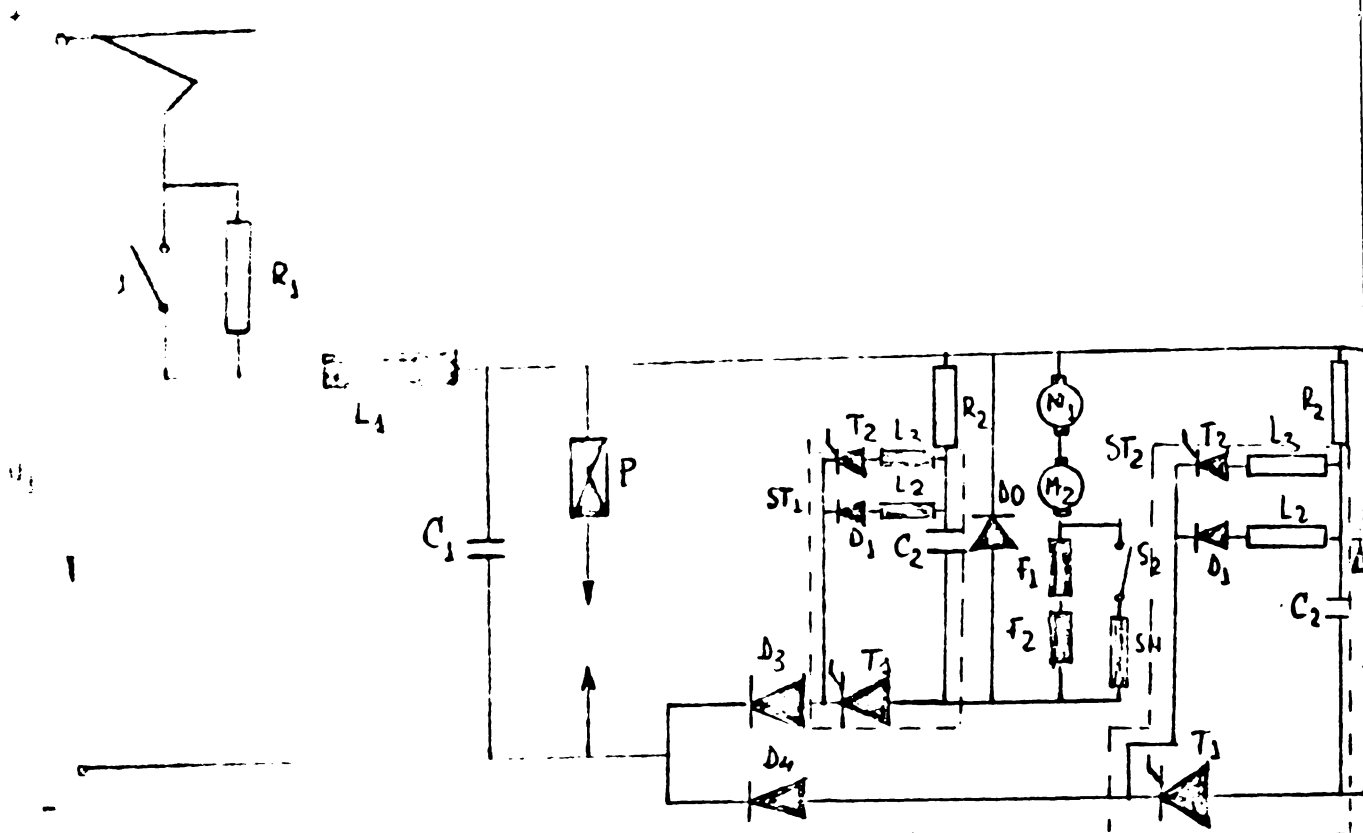


Fig.44 - Schema de principiu tramvaiului t p T și KT RSC (regimul de tracțiune)

Schema este realizata pentru urmatoorii parametrii :

- tensiunea 600 V.c.c.

(toleranta 400 - 700 V).

- curentul minim de pornire pentru deplasare tramvaiului 2 x 30 A.

- curentul maxim de pornire 2 x 260 A

- frecventa de lucru 400 Hz pentru fiecare variator

Frinarea reostatica se realizeaza conform schemei din fig.45.

Variatorul comanda mărimea curentului de excitație de la zero la maxim independent de curentul indusului. Timpul de închidere a tiristorului principal comanda valoarea rezistenței de frinare.

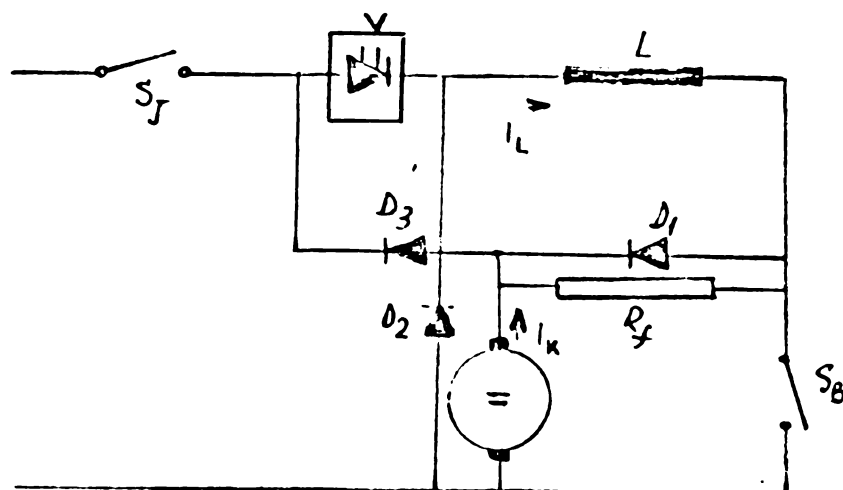


Fig.45 - Frînarea reostatică a motorului de tracțiune.

La închiderea variatorului V , curentul trece de la indus prin dioda D_3 în 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 comanda deconectarea variatorului. În această situație curentul indusului se închide prin rezistența de frînare iar curentul înfășurării de excitație prin dioda D_2 .

În fig. 46 sînt prezentate curbele de variație a curenților din indus și din înfășurarea de excitație în funcție de viteză vehiculului.

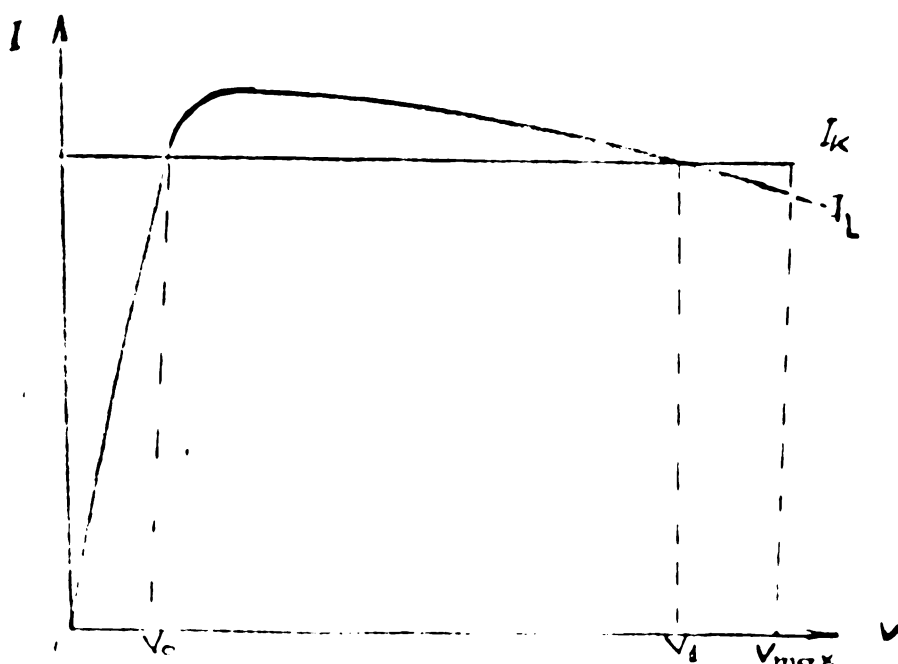


Fig.46- Curbele de variație ale curentului din indus și din înfășurarea de excitație în funcție de viteză...

maxima admisă.

La schema din fig.47 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 n_1 .

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

Dacă $E_1 > E_2$ curentul își va menține sensul în înfașurarea de excitație a motorului M_2 și va avea sens schimbat în înfașurarea 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 schema cu variator pentru frînarea mixtă (fig.48).

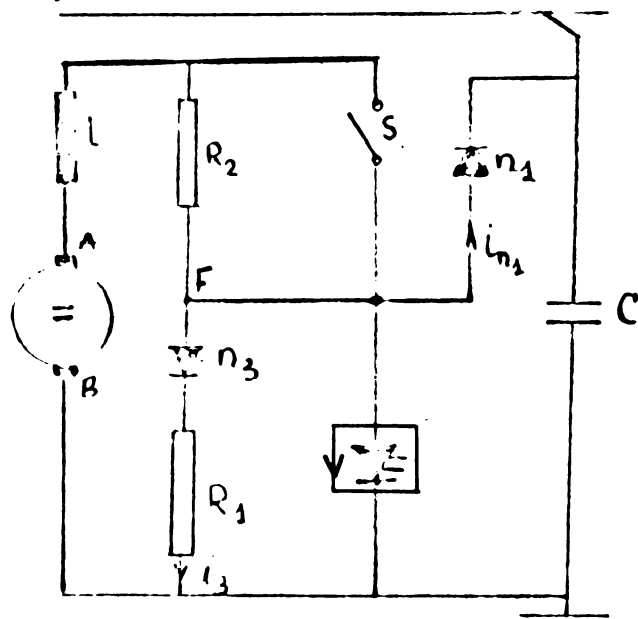


Fig.48 - Schema cu variator pentru frînarea mixtă realizată de Firma Siemens.

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

Frînarea cu recuperare se realizează atunci cînd tensiunea liniei de contact este mai mică decît potențialul punctului F. În această situație intra în conducție dioda n_1 iar tiristorul n_3 este stins. Rezistența R_2 poate fi folosită și pentru limitarea curentului de frînare prin recuperare de energie atunci cînd frînarea se realizează la turații mari.

În fig.49 este prezentată schema de principiu a instalației de acționare a tramvaiului din dotarea Întreprinderii de Transporturi Limișoara. Schema a fost realizată de către Institutul de Cercetare pentru Industria Electrotehnică - ICPE - București [92 93].

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

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 inserat în circuitul de excitație.

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

Cap.6 - Schema cu variator de tensiune continuă propusă pentru acționarea electrică a tramvaiului la noi în țară.

Pornind de la necesitățile reclamate de modernizarea transportului în comun urban și de la considerentele de ordin tehnico-economic rezultate din prezentarea anterioară privind posibilitățile utilizării variatorului de tensiune continuă în acționarea electrică a mijloacelor de transport în comun urban, am conceput o schema pentru acționarea electrică a tramvaiului la noi în țară care a fost propusă ca invenție înregistrată la OSIM sub nr. 8168/1975 și a primit referat favorabil din partea institutului de specialitate. La elaborarea schemei am avut în vedere tramvaiul de mare capacitate realizat de I.T.B. prevăzut cu două motoare de tracțiune de 150 kW la tensiunea de 750 V.c.c. ce poate dezvolta o viteză maximă de 76-78 km/oră. Motoarele de tracțiune se fabrică la I.T.B. unde au efectuat o serie de încercări privind comportarea motorului de tracțiune în condițiile alimentării prin variator de tensiune continuă.

Schema de principiu a instalației de acționare este prezentată în fig. 50 în care s-au notat :

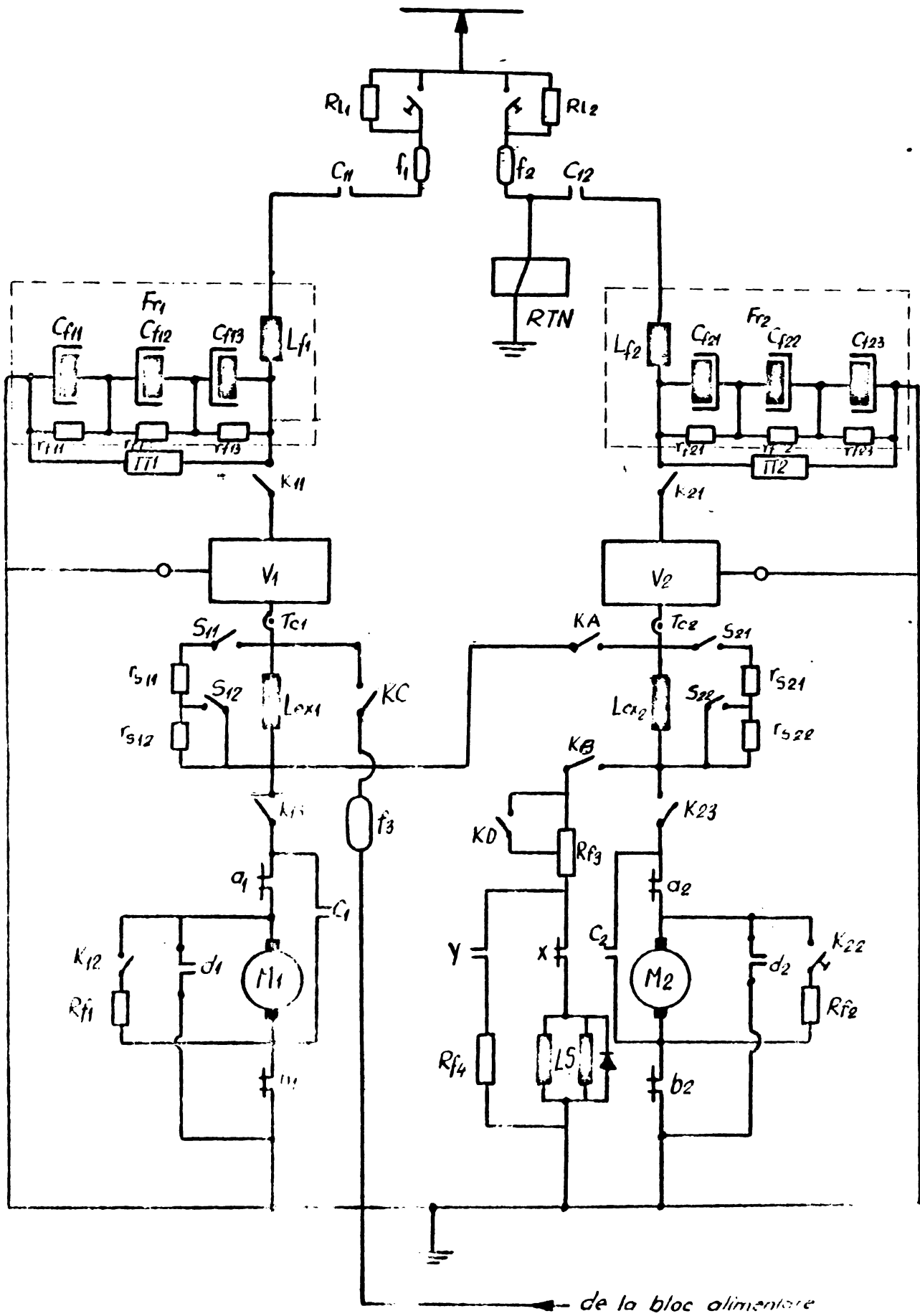


Fig 49
Schema de principiu a instalatiei electrice
de actionare a tramvaiului Timis 1

T_{11}, T_{12}	- tiristoare principale
T_{21}, T_{22}	- tiristoare de stingere
T_{31}, T_{32}	- tiristoare de frânare
T_{41}, T_{42}	- tiristoare pentru încarcarea condensatorului de stingere.
$D_{11}, D_{12}, D_{21}, D_{22}$	- dioda de accelerare
D_3	- dioda de blocare în regim de tracțiune
R_{1f}, R_{2f}	- rezistența de frânare
L_1, L_2, C_1, C_2	- inductanțe, respectiv condensatoare de stingere.
R_1, R_2	- rezistențe de amortizare
D_{o1}, D_{o2}	- dioda de roata liberă (descarcare)
R_s	- rezistența suplimentară
L_f, C_f	- filtru de intrare
L_{S1}, L_{S2}	- inductanța de netezire.
$K_{11} \dots K_{16}, K_{21} \dots K_{26}, S_{11} \dots S_{23}, S_{21} \dots S_{23}, L.T.$	- contactoare
I	- întreruptor
R_{ex1}, R_{ex2}	- rezistențe pentru slabirea cîmpului
M_1, M_2	- indusurile motoarelor
L_{ex1}, L_{ex2}	- înfășurările de excitație

Cele două motoare de tracțiune M_1, M_2 conectate în paralel sînt alimentate de la linia de contact prin două variatoare de tensiune continuă V_1, V_2 funcționînd în regim de comandă decalată.

