

MINISTERUL EDUCATIEI SI INVATAMINTULUI
INSTITUTUL POLITEHNIC "TRAIAN VUIA" TIMISOARA
FACULTATEA ELECTROTEHNICA

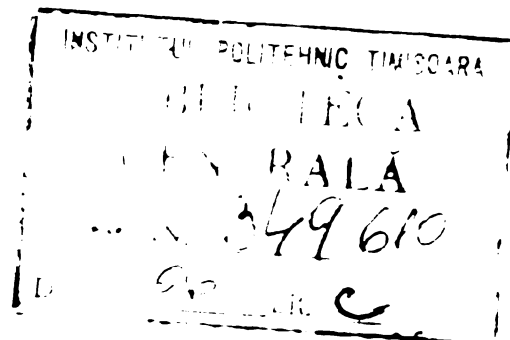
ING. MIRCEA GUDUMAC

CONTRIBUTII CU PRIVIRE LA STABILIREA PERFORMANTELOR
MASINILOR ELECTRICE DE ACTIONARE FOLOSITE IN INSTA-
LATIILE DE RIDICAT SI TRANSPORTAT.

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

TEZA DE DOCTORAT
CONDUCATOR STIINTIFIC,
PROF.DR.ING.EUGEN SERACIN

- 1 9 7 7 -



CONTRIBUTII CU PRIVIRE LA STABILIREA PERFORMANTELOR
MASINILOR ELECTRICE DE ACTIONARE FOLOSITE IN INSTA-
LATIILE DE RIDICAT SI TRANSPORTAT

R E Z U M A T U L
TEZEI DE DOCTORAT

Teza de doctorat cuprinde studiul teoretic și experimental al unei metode și instalații care permite stabilirea datelor tehnice a mașinilor electrice destinate acționării instalațiilor de ridicat și transportat, în condiții cât mai apropiate de cele reale din exploatare. Teza este structurată în 8 capitole. După o introducere prealabilă (cap.1), în capitolul 2 sînt prezentate aspectele specifice, iar în capitolul 3 un studiu comparativ a principalelor metode cunoscute pe plan mondial referitoare la mașinile electrice destinate acționării instalațiilor de ridicat și transportat. În capitolul 4 este prezentată o metodă și instalație originală propusă de autor. Capitolul 5 este dedicat studiului regimului dinamic de funcționare a sistemului folosit în cadrul instalației realizate, efectuîndu-se totodată unele considerații originale cu privire la efectele datorate saturației circuitului magnetic, curenților turbionari etc. În capitolul 6, se face analiza stabilității sistemului pe un calculator numeric, în baza modelului matematic al instalației respective.

În capitolul 7 sînt prezentate rezultatele experimentale care confirmă considerațiile teoretice făcute.

În capitolul 8 sînt date concluziile finale cu privire la lucrarea elaborată, în care sînt evidențiate în principal aspectele originale ale acesteia.

CONTRIBUTION CONCERNANT L'ETABLISSEMENT DES PERFOR-
MANCES DES MACHINES ÉLECTRIQUES DE COMANDE UTILISÉES
DANS LES INSTALLATIONS DE LEVAGE ET DE TRANSPORT.

R É S U M É
DE LA THÈSE DE DOCTORAT

En principal, la thèse de doctorat consiste dans d'étude théorique et expérimentale d'une méthode et d'une installation qui permet l'établissement des dates techniques des machines électriques destinées à commande électrique des installations de levage et de transport, dans des conditions aussi rapprochées que possible de celles réelles dans l'exploitation. La thèse comprend 8 chapitres. Après une introduction préalable, dans le deuxième chapitre on présente les aspects spécifiques et dans le troisième une étude comparative des principales méthodes connues sur le plan mondial concernant les machines électriques pour la commande électrique des installations de levage et de transport. Dans la 4^e à chapitre on présente une méthode et une installation originale proposée par l'auteur. Le 5^e à chapitre est dédié à l'étude du régime dynamique de fonctionnement du système utilisé dans le cadre de l'installation réalisée, en introduisant en même temps certaines considérations originales concernant des effets dûs à la saturation du circuit magnétique, au courants tourbillonnaires etc. Dans le 6^e à chapitre on fait l'analyse de la stabilité du système sur un calculateur numérique, sur la base du modèle mathématique de l'installation respective.

Dans le 7^e à chapitre on présente les résultats expérimentaux qui confirment les considérations théoriques.

Dans le 8^e à chapitre on donne les conclusions finales concernant l'ouvrage élaboré, en mettant en évidence surtout ses aspects originaux.

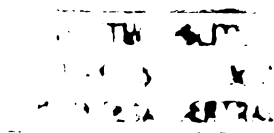
CONTRIBUTIONS REGARDING THE PERFORMANCES DETERMINATION
OF THE DRIVING ELECTRICAL MACHINES, USED IN HOISTING
AND TRANSPORT UNITS

A B S T R A C T
OF THE DISSERTATION

The dissertation consists mainly in the theoretical and experimental study of a method and installation which allows the technical data determination of the electrical machines used in the hoisting and transportation units driving, in operating conditions as close as possible to the real ones. The dissertation has 8 chapters. After a previous introduction, in chapter 2 there are presented the specific aspects, while in chapter 3 a comparative study is made, of the main methods known at an international level, concerning the electrical machines used for the hoisting and transportation units driving. In chapter 4 there is presented an original method and installation proposed by the author. Chapter 5 refers to the system dynamic functioning used within the achieved installation, introducing at the same time several original considerations concerning the effects due to the magnetic circuit saturation, the eddy currents a.s.o. Chapter 6 makes the analysis of the system stability on a digital computer, on the basis of the respective unit mathematical model.