La funcționarea în regim de tracțiune curentul din linia de contact trece prin inductanța L_f a filtrului de rețea, prin tiristoarele principale T_{11}, T_{12} , prin inductanțele de netezire L_{S1}, L_{S2} și prin motoarele de tracțiune, închizîndu-se prin contactorul T la polul negativ al sursei de alimentare.

La funcționarea în regim de frînare se deschid contactorii $T, K_{11}, K_{12}, K_{15}, K_{21}, K_{22}, K_{25}$ și se închid contactorii $K_{13}, K_{14}, K_{16}, K_{23}, K_{24}, K_{26}$ și întreruptorul I . În felul acesta motoarele funcționează în regim de generator serie autoexcitat cu preexcitare de la baterie cu înfășurările de excitație încrucișate. Frînarea este mixtă ;

când tensiunea liniei de contact este mai mică decât tensiunea la bornele motoarelor, se realizează frînarea electrică recuperativă curentul debitat de cele două motoare funcționând în regim de generator parcurge înfașurările de excitație diada de blocare în tracțiune D_3 , linia de contact, receptor (alte tranșee care funcționează în regim de tracțiune) și prin diodele D_{01} , D_{02} se închide la polul negativ al generatoarelor.

Când tensiunea liniei de contact depășește o valoare prestabilită se realizează frînarea reostatică energia electrică furnizată de motoarele de tracțiune funcționând în regim de generator serie autoexcitat se disipă în rezistențele de frînare R_{1f} , R_{2f} în circuitul cărora sînt înseriate tiristoarele de frînare T_{31} , T_{32} care sînt stinse tot de către circuitul de stingere a tiristorului principal.

Fața de schemele cu tiristoare utilizate pînă în prezent la acționarea electrică a tramvaiului scheme prezentate se caracterizează prin următoarele :

1. Variatorul de tensiune continuă este o variantă a variatorului utilizat de firmă ACEC la care s-au adus îmbunătățiri în sensul că s-a introdus tiristorul T_4 prin care se comandă încărcarea condensatorului de stingere. În felul acesta prin tiristorul principal trece numai curentul motorului de tracțiune și se evită solicitarea suplimentară a acestuia de către curentul de încărcare a condensatorului.

2. Cele două inductanțe de netezire L_{S1} , L_{S2} sînt cuplate electromagnetic rezultînd valori mai mici pentru aceste inductanțe.

3. Fiecare variator de tensiune continuă funcționează cu frecvență fixă de 200 Hz tensiunea de alimentare a motoarelor fiind modificată prin comandă lașimii impulsurilor. Variatoarele fiind comandate decalat cu o semiperioadă, frecvența unduleșilor curentului absorbit din rețeaua de alimentare și a unduleșilor tensiunii la bornele condensatorului filtrului de intrare va fi 400 Hz.

..//..

Acest lucru influențează favorabil valoarea undulațiilor marimilor menționate care este invers proporțională cu frecvența și conduce la valori mai mici ale inductanței și capacității filtrului de intrare.

4. Schema conține un număr mai mic de contacte mecanice și de elemente semiconductoare.

5. La frînare motoarele funcționează în regim de generator serie autoexcitat cu înfășurările de excitație încrucișate menținându-se sensul curentului în înfășurările de excitație.

Schemele utilizate la noi în țară pentru acționarea tramvaiului și troleibuzului se caracterizează prin faptul că motoarele funcționează în regim de generator cu excitație separată care prezintă două dezavantaje importante și anume: un consum mai mare de energie electrică și ineficiența frînării electrice la întreruperea tensiunii liniei de contact.

La aceste scheme este necesar să se controleze separat curentul în înfășurarea de excitație.

6. Comparativ cu schemele utilizate până în prezent această schemă are o fiabilitate mai ridicată datorită faptului că se realizează o schemă structurală tip paralel fiecare variator fiind dimensionat pentru a putea să alimenteze singur ambele motoare de tracțiune.

Schema variatorului este prezentată în fig.51 în care s-au notat :

- $e_1 \dots e_4$ - siguranțe ultratrapide
- $T_{11} \dots T_{14}$ - tiristoare principale
- T_{21}, T_{22} - tiristoare de stingere
- T_{31}, T_{32} - tiristoare de frînare
- T_{41}, T_{42} - tiristoare de încărcare
- D_{11}, D_{12} - diode de accelerare
- $R_{11}, C_{11} \dots R_{14}, C_{14}$ - circuite RC pentru protecție împotriva supratensiunilor
- $R_{21}, C_{21}, R_{22}, C_{22}$ datorate efectului de stocaj
- $R_{31}, C_{31}, R_{32}, C_{32}$

- $R_{15} \dots R_{18}, R_{23}, R_{24}$ - rezistențe pentru egalizarea statică a tensiunilor pe tiristoare și diode.
 $R_{33}, R_{34}, R_{43}, R_{44}$ - 93 K Ω , 2,2 W
 L_{11}, L_{12} - inductanțe pentru limitarea creșterii curentului prin tiristoarele principale.

Schema a fost concepută și dimensionată de autor pentru a funcționa cu următoarele caracteristici :

- tensiunea nominală 750 V
- puterea nominală unioară 2 x 150 kW
- curentul unioară 2 x 225 A
- curentul maxim de pornire 2 x 350 A
- frecvența de lucru a variatorului 200 Hz

La alegerea frecvenței de lucru a variatorului am pornit de la următoarele considerente importante: la frecvențe mai mari de 200 Hz reactanța de scapări a motorului provoacă o amortizare sensibilă a curentului astfel încât se poate renunța la inductanța de netezire exterioară (59); la frecvențe de lucru prea mari există riscul ca tiristarele să nu mai poată fi stinse în condițiile cele mai defavorabile și nu se poate asigura la bornele motoarelor de tracțiune întreaga tensiune a liniei de contact când se funcționează cu raport ciclic maxim.

În funcție de aceste date am ales tiristoarele principale și am dimensionat celelalte elemente ale schemei.

Am ales tiristoare tip T 707....32 [91] având

$$\begin{aligned} I_{max} &= 570 \text{ A} \\ I_{max, med} &= 375 \text{ A} \\ U_{max} &= 1200 \text{ V} \\ t_{max} &= 50 \cdot 10^{-6} \text{ s} \end{aligned} \quad \left(\frac{di}{dt} \right)_{max} = 400 \text{ A} / 10^{-6} \text{ s}$$
$$\left(\frac{dU}{dt} \right)_{max} = 500 \text{ V} / 10^{-6} \text{ s}$$

Pentru ca viteza de creștere a curentului prin tiristorul principal în momentul aprinderii să nu depășească valoarea maximă admisă, în circuitul tiristorului principal se inseriază o inductanță a cărei valoare rezultă din relația

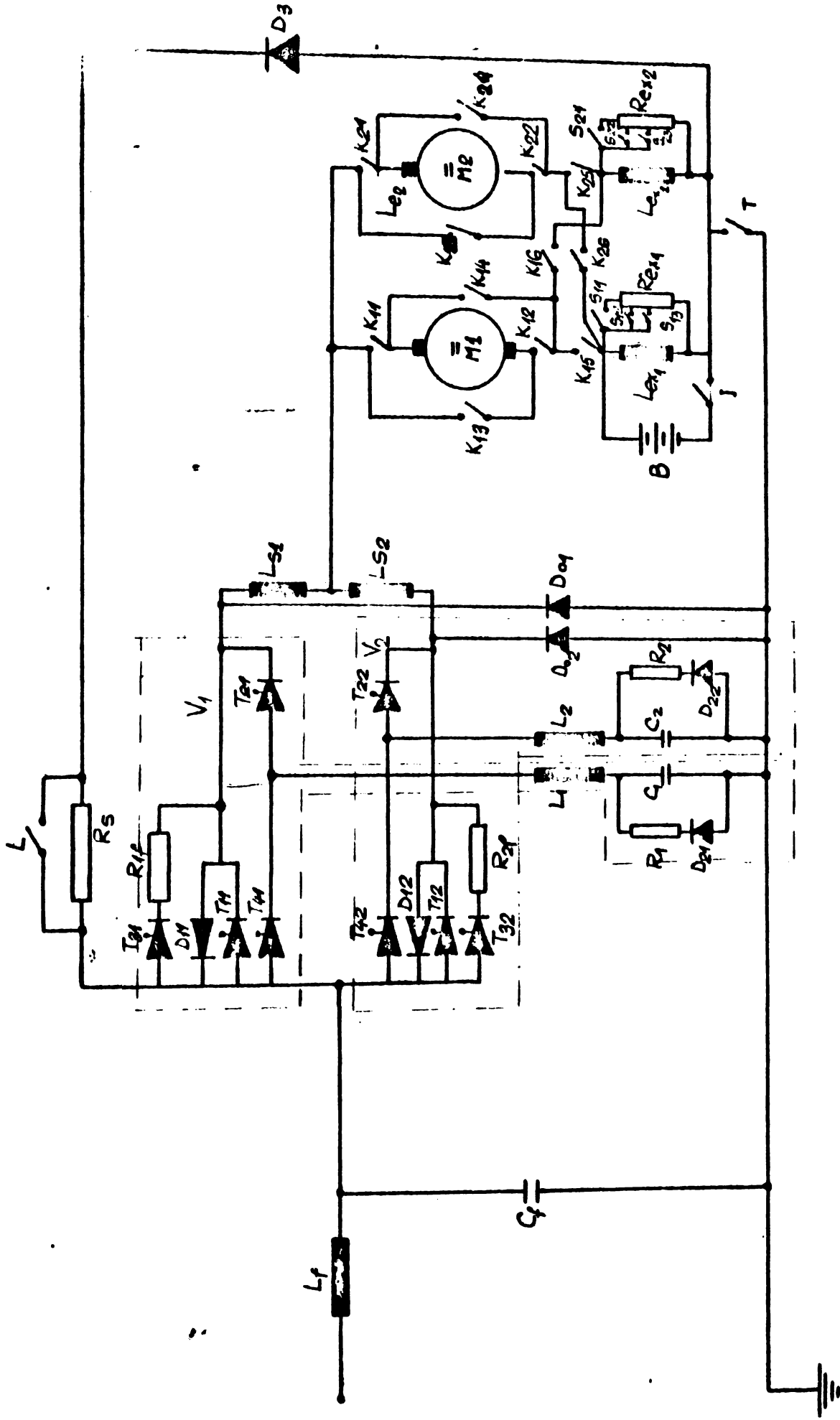


Fig. 50
Schema cu variator de tensiune continua și acționare komvului.

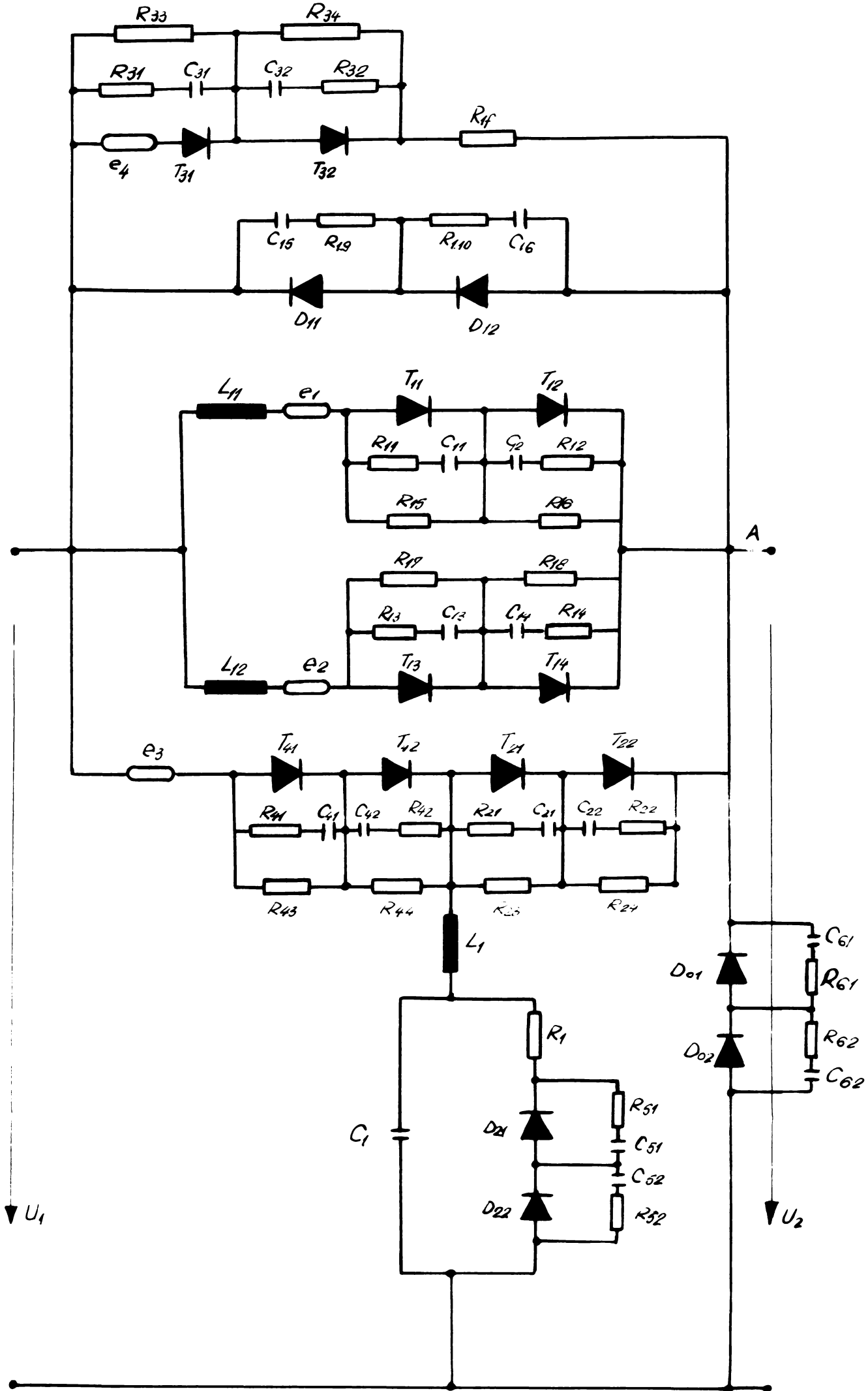


Fig. 51
Schema variatorului

$$L \left(\frac{di}{dt} \right)_{max} = U_{max} \quad (127)$$

adică

$$L = \frac{U_{max.}}{\left(\frac{di}{dt} \right)_{max.}}$$

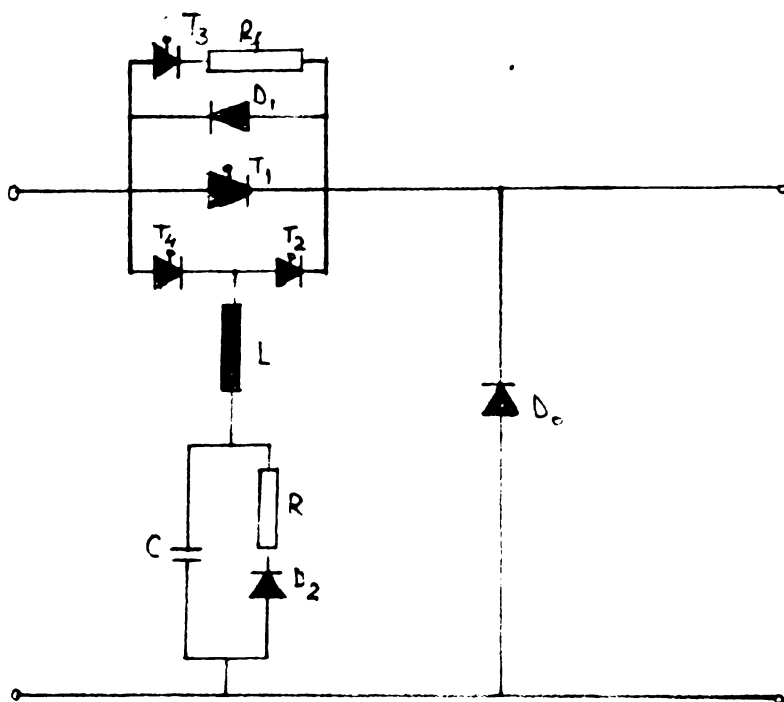
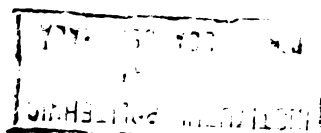


Fig.52 - Scheme de principiu și de calcul a
verietorului.



În conformitate cu normele în vigoare [89] tensiunea maximă a liniei de contact cu tensiunea nominală de 750 V, c, c, este de 900 V.

Deci

$$L = \frac{900}{400 \cdot 10^6} = 2,25 \cdot 10^{-6} \text{ H.}$$

Elementele circuitului de stingere pentru fiecare variator (fig.52) se determină având în vedere fenomenele ce se petresc în timpul încărcării și descărcării condensatorului de stingere [35, 100]. (fig 53)

Se disting următoarele faze :

1. Aprinderea tiristorului de încărcare T4.

Curentul I_L care încarcă condensatorul trecând prin inductanța L rezultă din relația

$$U = L \frac{d(I_L)}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t I_L dt + U_C \quad (128)$$

cu condițiile inițiale

$$t = 0$$

$$I_L = 0$$

$$U_C = 0$$

rezultă

$$I_L = U \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \omega_0 t \quad (129)$$

$$U_C = U (1 - \cos \omega_0 t) \quad (130)$$

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 T₂ nu conduce în acest moment, curentul I_L rămâne egal cu zero și tensiunea la bornele condensatorului devine $U_C = 2U$. Procesul de încărcare a condensatorului s-a încheiat la $t = \frac{\pi}{\omega_0}$ și acesta este pregătit pentru stingerea lui T₁.

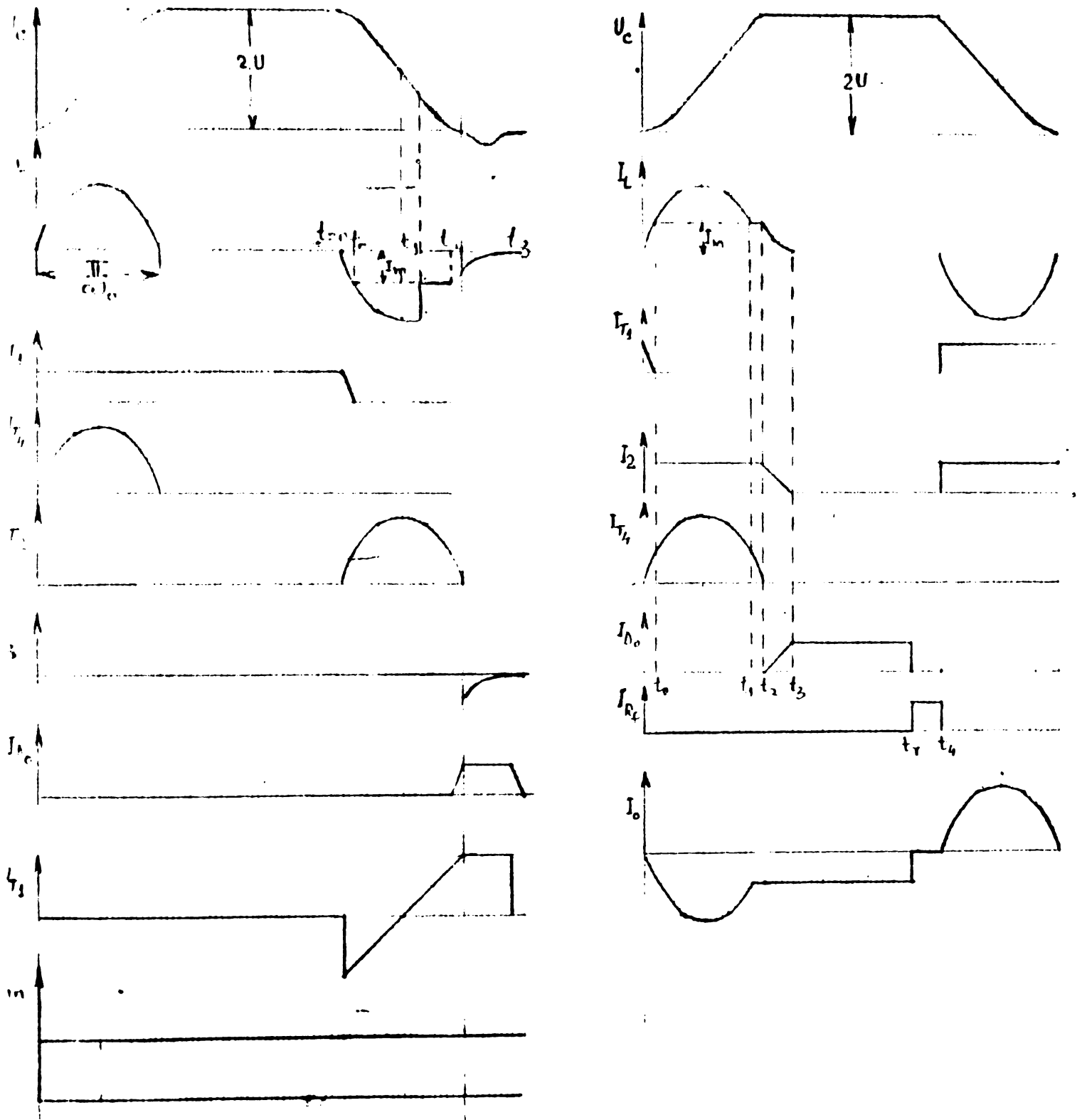


Fig. 53
 Variația în timp a curentului prin elementele principale ale
 variatorului
 a- în regim de încărcare
 b- în regim de încărcare

2. Stingerea tiristorului principal.

Schimbând originea timpului în sensul ca $t = 0$ 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 surse de tensiune. În circuitul de stingere se stabilește un curent de forma sinusoidală I_L .

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

Se disting trei faze

$$I \quad 0 \leq t \leq t_1$$

În acest interval potențialul punctului A (fig. 51) este egal cu U . Curentul I_L este dat de relația

$$U_c = \frac{1}{C} \int_0^t I_L dt = L \frac{dI_L}{dt} + U \quad (131)$$

cu condițiile inițiale

$$i_L = 0$$

$$U_c = 2U$$

Rezultă

$$I_L = U \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \omega_0 t \quad (132)$$

$$U_c = U(1 + \cos \omega_0 t) \quad (133)$$

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

..//..

$$i_L(t_1) = U \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \omega_0 t_1 = I_m \quad (134)$$

$$U_C(t_1) = U(1 + \cos \omega_0 t_1) = U \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{I_m}{U \sqrt{\frac{C}{L}}} \right)^2} \right] \quad (135)$$

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

$$\pi \quad t_1 \leq t \leq t_2$$

Începînd din momentul t_1 dipolul constituit din L_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 să descarcarea 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 sarcina cu curentul I_m .

Se pot scrie relațiile

$$i_C = I_m \quad (136)$$

$$U_C = U_C(t_1) - \frac{I_m(t - t_1)}{C} \quad (137)$$

momentul t_2 este definit de relația

$$U_C(t_2) = U_C(t_1) - \frac{I_m(t_2 - t_1)}{C} = 0 \quad (138)$$

Rezultă

$$t_2 = \frac{C U_C(t_1)}{I_m} + t_1 \quad (139)$$

Începînd din momentul $t = t_2$ un nou circuit de descarcare a condensatorului C trebuie amînsat. În consecință după ce tensiunea U_C are tendința de a-și schimba polaritatea a parte a curentului de sarcina sau tot acest curent se poate 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 ca origine.

$$L \frac{di_L}{dt} = U_c \quad (140)$$

$$U_c = \frac{1}{C} \int_0^t \left(-I_L - \frac{U_c}{R} \right) dt \quad (141)$$

cu condițiile inițiale

$$I_L = I_m$$

$$U_c = 0$$

Cum $R_c = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$ se găsește în prezența unui circuit cu amortizare critică, rezolvarea ecuațiilor conduce la :

$$I_L = I_m e^{-\frac{t}{\tau}} \left(1 + \frac{t}{\tau} \right) \quad (142)$$

$$U_c = - I_m \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{t}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (143)$$

unde

$$\tau = 2RC = \sqrt{LC}$$

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 blocaj, 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 inegalitatea

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

Dacă se alege $I_L = 2 I_m$ (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 inegalitatea

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

Ținând seama de această inegalitate și de relația (132) rezultă condițiile de blocare.

$$U\sqrt{\frac{C}{L}} = 2I_m \quad (144)$$

$$\frac{2}{3}\pi\sqrt{LC} = t_{st} \quad (145)$$

din care se calculeaza L și C

$$\left. \begin{aligned} L &= \frac{3}{4\pi} \frac{U \cdot t_{st}}{I_m} \\ C &= \frac{3}{\pi} \frac{I_m \cdot t_{st}}{U} \end{aligned} \right\} \quad (146)$$

Ținând seama de acest lucru rezulta :

$$C = K \frac{3}{\pi} \frac{I_{max} \cdot t_{st}}{U_{min}} = 89 \cdot 10^{-6} F \quad (147')$$

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_{min} - tensiunea minima la care ma i poate funcționa variatorul

$$L = \frac{3}{4\pi} \frac{U_{min} \cdot t_{st}}{I_{max}} = 22,8 \cdot 10^{-6} H. \quad (147'')$$

Curentul prin inductanța de stingere să calculează din relația

$$i = U\sqrt{\frac{C}{L}} \sin \omega_0 t \quad (148)$$

Valoarea maxima a curentului prin inductanță va fi.

$$I_{L_{max}} = U_{max} \sqrt{\frac{C}{L}} = 1778 A \quad (149) \quad \text{corespunde tipului } t = \frac{T_0}{4}$$

T_0 fiind perioada proprie de oscilație a circuitului oscilant
 $(T_0 = 282 \cdot 10^{-6} s)$

$$I_{L_{ef}} = \frac{I_{L_{max}}}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{T_0}{T}} = 299 A \quad T \text{ fiind perioada de reglare}$$

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

$$I_{med} = \frac{1}{2} \frac{I_{Lmax}}{\frac{\pi}{2}} \sqrt{\frac{T_o}{T}} = 136 \text{ A} \quad (150)$$

În această situație am ales tiristoare T_{607-14} cu următoarele caracteristici [92].

$$I_{max,af} = 330 \text{ A} \quad \left(\frac{di}{dt}\right)_{max} = 200 \text{ A} / 10^{-6} \text{ s}$$

$$I_{max,med} = 140 \text{ A}$$

$$U_{max} = 1200 \text{ V} \quad \left(\frac{dU}{dt}\right)_{max} = 200 \text{ V} / 10^{-6} \text{ s}$$

$$t_{st} = 30 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

Diodele D_1 s-au ales cu variatoarele caracteristici

$$I_{med} = 250 \text{ A} \quad \left(\frac{di}{dt}\right)_{max} = 200 \text{ A} / 10^{-6} \text{ s}$$

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

$$\text{Frecvența de lucru } 1000 \text{ Hz}$$

Rezistența de descărcare a condensatorului de stingere rezultă din relația

$$R = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} = 0,253 \Omega \quad (151)$$

În ea trebuie să se poată disipa o putere

$$P = L \frac{I_{med}^2}{2} f = 422 \text{ W} \quad (152)$$

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

$$I_{max,af} = \frac{1}{2} \frac{I_{Lmax}}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{f}{f_o}} = 58 \text{ A} \quad (153)$$

Diodele D_{01} , D_{02} trebuie să poată conduce curenții maximi 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. În această situație rezultă un curent mediu egal cu jumătate din curentul ce trece prin tiristorul principal. Am ales diode rapide tip SF 12 HR 315 avînd

$$I_{med} = 250 \text{ A}$$

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

$$\frac{di}{dt} = 200 \text{ A}/10^{-6} \text{ s.}$$

Frecvența normală de lucru 1000 Hz.

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

$$\frac{1}{3} < \frac{f_c}{f} < \frac{1}{2} \quad (154)$$

$$\frac{(\Delta U_{C_e})_{\max}}{U} = \frac{I}{8 U C_e f} < 0,1 \quad (155)$$

$$\frac{(\Delta I_{L_e})_{\max}}{I} = \frac{T^2}{32 L_e C_e} < 0,15 \quad (156)$$

Alegându-se $f_c = 135 \text{ Hz}$ din relația (155) rezultă :

$$L_e C_e = 14 \cdot 10^{-6} \quad (157)$$

Această valoare trebuie să satisfacă și ultima relație :

Pe această bază din relațiile (155), (157) rezultă

$$\left. \begin{aligned} C_e &= 2 \cdot 10^{-3} \text{ F} \\ L_e &= 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ H} \end{aligned} \right\} \quad (158)$$

Se aleg pentru realizarea filtrului condensatoare tip IFRS $2 \times 100 \cdot 10^{-6} \text{ F}$, 350 V. Rezultă că va trebui să se înscrie câte 5 bucași formînd în total 50 grupuri.

La sșezerea captatorului pe firul de contact condensatorul filtrului de intrare se încarcă, Soclul de curent va fi :

$$I_s = U_n \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \omega_0 t = 750 \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-3}}{0,7 \cdot 10^{-3}}} \sin 2\pi f_0 t \quad (159)$$

Valoarea maximă a acestui curent va fi :

$$I_{s, \max} = 1020 \text{ A}$$

În aceste condiții este necesară prezenta unei rezistențe de limitare a curentului de încărcare astfel încît întreruptorul automat AV2 să nu declanșeze.

Pentru echilibrarea tensiunilor pe cele cinci grupuri de condensatoare legate în serie se conectează rezistențe de echilibru în paralel cu condensatoarele. Dimensionarea

acestor rezistențe am făcut-o ținând seama și de faptul că condensatoarele trebuie să se descarce pînă la o tensiune nepericuloasă.

Rezultat :

$$R = 1420 \Omega \quad (160)$$

Puterea rezistenței rezultă din relația

$$P = \frac{U_{max}^2}{25 R} = 25 \text{ W} \quad (161)$$

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

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

Protecția tiristoarelor principale împotriva suprasarcinilor și scurtcircuitelor este realizată prin siguranțele ultrarapide e_1, e_2 alese astfel încît în permanența intergrele limite de sarcină $I_{T}^{2\alpha}$ tiristorului să fie superioara 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

$$R = \frac{n \cdot U_e - U_t}{(n-1) I_{bmax}} \quad (162) \quad [93]$$

$$P = \frac{\left(\frac{U_{max}}{n}\right)^2}{R} \quad (163)$$

unde

- R - valoarea rezistenței
- n - numărul de semiconductoare legate în serie
- U_e - tensiunea maximă repetitivă admisă pe element.
- U_t - tensiunea totală aplicată sirului de semiconductoare inseriate.
- I_{bmax} - carentul direct maxim la blocare la tiristoare și invers la diode
- P - puterea disipată în rezistențe
- U_{max} - tensiunea maximă de lucru la bornele sirului de ventile.

Valorile obținute sînt prezentate împreună cu fig.51

Dimensionarea elementelor RC ale circuitelor de egalizare dinamica a tensiunilor pe ventile se facut-o pornind de la sarcina reziduala

$$\Delta Q = \frac{di}{dt} (t_2 - t_1) \quad (164)$$

care conduce la un dezechilibru de tensiuni

$$\Delta U = \frac{1}{2} \frac{\Delta Q}{C} \quad (165)$$

Din (165) rezulta valoarea capacitatii condensatorului pentru o valoare ΔU admisa.

Valoarea rezistenței rezulta din condiția ca la trecerea în conducție curentul de suprasarcina sa fie limitat la o valoare acceptabila pentru semiconductoare și ca constanta de timp RC sa fie destul de mica.

Multe firme recomanda pentru ventile semiconductoare de putere rapide (utilizabile la traciune electrica)

$$RC = (15 - 20) \cdot 10^{-6} \text{ s} \quad [92]$$

Capacitatea condensatoarelor pentru protecția diodelor D_1 și D_2 rezulta

$$C_1 = \frac{50 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 250} = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ F} \quad (166)$$

Capacitatea condensatoarelor pentru protecția diodelor D_3 rezulta

$$C_2 = \frac{100 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 250} = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ F} \quad (167)$$

Capacitatea condensatoarelor pentru protecția tiristoarelor T_1, T_3 rezulta

$$C_3 = \frac{800 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 200} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ F} \quad (168)$$

Capacitatea condensatoarelor pentru protecția tiristoarelor T_2, T_4 rezulta

$$C_4 = \frac{600 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 200} = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ F} \quad (169)$$

Schema de comanda a echipamentului cu tiristoare este prezentata în fig. 53^{bis} în care s-au notat :

- Fr - filtrul de rețea
- V_1, V_2 - variatoare de tensiune continua
- TC_1, TC_2 - traductoare de curent
- BA - bloc alimentare
- BP - bloc de protecție
- Be - bloc de comanda
- TT - traductor de tensiune
- C - controler

El conține următoarele subansamble :

- blocul de comanda
- blocul de alimentare
- blocul de protecție
- traductoarele de curent
- traductorul de tensiune
- controlerul

Blocul de comanda îndeplinește următoarele funcții:

- Realizarea schemei de forță în funcție de comanda data de vâlman (tracțiune sau frinare).

- Producerea unei tensiuni de referință de forma triunghiulară cu frecvență fixă și durată variabilă în funcție de comanda primită de la vâlman și funcție de curentul prin motoare măsurat de traductoarele de curent.

- Generarea impulsurilor de aprindere și stingere a tiristoarelor principale.

- Distribuirea impulsurilor de aprindere și de stingere la tiristoarele principale ale fiecărui variator de tensiune continuă asigurând decalajul de o semiperioadă.

- Blocarea rapidă a impulsurilor de comanda a tiristoarelor în cazul unui supracurent în circuitul principal ca și în cazul scaderii sau creșterii tensiunii la intrarea variatoarelor peste limitele admise.

- Trezirea de la frînarea electrică cu recuperare de energie la frînarea dinamică și invers în funcție de tensiunea linie de contact.

-Separarea galvanica a circuitelor de forța față de cele de comanda.

Blocul de protecție realizează protecția circuitelor de forța împotriva suprasarcinilor și a variațiilor tensiunii de alimentare acționând asupra blocului de comanda care întrerupe impulsurile de aprindere a tiristoarelor principale.

Limitarea curenților atât în regim de tracțiune cât și în regim de frinare este asigurată prin bucle de curent aferente fiecărui motor. Când curentul prin motor, măsurat de transductorul de curent IC este mai mare decât valoarea maximă admisă, impulsurile date de generatorul de impulsuri sunt amplificate și distribuite la dispozitivele de comanda a tiristoarelor principale ale celor două varia-toare.

Transductorul de tensiune da informația supra valorii tensiunii la intrarea variatorului și când aceasta nu se încadrează în limitele prestabilite, blocul de protecție intervine asupra dispozitivului de comanda a tiristoarelor sau nu mai emite impulsuri de aprindere la tiristoarele principale.

Transductoarele de curent controlează valoarea curenților prin motoarele de tracțiune și transmit informația la blocul de protecție care în cazul când acești curenți depășesc valoarea maximă admisă intervine asupra dispozitivului de comanda a tiristoarelor pentru blocarea impulsurilor de aprindere a tiristoarelor principale. Blocarea este semnalizată optic sau acustic și nu poate fi anulată decât la intervenție vă manului. Emiterea din nou a impulsurilor de aprindere a tiristoarelor principale este posibilă numai după dispariția suprasarcinii și aducerea în poziția de zero a dispozitivului de comanda a pornirii sau frînării.

În regim de frinare prin buclele de curent se comanda și contactorul de suntare a rezistenței care limitează curentul de frinare recuperativă. Dacă curentul de frinare recuperativă depășește valoarea maximă admisă chiar când rezistența de limitare este nesuntată (lipse tensiunii, la linia de contact sau o valoare foarte scăzută a acesteia) se comanda aprinderea tiristoarelor de frinare reostatica.

Incarcarile pe care le-am efectuat pe stand conform schemei din fig.54 și măsurătorile întreprinse pe tramvaiul I.T.T. echipat cu variator de tensiune continuă au condus la o serie de concluzii privind influența echipamentului cu tiristoare asupra motorului de tracțiune, asupra liniei de contact și asupra caracteristicilor de tracțiune ale vehiculului. În figură s-au făcut următoarele notații :

- e - siguranță MFR
- AV₂ - întreruptor automat
- R - rezistența pentru limitarea curentului de încărcare a lui Cf.
- L_f, C_f - inductanța, respectiv capacitatea filtrului de intrare.
- R₁ - rezistența pentru limitarea curentului de frânare electrică recuperativă.
- V₁, V₂ - variatoare de tensiune continuă
- T₃₁, T₃₂ - tiristoare de frânare
- R_{f1}, R_{f2} - rezistențe pentru frânarea reostatică
- MT - motor de tracțiune 76 kW, 750 V.c.c.
- KT, KT₂, KT₃ - contactoare pentru funcționarea în regim de tracțiune 150 A, 220 V
- KF₁, KF₂, KF₃ - contactoare pentru funcționarea în regim de frânare 150 A, 220 V
- L - contactor pentru șuntarea rezistenței de limitare 150 A, 220 V.

La funcționarea în regim de motor se închid întreruptorul automat AV₂, contactorii L, KT₁, KT₂, KT₃ și întreruptorul II.

La funcționarea în regim de frânare electrică se deschid AV₂, KT₁, KT₂, KT₃, I₁ și se închid KF₁, KF₂, KF₃, KF₄, I₂. Poziția contactorului L se stabilește în mod automat de către schema de comandă în funcție de curentul de frânare recuperativă. În această situație motorul funcționează în regim de generator de curent continuu cu excitație serie. Energia electrică recuperată în procesul de frânare se consumă în rezistența R_s.

Cu ajutorul acestei scheme am studiat caracteristicile de tracțiune și de frânare pentru diferite valori ale raportului ciclic δ , respectiv ale turației motorului și

Am urmărit comportarea motorului de tracțiune alimentat prin variator de tensiune, continuu.

Echipamentul cu tiristoare are influența asupra motorului de tracțiune datorită efectului armonicilor tensiunii și curentului, efectului diferitelor tehnici de reglaj, fenomenelor tranzitorii, protecție motorului etc.

Armonicile curentului de sarcină provoacă pierderi suplimentare în înfășurări și influențează negativ comutația motorului.

Armonicile tensiunii provoacă pierderi suplimentare în fier.

Cu ocazia încercărilor mi s-a confirmat faptul că la frecvențe de lucru ale variatorului mai mari de 200 Hz, reactanța de scăpare a motorului provoacă o amortizare sensibilă a curentului astfel că se poate renunța la inductanța de netezire exterioară. Curentul prin motor este suficient de bine filtrat și influența armonicilor curentului asupra încălzirii bobinajului nu este sensibilă. Influența armonicilor curentului asupra comutației motorului a fost evidențiată urmărindu-se uzura periiilor și a colectorului. Am constatat că uzura periiilor și a colectorului este practic aceeași ca și în cazul alimentării motorului în curent continuu.

Faptul că în timpul pornirii curentul prin motor are o valoare constantă influențează pozitiv funcționarea colectivului. Un mare avantaj al utilizării variatorului asupra comutației este acela că motorului i se aplică întreaga tensiune a liniei de contact numai în plină sarcină și în aceste condiții el funcționează ca un motor de curent continuu.

Din punct de vedere al fenomenelor tranzitorii provocate de întreruperile intempestive ale tensiunii de alimentare am constatat că în cazul alimentării prin variator socul de curent la reapariția tensiunii este eliminat.

La reapariția tensiunii la bornele motorului tensiunea se aplică progresiv astfel că curentul crește exponențial până la valoarea de regim.

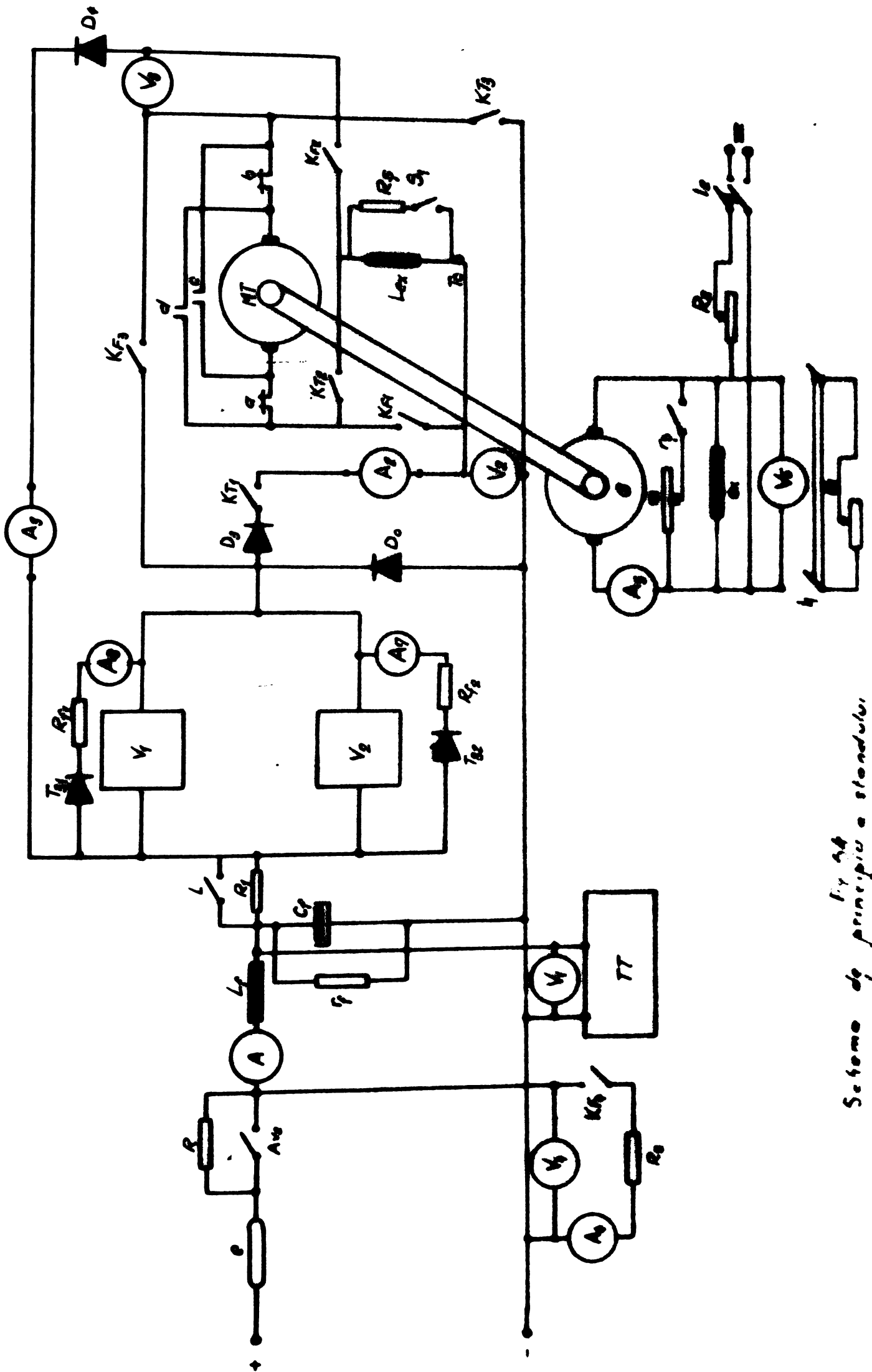


Fig. 14
Scheme of principle of standstill

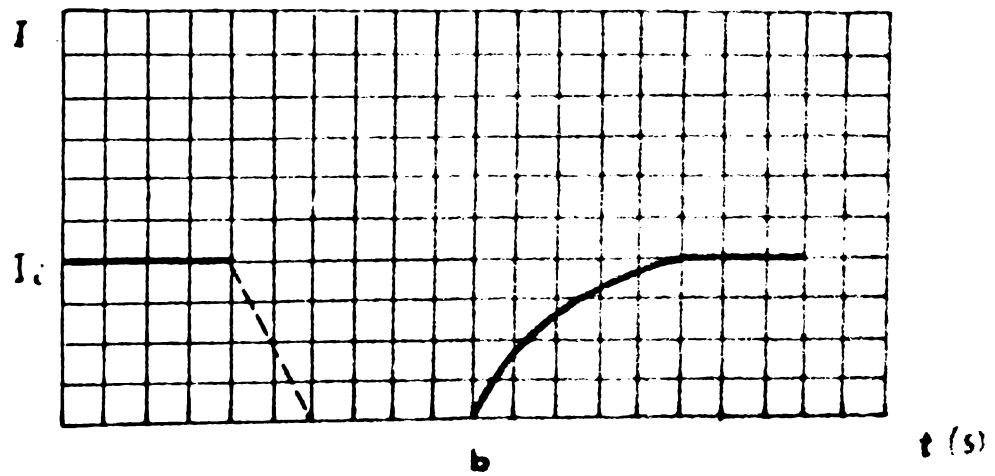
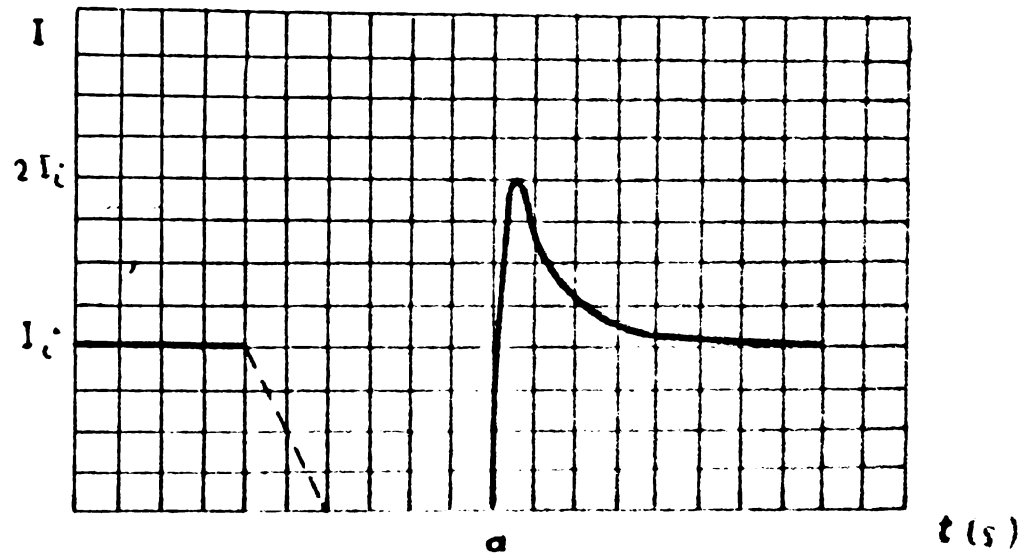


Fig. 55 - Variația curentului absorbit din linie de contact în cazul revenirii tensiunii după o întrerupere de scurte durată.

- a- în cazul schemei cu reostat de pornire
- b- în cazul schemei cu varistor

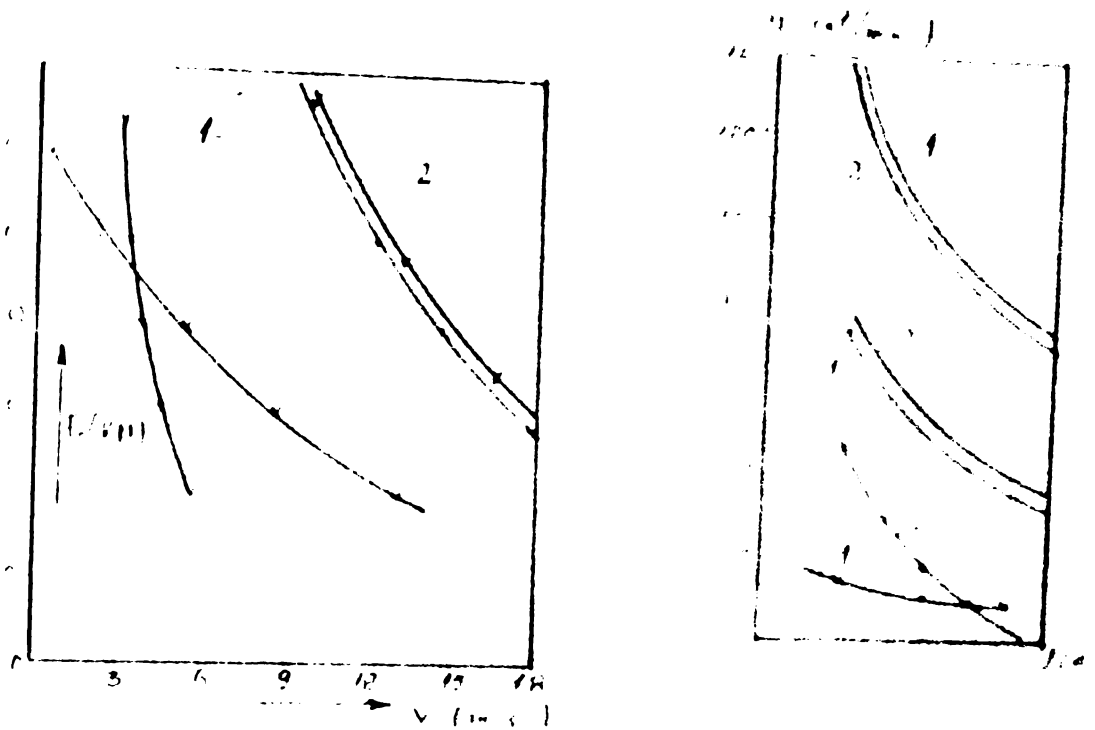


Fig.56 - Caracteristicile de tracțiune și caracteristicile mecanice în cazul schemei cu variator comparativ cu schema cu reostat de pornire.

1- Pentru schema cu variator corespunzător la $\sigma = 0,1$, $\sigma = 0,5$ $\sigma = \sigma_{max}$.

2- Pentru schema cu reostat de pornire corespunzător conexiunii serie și prime trepte de rezistență scurtcircuitată, conexiunii serie cu toate treptele de rezistențe scurtcircuitate și conexiunii paralele.

În cazul schemelor clasice tensiunea la bornele motorului se aplică dintr-o dată iar curentul prin motor crește brusc la o valoare egală cu de două-trei ori curentul de regim și apoi se stabilizează la această valoare (fig. 55.)

Motorul alimentat prin variator este deci protejat contra supraîncălzirii provocate de fenomenele tranzitorii. Cât privește impulsurile de tensiune suplimentare am constatat că acestea nu depășesc nivelul de izolație la care se încearcă în mod normal motorul [22, 89].

Alimentarea motorului de tracțiune prin variator de tensiune continuă are o influență favorabilă și asupra linei de contact. Pentru aceleași condiții de pornire, curentul absorbit din linia de contact este mai mic în cazul alimentării prin variator comparativ cu cazul folosirii schemei clasice de pornire cu reostat.

Din punct de vedere al caracteristicilor de tracțiune se remarcă două avantaje importante și anume: reglajul continuu al forței de tracțiune în întreg domeniul F, V și obținerea unor caracteristici $F = f(V)$ mai înclinate care conduc la valori $\Delta F \Delta V$ mari mari, mai ales în domeniul vitezelor mici (fig. 56)

Cap.7. Implicațiile tehnico-economice ale folosirii variatorului de tensiune continuă în schemele de acționare electrică a tramvelilor.

Folosirea variatorului de tensiune continuă în schemele de acționare electrică a tramvelilor prezintă avantaje tehnice, avantaje economice și avantaje privind confortul călătorilor și al personalului de bord.

Cele principale avantaje tehnice se menționează:

- 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 intermedie de scurtă durată.
- absorbirea unui curent mai mic din rețeaua de alimentare atât în timpul pornirii cât și în funcționare.
- posibilitatea folosirii frînării electrice până la oprirea vehiculului.

- posibilitatea folosirii frânării electrice recuperative fara a complica schema.

Faptul ca, caracteristica efort-viteza este mai înclinată prezintă importanța 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 șina 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 deosebite de importante pentru bună funcționare a vehiculului și anume: folosirea deplină a aderenței și îmbunătățirea confortului călătorilor.

În cazul reglajului prin reostat forța de tracțiune la pornire și frânare variază între limita maximă $F_{o\max}$ și limita minimă $F_{o\min}$. Rezultă o forță de tracțiune medie F_{om} a cărei valoare este dată de relația

$$F_{om} = \frac{F_{o\max} + F_{o\min}}{2} \quad (170)$$

Abateră forței de tracțiune față de valoarea medie va fi :

$$\Delta F_o = \frac{F_{o\max} - F_{o\min}}{2} \quad (171)$$

Se poate deci introduce un coeficient de neuniformitate a forței de tracțiune

$$K_{\eta_{Fo}} = \frac{\Delta F_o}{F_{om}} = \frac{1 - \frac{F_{o\min}}{F_{o\max}}}{1 + \frac{F_{o\min}}{F_{o\max}}} \quad (172)$$

Cum diferența $F_{o\max} - F_{o\min}$ depinde de numărul treptelor reostatului de pornire rezulta ca coeficientul de neuniformitate este cu atât mai mic cu cât reostatul are mai multe trepte.

În cazul folosirii variatorului de tensiune continuă se poate considera ca reostatul are o ~~influență~~ influență infinită de trepte și ca urmare $K_{\eta_{Fo}} = 0$.

Pentru evitarea patinării trebuie respectată condiția

$$F_0 \leq \varphi G_a$$

(123)

G_a fiind greutatea aderentă iar φ coeficientul de aderență.

În cazul schemei cu resort de pornire condiția devine.

$$F_{0\max} \leq \varphi G_a$$

(124)

Rezultă că forța medie de tracțiune va fi

$$F_{0m} = F_{0\max} - \Delta F_0$$

(125)

În cazul schemei cu variator de tensiune continuă se poate asigura că

$$F_0 = F_{0\max} = \varphi G_a$$

(126)

Deci scheme cu variator permite folosirea deplină a aderenței.

Se știe că în perioadele tranzitorii

$$F_0 = \sum R + F_a$$

(127)

unde

F_0 = forța de tracțiune la obod.

$\sum R$ = suma rezistențelor ce se opun mișcării

F_a = forța de accelerare

Rezultă :

$$F_a = ma = F_0 - \sum R$$

(128)

m = masa vehiculului

$$a = \frac{F_0 - \sum R}{m}$$

(129)

În cazul schemei cu variator trecerea de la o viteză la alta se face la $F_0 = \text{const.}$ deci accelerația este determinată numai de inerția sistemului.

În cazul schemei cu resort pe linia accelerația determinată de inerția sistemului apare o accelerație ^{suplimentară} determinată de variația forței de tracțiune. Și cum această variație se face brusc, rezultă că și accelerațiile pe care ea le produce sînt apreciable și au consecințe defavorabile atât asupra elementelor de transmisie cât și asupra confortului călătorilor.

Aceste fenomene apar și mai pregnant atunci când manipulantul nu respecta instrucțiunile de manevrare a controlerului (fig.57) [55]

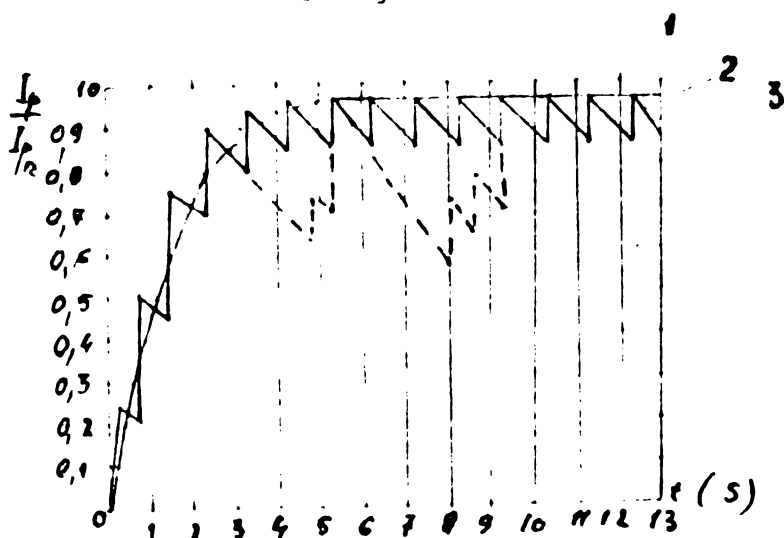


Fig.57 - Variația curentului de pornire.

1 - în cazul schemei cu variator de tensiune continuă.

2 - în cazul schemei cu reostat de pornire când pornirea este comandată automat.

3 - idem când pornirea este comandată manual

Înteruperile de scurtă durată ale tensiunii de alimentare a motoarelor de tracțiune sînt destul de frecvente. Ele se înregistrează atît la trecerile peste alte linii cît și din cauza dedansării întreruptoarelor automate din stațiile ca urmare a unor suprasarcini pe un anumit tronson de linie.

Resparația tensiunii la linia de contact găsește motorul în condiții asemănătoare cu cele din perioada pornirii și dacă manipulantul nu a trecut controlerul macar pe o poziție intermediară apare un șoc de curent atît în motorul de tracțiune cît și în linia de contact. Mărimea acestui șoc de curent depinde de durata întreruperii și de viteza vehiculului. În condițiile normale ale trecerii peste încrucișări de linii acest șoc de curent atinge cam dublul valorii curentului de regim.

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 variatorului de tensiune continuă asigură că 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 (fig.55). 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 :

1. La același curent prin motor, curentul absorbit din linia de contact este mai mic în cazul schemei cu variator decît în cazul schemei cu reostat de pornire. Într-adevăr curentul prin tiristorul principal este întrerupt pe durata $(1 - \delta)T$. Deci, dacă curentul prin motor este I_m , curentul absorbit din rețea va fi δI_m . Analizînd acest curent în cele două posibilități de comandă a variatorului (prin frecvențe impulsurilor sau prin lățimea impulsurilor) rezultă că la același curent prin motore, curentul absorbit din rețea va fi cu atît mai mic cu cît frecvența de lucru, este mai mică respectiv cu cît lățimea impulsurilor este mai mică.

Deci raportul între curentul absorbit din rețea la schema cu reostat I_{mR} și cu variator de tensiune continuă I_{mV} este dat de relația

$$\frac{I_{mR}}{I_{mV}} = \frac{I_m}{\delta I_m} = \frac{1}{\delta}$$

2. Se observă că acest raport este mai mare la pornire și scade pe măsură ce se funcționează pe caracteristici mecanice mai apropiate de caracteristica mecanică naturală. La funcționarea pe caracteristica mecanică naturală raportul respectiv are valoarea minimă.

Pe lângă avantajele tehnice, schemele cu variator de tensiune continuă prezintă și avantaje economice cele mai 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 economizată ca urmare a lipsei reostatului de pornire ;
- energia economizată ca urmare a absorbirii din rețea a unui curent mai mic.
- energia economizată ca urmare a posibilității folosirii frânării cu recuperare de energie.

Este cunoscut faptul că la pornirea cu reostat în acestă se consumă o energie a cărei valoare poate fi calculată cu suficientă aproximație folosind relația

$$W_{PR} = \frac{U}{2} I_m \cdot t_p \quad (181)$$

unde

W_{PR} - energia electrică consumată în reostatul de pornire (W.h)

U - tensiunea liniei de contact (V)

I_{Pm} - 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

$$W_{VP} = \frac{U}{2} \sigma I_p \cdot t_p \quad (182)$$

La pornirea prin reostat din rețea se consumă energia

Rezultă $W_{RP} = U I_p \cdot t_p \quad (183)$

$$\frac{W_{VP}}{W_{RP}} = \frac{\sigma}{2} \leq 50\% \quad (184)$$

În funcționare normală economia de energie este determinată de faptul că, așa s-a arătat, curentul absorbit din rețea în cazul schemei cu variator de tensiune continuă este mai mic decât la schema cu reostat.

Rezultă

$$\frac{W_{Vn}}{W_{Rn}} = \alpha \quad (185)$$

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 :

$$W_f = U I_f t_f \quad (186)$$

unde

W_f - energia furnizată relației la frînarea electrică recuperativă (wh)

U - tensiunea la bornele dipolului activ (V)

I_f - curentul de frînare (A)

t_f - timpul de frînare (h)

Măsurătorile efectuate pe stand în laborator au dus la concluzia că dacă se adaugă această energie, la energia economisită la pornire și în funcționare normală se ajunge la o economie totală de cca. 40 % în funcție de condițiile concrete ale traficului.

Pe lângă avantajele menționate, schemele de acționare cu variator de tensiune continuă au și unele neajunsuri.

Printre cele mai importante se remarcă fiabilitatea mai redusă a acestor scheme comparativ cu schema cu reostat de pornire. Folosind metodele aplicabile conexiunilor structurale compuse care au la bază fie scheme logice fie teorema lui Bayes se pot scrie relațiile care exprimă probabilitatea de defectare (nefiabilitatea) unei scheme structurale tip paralel (specifica schemelor de acționare cu variator) respectiv probabilitatea de bună funcționare (fiabilitatea) a unei scheme structurale serie (specifica schemelor de acționare cu reostat de pornire).

$$F(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t) \quad (187)$$

F_i , fiind probabilitatea de defectare a elementelor componente

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (188)$$

R_i , fiind fiabilitatea elementelor componente definite prin relația

$$R(t) = e^{-\int_0^t Z(t') dt'} \quad (189)$$

$Z(t)$ reprezintă intensitatea de defectare.

Din cele de mai sus se poate constata că la acționări de mică putere care folosesc un număr redus de elemente, schemele cu variator asigură o fiabilitate mai bună decât cele cu reostat de pornire. Într-o schemă pentru acționarea tramvaiului însă, având în vedere curenții mari și faptul că ventilele semiconductoare realizate în prezent nu suportă curenți și tensiuni inverse prea mari, numărul elementelor componente în cazul schemelor cu variator este mult mai mare decât în cazul schemelor cu reostat de pornire.

..//..

Deși fiabilitatea fiecărui element separat este mai mare, pe ansamblu, avînd în vedere că numărul elementelor este de 2-3 ori mai mare, fiabilitatea schemei cu variator în condițiile realizării ei ca o schema structurală paralel comparativ cu a schemei cu reostat de pornire rezultă: [106]

$$R_v(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - e^{-\int_0^t z_i(t) dt}] \quad (190)$$

$$R_r(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\int_0^t z_i(t) dt} \quad (191)$$

Calcululele efectuate de mine folosind relațiile (190) (191) pentru schema din fig.50 comparativ cu cele pentru schema clasică folosită la acționarea tramvaiului monoboghiu [18] utilizînd ca indicator intensitatea medie de defectare luată după [107] au dus la concluzie că fiabilitatea schemei cu variator este cu cea. 20% mai scăzută decît a celei cu reostat de pornire. Datele obținute sînt prezentate în anexa nr.3.

Un alt inconvenient al schemelor cu variator în condițiile actuale îl reprezintă costul mai ridicat (cu cea. 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. Această problemă va fi însă rezolvată avînd în vedere că programul de asimilări al MICM prevede că începînd din 1977 IPHS-Bănăasa 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 a 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.

Cap. 8. Rezultate obținute

Începând 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 comenzii prin impulsuri de tensiune, a influenței schemei cu variator asupra caracteristicilor de tracțiune și de frânare, asupra instalațiilor de telecomunicații, asupra liniei de contact și asupra economiei de energie electrică.

8.1. Comportarea variatorului

Variatorul de tensiune continuă împreună cu blocurile de comanda aferente le-am supus unor încercări minuțioase care să pună în evidență comportarea acestora în diferite condiții de funcționare: temperaturi ale mediului ambiant cuprinse între -35°C și $+65^{\circ}\text{C}$, umiditatea relativă 93-98%, vibrații cu frecvența cuprinsă între 20 Hz și 50 Hz și accelerația 3 g și scuturături cu frecvența de 120 lovituri pe minut și accelerația 3 g.

Încercarea echipamentului la temperatura de $+65^{\circ}\text{C}$ am efectuat-o într-o etuvă termostatică în care acesta a fost menținut timp de două ore.

Încercarea la temperatura de -35°C am efectuat-o timp de 2 ore cu echipamentul în stare de funcționare în interiorul unei camere climatice tip NEMA instalată în cadrul laboratorului de cercetări protecții climatice din ICPE - București.

..//..

Incercarea comportarii la umiditate a fost efectuată menținând echipamentul timp de 48 ore într-o cameră având umiditatea de 95 % și temperatura constantă de 25°C pe toată durata încercării. La sfârșitul perioadei am verificat rezistența de izolație a circuitelor față de carcasa cu ajutorul unui indicator de 500 V și rigiditatea dielectrică a izolației față de carcasă aplicând timp de 1 minut tensiunea de 3500 V, 50 Hz, obținută de la o stație de încercare cu puterea de 2500 VA.

Incercarea comportarii la vibrații și scuturături a fost realizată cu ajutorul stărilor speciale existente în ICPE care permit alegerea corespunzătoare a frecvenței și accelerației.

În aceste condiții cu ajutorul instalației prezentate schematic în fig.59 s-au verificat principalii parametri funcționali ai variatorului și anume :

- variația tensiunii la ieșire în funcție de raportul ciclic (fig.58)

- intrarea în funcțiune a protecției de tensiune când tensiunea de alimentare scade sub 500 V și deblocarea, acestei protecții la creșterea tensiunii la valoarea de 500 V.

- intrarea în funcțiune a protecției de curent când curentul de sarcină depășește valoarea prescrisă.

Variația tensiunii de ieșire din variator în funcție de raportul ciclic a fost determinată la funcționarea în gol a variatorului alimentat la tensiunea constantă ($U = 750$ V). În aceste condiții s-a măsurat tensiunea la ieșirea din variator pentru diferite valori ale lui δ (0,2; 0,4; 0,5; 0,8; 0,94).

Scaderea tensiunii de alimentare sub valoarea de 500 V nu este admisă de norme în vigoare. În această situație protecția de tensiune trebuie să intre în funcțiune în mod sigur când tensiunea de alimentare atinge valoarea de 500 V. Verificarea acestei condiții a fost efectuată tot la funcționarea în gol a variatorului. Am scăzut treptat tensiunea de alimentare a variatorului prin intermediul redresorului comandat R_{com} (fig.59) și am urmărit valoarea tensiunii la care acționează protecția și valoarea tensiunii la care această protecție se deblochează permițând generarea impulsurilor de aprindere și stingere a tiristorului principal. Protecția este prevăzută cu posibilitate

de reglaj a valorii tensiunii la care se întrerup impulsurile de aprindere și de stingere. Am efectuat mai multe măsurători pentru a determina dispersia valorilor tensiunii de întrerupere și de restabilire a impulsurilor obținând următoarele date (vezi tabelul 1).

Din fig.58 și din datele prezentate în tabelul menționat se constată că variațiile de temperatură influențează foarte puțin caracteristicile normale de funcționare ale varistorului (determinate pentru temperatura ambiantă de 25°C și umiditatea relativă de 65%) aceasta ca urmare a stabilității parametrilor funcționali ai elementelor componente (tiristoare, diode, tranzistoare, condensatoare)

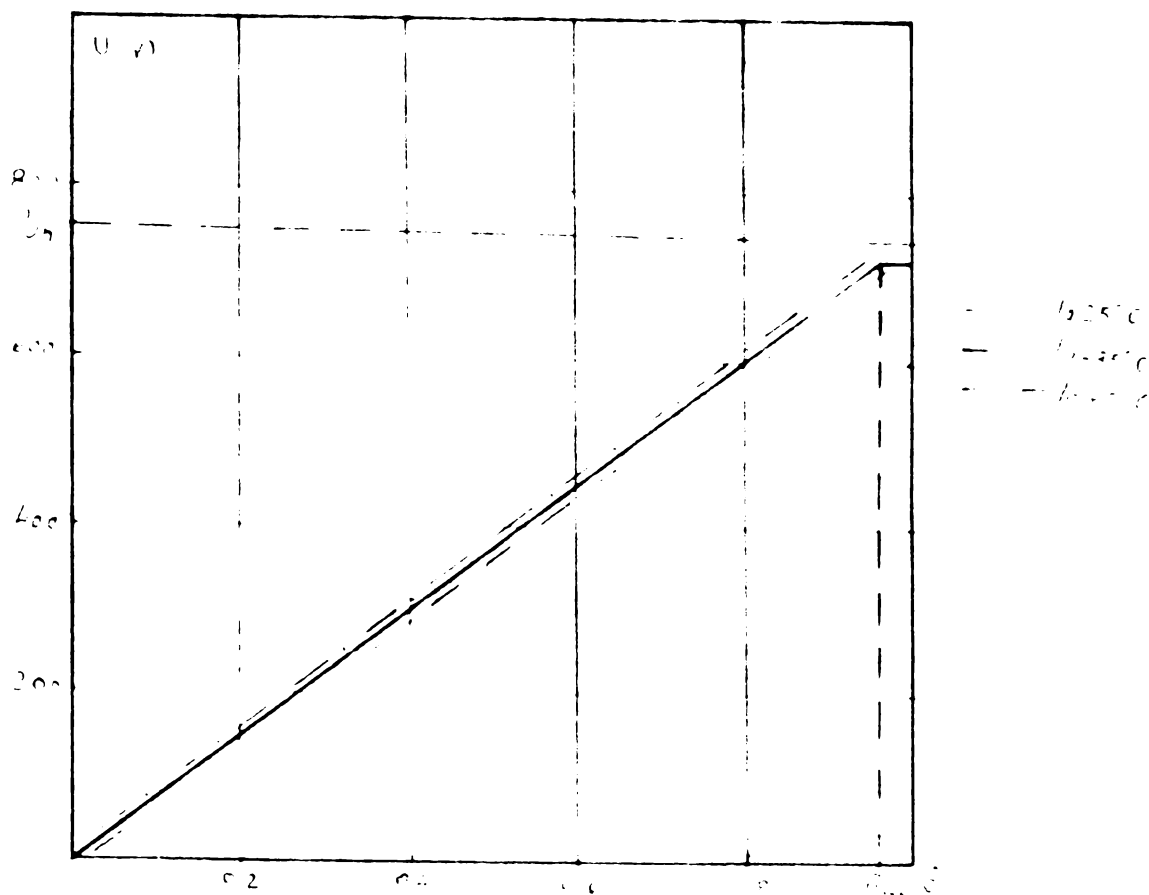


Fig.58 - Variația tensiunii la ieșirea din varistor în funcție de raportul ciclic.

Verificarea funcționării protecției de curent am realizat-o tot în schema din fig. 59. varistorul funcționând la tensiunea nominală (750 V). Cu ajutorul rezistorului ajustabil R am modificat treptat valoarea curentului de sarcină pînă la valoarea maximă admisă (400 A). La acest

valoarea protecția de curent intră în funcțiune blocând furnizarea impulsurilor de aprindere și de stingere a tiristorului principal. Deblocarea protecției de curent se realizează numai la intervenția operatorului care este obligat să manipuleze un buton. Acest lucru este pus în evidență cu ajutorul ampermetrului A din fig.59.

O alta categorie de încercări au avut ca scop să determine încălzirile principalelor elemente ale varistorului în regim de funcționare de durată la sarcina nominală.

Varistorul alimentat la tensiunea nominală a fost inserat în circuitul unei sarcini rezistiv-inductive astfel calculată, încât prin varistor să treacă curentul nominal (225 A) așa cum se arată în fig.59.

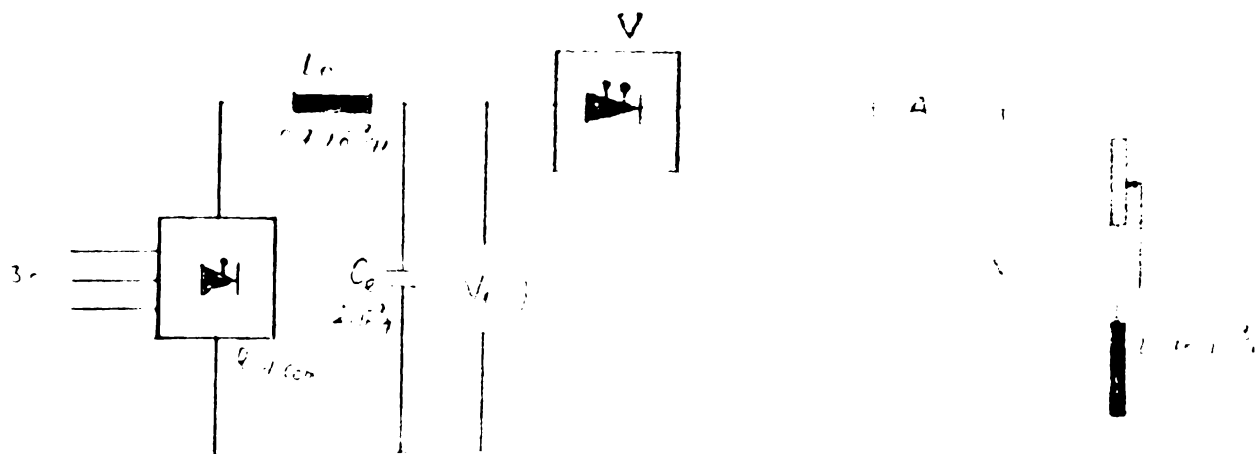


Fig.59 Schema folosite pentru măsurarea încălzirii elementelor componente ale varistorului.

Încălzirile ventilelor semiconductoare și ale condensatoarelor le-am determinat prin măsurători directe cu termocuple iar încălzirile înfășurărilor inductanțelor prin metoda variației rezistenței. Valorile obținute la stabilizarea regimului termic sînt menționate în anexa 1 pentru o temperatură ambiantă de 25°C.

Funcționarea de durată a varistorului instalat pe un tramvai tip TIMIS 1 incl. din anul 1975 a scos în evidență necesitatea utilizării unor tiristoare și diode rapide care să suporte în bune condiții solicitările electrodinamice ce apar ca urmare a variațiilor repetate și rapide ale curentului și tensiunii.

YVANKO 1975
V. M. I.
2003.100.101120

8.2. Comportarea motorului de tracțiune

Incarcarile pe care le-am efectuat în laboratorul ICPE^{si} al IMEB asupra mai multor motoare de curent continuu au evidențiat faptul ca alimentarea acestora prin variator de tensiune continua cu tensiune sub forma de impulsuri influențează negativ următorii parametri funcționali ai motorului: puterea utilă, cuplul motor, turația, randamentul. De asemenea în acest caz încălzirile înfașurilor motorului și ale circuitului magnetic cresc comparativ cu cele obținute în cazul alimentării directe dela sursa de tensiune continua.

Ondulația curentului prin motor are o importanță deosebită în realizarea parametrilor funcționali și privind încălzirea acestuia.

În baza relațiilor (38)(39), ondulația curentului prin motor rezultă :

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

care după efectuarea calculelor conduce la expresia

$$\Delta I_m = \frac{U_r}{r} \frac{(1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau}})(1 - e^{-\frac{(1-\delta)T}{\tau}})}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} \quad (192)$$

Se observă ca pentru un motor dat ondulația curentului depinde de raportul ciclic δ și de perioada de reglare T .

Dacă se dezvoltă în serie termenii relației (192) și se iau primii doi termeni ai seriei se obține relația

$$\Delta I_m = \delta(1-\delta) \frac{T}{\tau} \frac{U_r}{r} = \delta(1-\delta) \frac{T \cdot U}{L} \quad (193)$$

Această relație are valoarea maximă pentru $\delta = 0,5$ (aceasta rezultă din condiția $\frac{d\Delta I_m}{d\delta} = 0$). Rezultă deci ca în cazul alimentării motorului de la un variator comandat prin lățimea impulsurilor în circuit trebuie să se introducă o inductanță de netezire suplimentară care să scurtcircuiteze automat când raportul ciclic se găsește în domeniul $0,7 \leq \delta \leq 0,3$.

În fig.60 am reprezentat grafic relația (193) în funcție de δ pentru $U_1 = 750$ V și diferite valori ale frecvenței de lucru a variatorului și ale inductanței circuitului.

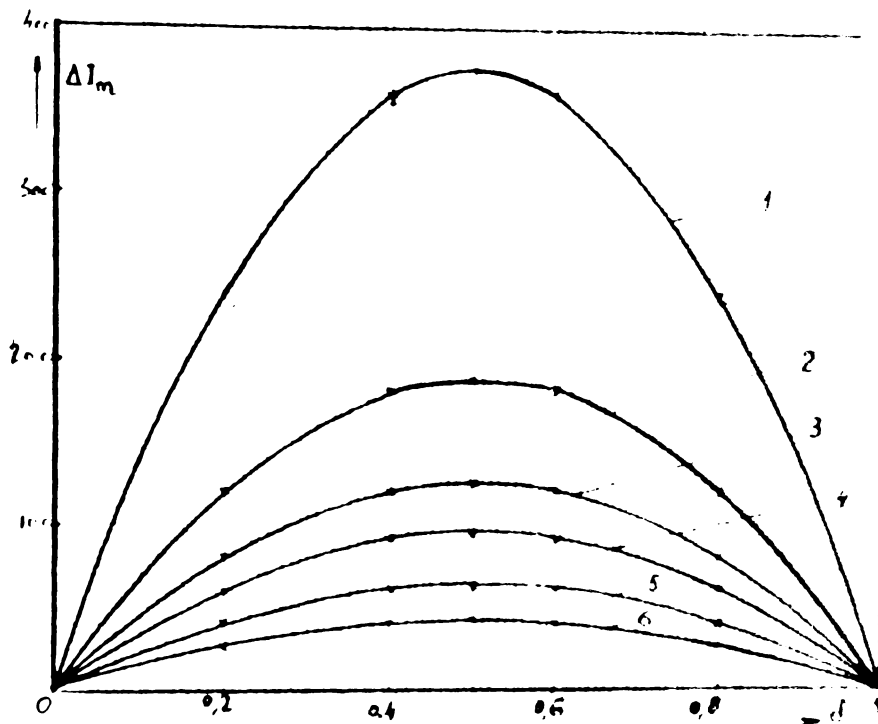


Fig.60 - Curbele corespunzătoare relației (193)

Curbele din fig.60 corespund următoarelor condiții :

Curbe nr.1

$$f = 100 \text{ Hz}$$

$$L = 5 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

Curbe nr.2.

a) $f = 100 \text{ Hz}$	b) $f = 200 \text{ Hz}$
$L = 10 \cdot 10^{-3} \text{ H}$	$L = 5 \cdot 10^{-3} \text{ H}$

Curbe nr.3.

a) $f = 100 \text{ Hz}$	b) $f = 300 \text{ Hz.}$
$L = 15 \cdot 10^{-3} \text{ H}$	$L = 5 \cdot 10^{-3} \text{ H}$

Curbe nr.4

$$f = 200 \text{ Hz}$$

$$L = 10 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

Curbe nr.5

a) $f = 200 \text{ Hz.}$	b) $f = 300 \text{ Hz}$
$L = 15 \cdot 10^{-3} \text{ H}$	$L = 10 \cdot 10^{-3} \text{ H}$

Curbe nr.6

$$f = 300 \text{ Hz.}$$

$$L = 15 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

Analizând curbele prezentate în fig.60 rezultă următoarele concluzii deosebit de importante :

- la frecvențe de lucru mai mici de 200 Hz- ondulara curentului de sarcina variază foarte pronunțat în funcție de raportul ciclic,

↳ valoarea maxima depășind de cca. doua ori valoare medie;

- menținând constanta aceasta frecvență, ondulara poate fi redusa înseriind în circuitul motorului o inductanță suplimentară;

- la frecvențe de lucru ale variatorului mai mari de 300 Hz, ondulara curentului este suficient de mica fara a mai fi necesara înserierea unei inductanțe suplimentare în circuitul motorului;

- creșterea frecvenței de lucru a variatorului sau înserierea inductanței corespunzătoare au ca efect obținerea unor valori $\frac{\Delta I_m}{\Delta \sigma}$ mai mici, reducerea valorii maxime a ondularii ca și a raportului între valoarea maxima și cea medie. Se vede ca la $f = 300$ Hz și $L = 10 \cdot 10^{-3}$ H (o inductanță apropiată ca valoare de inductanța unui motor de curent continuu de tracțiune tip TN 73 de 120 kW)

$$\frac{(\Delta I_m)_{max}}{(\Delta I_m)_{med}} \approx 1,3.$$

Efectuând calculele pe baza relației (193) pentru motorul de curent continuu cu excitație serie de 74 kW, 750V, 1470 rot/min avînd $L = 5,7 \cdot 10^{-3}$ H și $r = 0,42 \Omega$, alimentat prin variator cu frecvența de lucru de 100 Hz rezultă

$$(\Delta I_m)_{max} = \frac{U_T}{4L} = 329 \text{ A}$$

$$(\Delta I_m)_{med} = 210 \text{ A}$$

În cazul funcționării la $\sigma = \sigma_{max} = 0,94$ rezultă

$$\Delta I_m = 74 \text{ A}$$

Știind ca curentul nominal al motorului este 100 A rezultă că

$$\frac{\Delta I_m}{I_m} \times 100 = 74 \%$$

...//...

Daca se marește frecvența de lucru a variatorului la 300 Hz ond larea se micșorează de trei ori adica :

$$\Delta I_m'_{max} = 109 A$$

$$(\Delta I_m'_{c=0,90} = 246 A)$$

Rezulta că și în această situație vîrfurile de curent la care este supusa înfașurarea motorului pot atinge valori foarte mari (peste 1,5 I_{m_n}).

Pentru a limita aceste vîrfuri la valori acceptabile (sub 1,1 I_{m_n}) este necesară inserierea unei inductanțe suplimentare a carei valoare rezulta din condiția

$$\frac{\Delta I_m}{I_m} \leq 0,2$$

$$L = 85,4 \cdot 10^{-3} H = 5,7 \cdot 10^{-3} H = 59,1 \cdot 10^{-6} H$$

pentru cazul cînd se lucreaza în zona

$$0,3 \leq \delta \leq 0,7 \text{ și}$$

$$L = 19,3 \cdot 10^{-3} H - 5,7 \cdot 10^{-3} H = 13,6 \cdot 10^{-6} H$$

pentru cazul cînd se lucreaza în zona

$$0,7 \leq \delta \leq 0,3$$

Incarcarile pe care le-am efectuat la IMKB asupra unui motor de curent continuu tip TN 74,75eV, 178.A, 1405 rot/min au evidențiat faptul ca gradul de ondulare scade cu creșterea curentului de sarcina și depinde de gradul de excitație al mașinei (vezi tabelul nr. 2 în anexa).

Ridicînd caracteristica mecanică a aceluiași motor în cazul alimentării prin variator și în cazul alimentării directe de la o sursă de curent continuu am obținut următoarele date (vezi tabelul nr.3 în anexa).

Se observa ca la sarcina nominala turația măsurată difera față de turația indicată de producător cu 3,92 % în cazul alimentării directe și cu 0,71 % în cazul alimentării prin variator.

Pentru a evidenția influența alimentării prin variator de tensiune continuă asupra încălzirii înfașurilor am încercat motorul tip TN 74 încărcat la sarcina nominala în serviciul Sl. Motorul a funcționat pînă la stabilizarea regimului termic cu grad de excitație 80% și grad de ondulare a curentului 37 %.

Incalzirile înfașurarilor s-au determinat prin metoda variației rezistenței cu temperatura folosind expresia

$$\Delta t = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (234,5 + t_1) - (t_2 - t_1) \quad (194)$$

unde

Δt - supratemperatura ($^{\circ}\text{C}$)

R_1, t_1 - rezistența înfașurării (Ω) respectiv temperatura ambiantă ($^{\circ}\text{C}$) în stare rece a motorului.

R_2, t_2 - rezistența înfașurării (Ω) respectiv temperatura ambiantă ($^{\circ}\text{C}$) în stare de regim a aparatului.

Am obținut rezultatele prezentate în tabelul nr. 4 în anexa.

Pentru formularea unor concluzii clare am efectuat încercări pentru determinarea încălzirii în cele două situații de alimentare și asupra următoarelor metebre electrice de curent continuu.

Caracteristici	TH73	TN75	MCM 8e0	MCM 8e2	MCM 8e3	MCM 8e6
tens. nominală (V)	750	750	440	440	440	440
puterea nominală (kW)	120	185	37	75	11	22
curentul nominal (A)	178	270	94	20	30	57
rândamentul (%)	90	90	90	84	84	88
turația nominală (rot/min)	1480	1350	575	900	800	850
clasa de izolație						
- rotor	B	F	B	B	B	B
- stator	F	F	B	B	B	B

În urma calculelor efectuate am obținut rezultatele prezentate în tabelul 5 în anexă.

Din aceste date se desprind următoarele concluzii :

- pentru o gamă largă de puteri încălzirea înfașurării indusului nu crește cu mai mult de 15 %, a înfașurării de excitație cu mai mult de 20%, a înfașurării polilor auxiliari cu mai mult de 23 % și a înfașurării de compensație cu mai mult de 10,6 %;

- influența alimentării prin variator asupra încălzirii este mai pronunțată la motoarele de putere mare.

Din încercările efectuate asupra motorului tip TN73 750V, 120 kW alimentat direct la sursa de curent continuu și alimentat prin variator de tensiune continuă s-au obținut următoarele date comparative corespunzătoare sarcinii nominale (vezi tabelul nr. 6 în anexa).

Rezultă următoarele concluzii :

- la aceeași viteză 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 sursa de curent continuu;

- în ambele cazuri valorile obținute se încadrează în toleranțele prevăzute de STAS 5679-68.

8.3. Influența schemei cu variator asupra caracteristicilor mecanice și de tracțiune

Cu ajutorul schemei din fig.54 am ridicat caracteristicile mecanice ale motorului de 74 kW pentru diferite valori ale raportului ciclic care corespund situațiilor caracteristice întâlnite la schema de comandă cu reostat de pornire.

Aceste caracteristici determinate experimental sînt prezentate în fig.56.În cazul schemei cu reostat s-a folosit o rezistență de pornire de $2,7 \Omega$.

Din figure se observă că în domeniul turațiilor mici în cazul schemei cu variator turația scade foarte puțin la creșterea curentului confirmându-se astfel și experimental concluziile teoretice formulate în paragraful 4.1. Acesta este un important avantaj pentru pornirea vehiculului atît sub aspectul asigurării unui cuplu corespunzător cît și privind evitarea șecurilor în timpul pornirii.

Măsurătorile pe care le-am efectuat asupra echipamentului montat pe vehicul au evidențiat următoarele :

1. În cazul schemei cu variator de tensiune continuă se realizează o creștere a valorii medii a accelerației la pornire (pînă la vîiteza de 10 km/h) cu aproape 15 % față de accelerația obținută la pornirea cu reostat (fig.61), cu toate că în procesul pornirii cu reostat valorile momentane ale accelerației sînt mai mari, ele cunștînd și una din cauzele care provoacă șecuri la pornire.

Măsurătorile pe care le-am efectuat pînă la atingerea vitezei de regim (40 km/h) pe un traseu drept și ne-circulat asupra unui tramvai tip Timis-1 echipat cu variator de tensiune continuă și asupra altui tramvai Timis-1 echipat cu reostat de pornire încărcate cu sarcină nominală, au condus la datele prezentate în tabelul nr.7. (vezi tabelul nr.7 în anexă).

2. Capacitatea de demaraj îmbunătățită se menține pînă la viteza de cca. 15 Km/oră.

3. ~~XXXX~~ La viteze mai mari de 20 Km/oră caracteristicile devin aproape paralele și ca urmare accelerațiile medii au valori apropiate fiind mai mari la schema cu reostat datorită faptului că la aceeași tensiune α linie de contact tensiunea la bornele motorului este mai mare în această situație.

4. Curentul absorbit din rețea în primul moment al pornirii reprezintă numai 4,5 % din curentul de pornire măsurat în cazul schemei cu reostat de pornire.

..//..

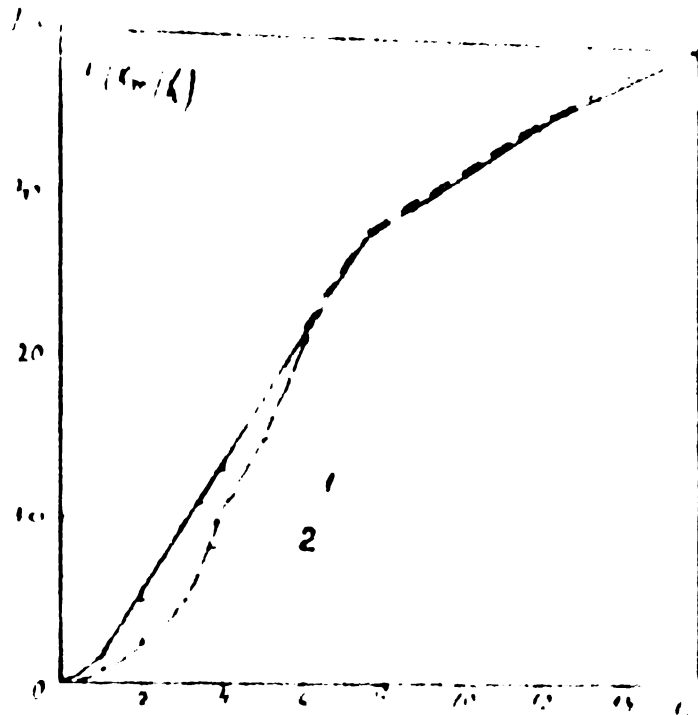


Fig.61 - Variația vitezei în funcție de timp la demeraj.
1 - la schema cu variator
2 - la schema cu rezistențe de pornire

8.3. Perturbații provocate de funcționarea schemei cu variator de tensiune continuă

Experimentările pe care le-am făcut în laborator și asupra echipamentului instalat pe tramvai au confirmat considerațiile teoretice prezentate în paragraful 3.5. privind influența pe care schema cu variator de tensiune continuă o are asupra circuitelor de telecomunicații și telecomandă și asupra instalațiilor electrice de pe vehicul echipat cu astfel de schema.

Tensiunile de înaltă frecvență ce se induc în circuitele menționate mai sus datorită valorilor $\frac{di}{dt}$ mari (de ordinul zecilor și chiar sutelor de amperi pe microsecunde) se manifestă prin următoarele efecte nedorite ce se înregistrează în funcționarea variatorului :

- suprațensiuni importante și valori $\frac{di}{dt}$ ridicate care pot duce la distrugerea ventilelor semiconductoră;
- comenzi false pentru aprinderea tiristorelor;
- înfrunțirea funcționării unor elemente ale schemei de acționare și de comandă ca urmare a modificării stării

normele a tranzistoarelor, inductanțelor, amplificatoarelor magnetice etc;

- comenzi false în circuitele serviciilor auxiliare de pe vehicul care au condus la apariția de semnalizări false.

Măsurătorile efectuate de către colectivul de specialitate de la ICPE privind perturbațiile radioelectrice provocate de funcționarea variatorului au evidențiat faptul că acestea influențează aparatele de radio și televiziune alimentate rețeaua de curent alternativ, cât și de la baterie. Dacă nu se iau măsuri speciale aceste perturbații sînt deosebit de puternice făcînd chiar imposibilă recepționarea programelor de radio și televiziune.

Pentru diminuarea efectului perturbator al echipamentului cu variator principala măsura pe care am avut-o în vedere încă de la conceperea schemei prezentate în cap.6 a fost realizarea acesteia să funcționeze cu frecvența de lucru constantă.

Am ales de asemenea frecvența filtrului de rețea în conformitate cu precizările din [17] și am determinat valorile elementelor acestui filtru (L_e, C_e), care realizează valori acceptabile pentru suprațensiunile la bornele variatorului și ale ondularii curentului prin linia de contact.

Tensiunea maximă măsurată la bornele variatorului a fost de 985 V în cazul comenzii decalate a variatoarelor și de 1070 V în cazul comenzii simultane.

Valoarea de vîrf a curentului de linie în prima situație a fost 265 A iar în a doua situație 370 A, la o valoare medie a curentului de sarcină de 225 A.

Pentru reducerea perturbațiilor s-au luat de asemenea măsuri constructive și anume :

- montarea pe trasee separate a circuitelor de forță față de cele de comandă și ale serviciilor auxiliare;

- ecranarea cablurilor de legătură între filtru de rețea și variator;

- separarea galvanică a surselor de alimentare pentru schema de comandă față de cele destinate altor servicii;

- intercalarea de circuite RC pe elementele care în funcționare generează perturbații radioelectrice ;
- montarea diodelor de circulație care scurtcircuitază tensiunile parazite determinate de intreruperile rapide ale curentului prin circuitele schemei de forță și ale celei de comandă:

În afara perturbațiilor de natură electromagnetică schema cu variator de tensiune continuă produce și o poluare fonică destul de supărătoare. Principalele surse de zgomot sînt inductanțele circuitului și mai ales inductanța circuitului de stingere.

Măsurătorile efectuate din acest punct de vedere au evidențiat faptul că zgomotul produs de aceste echipamente are frecvențe cuprinse între 100 și 400 Hz [94]

Soluțiile utilizate pînă în prezent nu au condus la o rezolvare corespunzătoare a acestei probleme.

8.4. 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 decît 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 schema cu reostat. Diferența se mărește substanțial în perioadele de vîrf cînd traseele sînt aglomerate și se circulă cu viteză redusă.

Cu ajutorul schemei din fig.54 am determinat energia recuperată în regim de frînare în condițiile cînd această energie poate fi consumată integral de alte receptoare. Ea reprezintă 16,2 % din consumul orar util de energie electrică.

..//..

Cap.9. CONCLUZII

9.1. Dezvoltarea electronicii de putere a determinat preocupari 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 (Chopper) care prezintă avantajul că folosesc echipamentul de bază existent (linia de contact de curent continuu și motorul de c.c. cu excitația serie) asigurând performanțe funcționale cu caracteristici tehnice și economice superioare.

9.2. Am prezentat tipurile mai semnificative de variatoare de tensiune continuă și particularitățile folosirii acestora în cazul acționării motorului de curent continuu cu excitație serie în schemele de pornire, modificarea turației și frânare electrică, evidențiind avantajele și dezavantajele fiecărui sistem descris.

9.3. În contextul particularităților funcționării schemelor cu variator de tensiune continuă am analizat ansamblul variator, linie de contact, motor evidențiind necesitatea prezentei filtrului de rețea și modul de alegere corectă a frecvenței de lucru a variatorului și a frecvenței filtrului pentru reducerea efectelor negative ale acestora asupra motorului, a liniei de contact și a instalațiile de telecomunicații.

9.4. Am analizat o schema cu variator de tensiune continuă pentru acționarea electrică a tramvaiului la noi în țara care realizează pornirea și modificarea vitezei tramvaiului prin variația continuă a tensiunii de alimentare a motoarelor de tracțiune, frânarea electrică mișta comandată în mod automat în funcție de tensiunea liniei de contact motoarele funcționând în regim de generator cu excitație serie. Stabilitatea funcționării în regim de frânare este asigurată prin încrucișarea înfașurărilor de excitație

..//..

și preexcitarea generatoarelor de la bateria de acumulare a tramvaiului. Pe baza rezultatelor obținute pe stand și a datelor din exploatarea tramvaiului Timis 1 echipat cu variatoare de tensiune continuă am stabilit performanțele variatorului, comportarea motorului de tracțiune în diferite regimuri de funcționare și influența curenților de pornire asupra liniei de contact.

9.5. Am analizat implicațiile tehnico-economice ale folosirii variatorului de tensiune continuă în acționarea electrică a tramvaiului evidențiind avantajele tehnice, avantajele economice și dezavantajele acestui sistem de tracțiune.

9.6. Am participat efectiv la încercările efectuate pentru omologarea echipamentului cu variator de tensiune continuă pentru acționarea troleibuzului și a tramvaiului realizat de un colectiv de cercetare din ICPE. Din aceste măsurători au rezultat avantajele schemei cu variator : economii de energie electrică de 35 %, accelerații la pornire mai mari ($0,7 \text{ m/s}$ față de $0,3 \text{ m/s}^2$) și fără șecuri, curentul iust de la linia de contact în primul moment al pornirii mult mai mic (10 A , față de 22 A)

Echipamentul cu tiristoare funcționează corect într-o gamă largă de temperaturi ale mediului ambiant (-35°C - $+65^{\circ}\text{C}$) și nu este influențat de vibrații și zdruncinături cu accelerații până la 3 g.

Nu se poate emite pretenția că problemele levate 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 de abia la început dar suficient de promițătoare pentru a reclama intensificarea preocupărilor stît 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 gabariturii subansamblilor.

În încheiere, autorul aduce calde mulțumiri tovarășului Prof.Dr.ing.E. Seracin pentru îndrumarea permanentă și sprijinul acordat în buna desfășurare a programului de pregătire și la realizarea lucrării ca și conducerii I.C.P.E . care a creat condiții deosebite pentru cercetări și experimentări.

Mulțumesc totodată colectivului de cercetare din ICPE condus de tov. ing. I. Strainescu și conducerii Întreprinderii de transporturi și construcții de vagoane de tramvai Timișoara pentru sprijinul acordat în efectuarea experimentărilor pe stand și pe tramvai în exploatare.

PERFORMANTELE

varistorului de tensiune continuă determinate pe baza încercărilor în laborator.

Tensiunea la bornele de ieșire ale variatorului

- maxima 0,96 Uc
- minima 0,03 Uc

Tensiunea de alimentare la care se produce blocarea semnalelor de aprindere a tiristoarelor principale

- maximă 900 V
- minima 500 V

Curentul maxim de sarcină admis de variator

400 A

Supratensiunea maximă la bornele de intrare ale varistorului datorită funcționării acestuia.

1070 Vev

Supratemperatură maximă a elementelor componente în regim de funcționare de durată la sarcină nominală^{x)}

- tiristeare 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

Măsurătorile s-au făcut la o temperatură ambientală de 25°C.

DATE COMPARATIVE

privind comportarea motorului de curent continuu tip TN 73 alimentat prin variator de tensiune continuă și prin conectarea directă la sursa de tensiune, continuă.

<u>Marimea urmărită</u>	<u>Valori comparative</u>
Puterea utilă	0,98
Caplu motor	1,02
Turația	0,965
Randamentul	0,985
Supratemperatura înfășurării rotorice	1,15
" " de excitație	1,2
" " polilor auxiliari	1,23
" " de comutație	1,106

N o t e

Cifrele reprezintă raportul între valorile obținute în cazul schemei cu variator de tensiune continuă și în cazul alimentării directe, la tensiune și sarcină nominală.

TABELUL - 1

Numarul determinarii	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tensiunea de blocaje (V)	492	495	497	495	497	498	497	495	495	496
	495	498	499	498	500	500	499	497	496	499
	497	501	502	501	502	502	501	500	498	501
Tensiunea de deblocare (V)	501	497	500	498	499	501	499	498	497	498
	503	500	502	501	502	502	501	499	498	501
	504	501	503	502	503	504	504	501	500	502

(46)

TABELUL 2

$I_m(A)$	150	200	250	300	Obs
$(\frac{\Delta I_m}{I_m})(\%)$	40	37	35,5	34	grad de excitație 80%
	32	29	26	23,5	grad de excitație 100%

TABELUL nr.3

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
$\frac{\Delta n}{n_2} = \frac{n_1 - n_2}{n_2}$ (%)		8,45	6,25	5,17	3,54	3,38	3,66	3,06

n₁ - se referă la alimentarea directă

n₂ - se referă la alimentarea prin varistor

TABELUL Nr.4

Locul de masurare	Valori obtinute(°C)	
	la alimentare prin variator	la alimentare directa
Infașurarea indusului	97,5	91
Infașurarea de excitație	103	95
Infașurarea polilor auxiliari	95	78
Infașurarea de compensație	97	83

TABELUL Nr. 6

Marimea determinata	Valoarea obtinuta	
	La alimentarea prin variator	La alimenta- rea direct.
Curentul (A)	178	178
Puterea utila (W)	118.000	120.000
Randamentul (%)	90	91,12
Turatia (rot/min)	1410	1460
Cuplu (kgfm)	81,5	80
Pierderile in Cu(W)	6871	6825
P_{net} (W)	2945	2480

TABELUL Nr. 7

Intervalul de timp (s)	Accele:agiile medii masu- rate m/s^2	
	la schema cu varietar	la schema cu reostat
0-2	0,7	0,35
2-4	1,16	1,02
4-6	1,11	1,53
6-8	1,04	1,14
8-10	0,35	0,42
10-12	0,565	0,635
12-14	0,45	0,52
14-16	0,22	0,29

B I B L I O G R A F I E

1. x x x - Anwendungsmöglichkeiten von Frequenz-thyristoren aus der UdSSR. Mitteilung der Zentralen Leitstelle für Applikation Im Elektronikhandel Berlin.
In : Elektrik, RDG, 25 nr.6 iunie 1971 p. 159.
2. Andruşciuk, V.v. - Analiz elektromagnitnih proteşov tiristornih Sirotne impulsnih preobrozovatelei.
In: Elektrotehniko, URSS, nr.2, febr.1973 p.36-39.
3. Bihoi, Gh. - Contribuţii la îmbunătăţirea performanţelor locomotivelor Diesel-electrice prin slabirea continua a cîmpului de motoarelor electrice de tracţiune cu excitaţie serie, cu referire la locomotive Diesel electrică CFR o6o-DA şi o6o-DA-1.
Teză de doctorat . Timişoara 1974.
4. Bossi, J.H. Löcker, H.Winkler, K - Couplage de convertisseurs de traction sous catenaire 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 telecommunications et de signalisation.
In: Bulletin de l'ASE nr.1 1971, p.66-75.
6. Boileau, R. - L'électricité dans les transports.
L'Electricité et les transports sur rail. Le freinage électrique des engins de traction.
In: Revue Générale de l'Electricité, France Tomul 52, nr.5, mai 1973 p.345-351.
7. Buyse, H, Woitrin, D.
Accélération et freinage progressifs des véhicules électriques.
In: Revue Générale de l'Electricité, France Tomul 52, mai 1973 p. 360 - 365.

...//...

8. Bochi, G. - Actionarea reversibila a motoarelor de c.c. cu tiristoare.
In: *Elettrificazioni*, Italia, nr.5 mai 1971 p.257-260.
9. Berlioux, 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 Tehnica, Bucuresti 1974.
11. Bogoevici, N, Brașovan, M, Seracin E.
Acționari electrice. Probleme și aplicații industriale.
Ed. Tehnica Bucuresti 1963.
12. Brașovan, M, Seracin, E.
Metode noi de proiectare a acționărilor electrice.
Ed. Academiei RSR Buc. 1968.
13. Beechler, U. - Répercussions causées par des véhicules moteurs alimentés par thyristors.
In: *Bulletion 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 engines de traction équipés de hacheurs.
In: *Revue Generale de l'Electricité*, France, nr.4, mai 1973 p.249 - 253.
15. Cassie, A - Les applications des thyristors en traction électrique.
In: *Revue Générale de l'Electricité*, France nr.6 iunie 1971 p. 509-519.

...//..

16. Chauprade, R - Les thyristors dans les systemes de conversion d'énergie.
In: Revue Generale de l'Electricité, France nr.6 iunie 1971 p. 481-496.
17. Cochat, Marcel. - Le Vehicule électrique urbain.
In: Revue Francaise de l'Electricité nr.237, 1972 p. 29-31.
18. Cantemir, Lorin ; Oprisor, Mircea.
Tracțiune electrica. Editura didactica și pedagogica Bucuresti 1971.
19. x x x - CEI Publicația 77-1968.
Regles applicables à l'appareillage électrique de traction.
20. x x x - CEI Publicația 164 - 1964.
Recommandations dans le domaine des grandeurs et unites utilisées en électricité.
21. x x x - CEI Publicația 165 - 1973 - Règles pour les essais des véhicules moteurs de traction après achèvement et avant mise en service.
22. x x x - CEI Publicația 349 - 1971 - Règles applicables aux machines électriques tournantes des véhicules ferroviaires et routiers.
23. Dierkens, F - Propositions sur des véhicules électriques.
In: Electricite , Belgis, nr.147, 1971 p.37-40.
24. Dubois, R.
Les thyristors, organes de commutation.
Commutation à la fermeture.
In: Revue Générale de l'Electricité , France, Tomul 79 nr.11, dec. 1970 p. 902-906.

25. Demidov, L.S - Repartiya curenului între tiristoarele conectate în paralel.
In: Elektrotehnika, URSS, nr.6, iunie 1973 p.8-11.
26. Daškevici, B.A.
Povisenie effektivnosti ispolzovania elektriceskoi energii V elektrotansporte.
In :Elektricesstvo, URSS, nr.9, sept. 1972 p.15-19.
27. Döttor, 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'equipment 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 Linearmotoren im Transportwesen.
In: Elektrie, RDG 25, nr.6, iunie 1971, p.211-212.
30. x x x - Elektrofahrzeuge in der BRD.
In Elektrie, RDG 27, nr.5, mai 1973 p. 231-232.
31. x x x - Entwicklung von Elektromobilen.
In - Elektrie, 27 nr.11, nov. 1973 p.570.
32. Efremov, I.S., Mosiagin, G.K. - Rozenfeld, E.U.
O vibore optimalnogo napriajenia dlia linii skorostnogo tramvais.
In: Elektricesstvo URSS nr.10, oct.1972 p.73-78 .
33. Rirst, Antonin - Primenenie impulsnogo preobrazovatelja postoiannogo toka V tramvaisih tips I i KT.
3-ia mejdunarodnsie naučno, tehničeskie konferenčije ob elektronnih avtomatizirovannih privodah.
CSSR, Praga, oct. 1971.
34. Feller, F - Fortschritte bei der Festsenergie von Gleichstromferromotoren.
In: Elektrie, RDG, 25 nr.6, iunie 1971, p.223-225

35. Gouthiere, J, Gregoire, J, Hologne, H.
Les magneurs a thyristors en traction electrique
In: ACEC Revue nr. 2 - 1970.
36. Gaudichon, M- L'électricité dans les transports
sur rail. Emploi des thyristors en traction Electrique.
In: Revue Generale de l'Electricité, France, Tomul
82, nr.5, mai 1973 p 335-344.
37. Geiger, D.E.
Daty 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 preobrazovatel'i
v elektricheskikh postoiennogo toka.
Ed. Energiya, Leningradskor Otdelenie 1973.
39. Germanier, R și Hintze, H - Determination du circuit
de puissance des vehicules moteurs à thyristors ali-
mentés en courant alternatif.
In: Bulletin ASE nr.1, 1971, p.46-54.
40. Hennebert, C.
Essais et mesures de perturbations dues à une matrice
à hacheur de courant.
In: Revue, Générale de l'Electricité, France nr.4
avrilie 1973, p.254-258.
41. Hvostov, S.V, Gavrilov, J.IA - Vagon metropolitena
s impulsnim regulirovaniem skorosté pri puske i
termojenii.
In: Elektricestvo, URSS nr.9, sept. 1972 p.19-25.
42. Ječný, F - Thyristorové řízení pohonu - cesta k
racionalizaci spotřeby energie.
(Reglarea tiristorica a acționariilor - calea ratiōna-
lizării consumului de energie).
In: Elektrotehnika, RSCS, nr.11, 1973 p.318-321.

43. Jacques, L - Les vehicules électriques. Aperçu des réalisations actuelles.
In: Bulletin - SRBE, Belgis, an 89, ne.2, 1973 p.103-109.
44. Ječný Frantisek - Tyristorové řízení pohonných agregátů - racionální využití energie v tramvajové městské dopravě.
In: Elektrotechnik RSCS nr.5, mai 1973 p.120-129.
45. Kəpustien, D.I.
K. vıboru shemı tiristorovogo preobrazovatelya elektrovozov peremennogo toka s recuperativnim tormozheniem.
In: Elektrotehnika, URSS, nr.6, 1973, p.5-9.
46. Kostka Vlastimil - Concepția și reglarea acționării vehiculelor electrice.
In: Elektrotechnik, 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 preobrazovately i nekotorie voprosi teorii venteluh shen.
In: Elektricesstvo, URSS nr9, sept.1972 p.30-36.
49. Klein, Denys - Les moteurs linéaires nouvelle Jeunesse des transports collectifs.
In: Revue Francaise de l'Electricité nr.239, 1972 p.58-72.
50. Kolley, E.W, Foley P.E. - Semi-conducteurs de puissance pour engins moteurs à redresseurs de la Penn Central Transportation Co.
In: Bulletin ASE nr.1, 1971, p.35-43.

51. Kulikovskii A.A. - Spřevocinik po radio elektronike Tom 3 Izdatelstve Energis, Moscovs 1970.
52. Kosicka, M - Calculul caracteristicilor mecanice ale sistemelor tiristorizate de acționare electrice.
In: Prace Instytutu Elektrotechniki RPB vol.23, nr. 88 p.109.
53. Leroy, J, Guibereau, S - Le hacheur de courant Kōsar en traction,
Realisations et perspectives d'avenir pour le metropolitain. In : Revue Generale de l'Electricite, France Tomul 82, nr.4, aprilie 1973, p. 243-248.
54. Iodocinikov, A,L. Orlov, G.E. - K rascetu impulsnei sistemŭ regulirōvanŭia elektriceskih mašin s ne ravno vŭrešennŭm moduliatorom sirinŭ impulsov.
In: Elektricesstvo nr.8, august 1972 p.65-69.
55. Leitenberger, W - Repercussion des automatrices commandées par thyristors sur le service des installations de signalisation et de telecommunications des voies varroviaires.
In: Bulletin ASE nr.1, 1971 p.80-81.
56. Lowe, T - Controlul variatoarelor cu tiristoare și introducerea curentului armonic în circuitele de cale.
In: Proceedings of IEE, Anglia 1974 vol.121, nr.4 p.269.
57. Meyer, Monfred - Uber die Kommutierung mit Kapazitiven Energiespeicher.
In: E.T.Z. , RFG nr.2, febr. 1974, p. 79-85.
58. Mraz, František - Le systēme de reglaje per impulsions s thyristors, du tralleybus Skoda.
3-ia mejdunarodnsia naučno - tehničeskais konferenčias ob elektronsih avtomatizirovanŭih privodeh.
CSSR, Prags 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, Manfred - Tiristoarele în practica. Mutatoare cu comutație forțată.
Editura Tehnica București - 1970.
61. Möltgen, Gottfried - Tiristoarele în practica. Mutatoarele cu comutație de la rețea.
Ed. Tehnica, București 1960.
62. x x x - Memoratorul inginerului electrician.
Ed. Tehnica, București, 1974.
63. Miklosi, Corneli și Sora, Constantion
Treciunea electrica.
Ed. de STAT didactica și pedagogica București 1961.
64. Meyer, E. - Qu attendent les chemins de fer de l'utilisation des thyristors sur leurs Engins-moteurs
In: Bulletin de l'Association Suisse des Electrotechniciens nr.1, 1971, p.1-5.
65. Moser, R - Le moteur de traction alimenté par redresseur contrôlé ou par hacheur.
In: Bulletin ASE nr.1, 1971 p.19-28.
66. Miron D - Schema cu varistor de tensiune continue pentru acționarea electrica a tramvaiului.
Dosar OSIM nr. 81684/18.III.1975.
67. Miron D - Cu privire la unele aspecte tehnico-economice ale utilizării schemelor cu tiristoare în acționarea electrica a mijloacelor de transport în comun urbane
In: Electrotehnica, Electronica și Automatica nr.1 ian. 1976.
68. Miron D. - Contribuție privind studiul frinării elec-

trice a motoarelor de curent continuu cu excitație serie utilizate la acționarea vehiculelor destinate transportului în comun urban în cazul alimentării acestora prin variație de tensiune continuă.
Comunicarea susținută la cea de a XII-a sesiune de comunicări științifice a ICPE, Buc. 1976.

69. Miron D.

Cu privire la modificarea turăției motorului de curent continuu cu excitație serie utilizat la acționarea electrică a vehiculelor prin slabirea timpului folosind scheme cu variator de tensiune continuu.
Comunicare susținută la cea de a XII-a Sesiune de comunicări Științifice a ICPE, Buc. 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 - Frecvențe optime la reglarea motoarelor serie de curent continuu prin lațimi 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 Institutului Politehnic Iași fasci-
coalele 3-4 1972 secția III, p -157-164.
76. Opreșor , M și colectiv - Caracteristicile de reglaj
pentru o schema îmbunătățită de comanda a mașinii
serie de curent continuu.
In" Electrotehnica 21(1976) nr.7 ,p.259-263.
77. Pleșkalov, V,D, Rogocev, A,I - Comanda optima după
pierderile de energie a unei acționari electrice pe
principiul redresor comandat - motor.
In: Elektromehnika, 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 Thyristoren
und Schutzmethoden.
In: Elektrik, RDG nr.6, iunie 1971 p.266-267.
80. Peter, M.J.
L'evoluton des équipements électriques et électroniques
sous l'influence des thyristors.
In: Revue Generale de l'Electricite, Tomul 79, nr.11
dec. 1970, p.914-921.
81. Pezzani, R - Limites d'utilisation des thyristors,
triacs et redresseurs de puissance en regime d'impulsio. s.
In: L'electricien industriel, France, nr.2167, dec.1974
p. 369-372.
82. Reiche, W - La commande des convertisseurs a courant
In: ETZ- A, RDG, vol.95, nr.91 1974 p. 446-449.

83. Soledaho, IA
O vilieni ventilnoge elektroprivada na pitsiusciuiu set.
In: Elektrotehnika, URSS, nr. 10, 1974 p 35-38.
84. Scholtis, G - Comezi tiristorizate pentru acționari feroviare în c.c.
In: Modern Railways, Anglia, vol.28 nr.277 oct.1971 p.152-173.
85. Strellem - Dowues, J.M. - Controlling speed with thyristor circuits.
In: Electrical Review, Anglia, nr.19 aprilie 1974 p. 402-405.
86. Savescu M și a - Circuite electronice vol.III Ed. Tehnica, Bucuresti 1974.
87. x x x - Simpoziu über die Anwendug 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 urban. Condiții generale.
89. x x x - STAS 1893-72 Mașini electrice rotative. Condiții tehnice generale de calitate.
90. x x x - STAS 7814-73 - Mașini electrice de curent continuu. Metode de încercare.
91. x x x - Secowest, Italia
Thyristors phase control applications switching applications 1974.
92. Strainescu Ion - Variator de curent continuu cu tiristoare. Dosar OSIM nr. 16.536/1974.

93. Strainescu, Ion & Dan, Ion
Sistem și echipament pentru acționarea vehiculelor echipate cu două sau mai multe motoare de curent continuu cu excitație serie.
Breve t de invenție nr. 79832.
94. Strainescu Ion - Contribuții la schemele automate optime de acționare curent continuu - curent continuu în tracțiunea electrică cu aplicație în tracțiune urbană în R.S. România.
Teza de doctorat, București 1974.
95. x x x - Trehgsznî tiristornîi regulstor postoiennogo toka.
In: Biuleten tehniko - ikonomiceskoi informații, URSS, nr.9, 1974 p.37.
96. Thierolf, H - Drehzahlgeregelte Gleichstromentriebe
In: EMA, RFG, Vol.53 nr.10, 1974, p.284-288.
97. Timmel, H; Kabus, H.K.
Bemerkungen Zür Zweipunktgeschwindigkeitsregelung von Linearmotorantrieben.
In: Elektrik, RDG nr.9, sept.1974 p.484-488.
98. Tunsoiu Gheorghe - Acționari și automatizari electrice
Ed. Didactica și Pedagogica, București 1968.
99. Venemaus, W.D - Traction en courant continu à Thyristors. Problemes et experiences de N.S.
In: Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens nr.1-1971 p.29-34.
100. Vondrašek, František - Impulsnie preobrazovateli a tociki zreněa cacestve commutirajušcego kontura.
3-a Mejdunarodnial naučniĝe - tehniĝeskaia konferenĝia po electriceskim automatizirovannim privodam.
Praga, oct. 1971.

101. x x x - Les Vehicules electriques en Japon.
In" $\frac{1}{2}$ 'Electricité automobile et techniques
specialisées nr.419, oct. 1974, p.37.
102. x x x - La variation de vitesse des moteurs a
courant alternatif de moyennes et grandes
puissances par variateurs statiques de fréquence.
In: ACEC Revue nr.12, 1974.
103. Wagner, Rudolf - Thyristertechnik für Gleichstrombahnen
In: Siemens Zeitschrift nr.10, oct.1974, p.780-784.
104. Walter, K; Wolf, G-U-Böhm- Zug mit Gleichstrom
stellern - Steuerung.
In: Elektrik, RDG 26, nr.9, sept. 1972 p.219.
105. Zwicky, R- Bases théoriques de l'influencement de
circuits à ~~courant~~^{current} 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, January 1963
107. Proceedings.
eighth national symposium on reliability quality
control.
San Francisco, January 1962.
108. Efremov U.C,
Metodica raspeta tormoznogo reostata v impulsnoi
sisteme slediascego elektriceskogo tormojenia.
In: Elektricesstvo nr.8, aug.1976 p.46-50.