In chapter 7 the experimental results are presented which confirm the theoretical considerations.

In chapter 8 there are given the final conclusions regarding the work, pointing out mainly its original aspects.



BEITRAG ZUR FESTLEGUNG DER HÖCHSTLEISTUNGEN
ELEKTRISCHER ANTRIEBSMASCHINEN FÜR HEBE-UND
FORDERANLAGEN

Z U S A M M E N F A S S U N G
DER DISSERTATION

Die Dissertation besteht hauptsächlich aus der theoretischen und experimentellen Untersuchung einer Methode und einer Anlage die die Festlegung der technischen Kenndaten der für den Antrieb der Hebe- und Förderanlagen bestimmten elektrischen Maschinen, unter Bedingungen die dem reellen Betrieb am nächsten stehen, erlaubt. Die Dissertation enthält 8 Kapitel. Nach einer vorangehenden Einleitung sind im 2. Kapitel die spezifischen Aspekte und im 3. Kapitel eine vergleichende Untersuchung der hauptsächlichsten auf Weltniveau bekannten Methoden bezüglich der elektrischen Maschinen für den Antrieb der Hebe- und Förderanlagen dargestellt. Im 4. Kapitel wird eine vom Verfasser vorgeschlagene originelle Methode und Anlage beschrieben. Das 5. Kapitel ist dem Studium des dynamischen Betriebs des in der verwirklichten Anlage angewandten Systems gewidmet, wobei gleichzeitig einige besondere Betrachtungen hinsichtlich der durch die Sättigung des Magnetkreiss und die wirbelströme bewirkten Effekte eingeführt werden. Im 6. Kapitel wird die Analyse der Stabilität des Systems aufgrund des mathematischen Modells der betreffenden Anlage auf einem Digitalrechner durchgeführt.

Im 7. Kapitel sind die experimentellen Ergebnisse, die die theoretischen Betrachtungen bestätigen, dargestellt. Kapitel 8 enthält die Schlussfolgerungen bezüglich der vorgelegten Arbeit, wobei hauptsächlich die originellen Aspekte hervorgehoben werden.

C A P I T O L U L I

I N T R O D U C E R E

În dezvoltarea impetuoasă a industriei noastre, se acordă un interes crescând utilajelor electromecanice, întâlnite în toate ramurile industriale, cunoscute și sub denumirea de utilaje de uz general.

În cadrul acestor utilaje un loc important îl ocupă instalațiile de ridicat și transportat (I-R.T.). Tendința modernă care se manifestă în acest domeniu, în folosirea aproape exclusivă a acționării electrice (A.E.), conduce în mod implicit la perfecționarea și mărirea productivității acestora.

Totodată mașina electrică (M.E.), joacă un rol însemnat în acționările electrice, determinând în mare măsură cheltuielile de investiție și exploatare. În consecință modernizarea acestor acționări are ca obiectiv nu numai îmbunătățirea echipamentelor de alimentare, comandă și reglare ci și a concepției în construcția mașinilor electrice de acționare respective.

Este cunoscut faptul că folosirea unor mașini electrice de putere necorespunzătoare se reflectă asupra funcționării normale a mecanismului acționat, conducând la avarii, scăderea productivității și chiar la scoaterea timpurie din funcțiune a instalațiilor respective. Pe de altă parte utilizarea mașinilor electrice de putere mai mare decât este necesar, atrage după sine înrăutățirea indicilor economici și energetici ai instalațiilor de ridicat și transportat. Acest fapt, are ca efect în final scumpirea acestora și importante pierderi de energie.

Deasemeni, mașinile electrice destinate acționării instalațiilor de ridicat și transportat, atât din punct de vedere constructiv cât și din punct de vedere al caracteristicilor tehnice și parametrilor energetici, trebuie să corespundă unor condiții tehnice și regimuri de funcționare specifice acționării unor asemenea instalații.

Funcționarea mașinii electrice de acționare în diferite servicii tip în conformitate cu normele și standardele în vigoare impune necesitatea de a determina principalii parametri pentru fiecare din serviciile tip pentru care a fost proiectată mașina electrică respectivă.

Totodată o problemă esențială de care depinde foarte mult determinarea cât mai corectă a puterii mașinii electrice de acționare (care funcționează de altfel în condiții de variație a valorii mărimilor electrice și mecanice cum și a succesiunii și duratei de menținere a lor), o reprezintă cunoașterea cât mai exactă a regimului termic al acesteia. Ori acest lucru nu se poate realiza decât luându-se în considerare toate condițiile reale de funcționare și exploatare, efectuând o serie de experimentări succesive pe platforma de încercări. Prin aceasta se poate obține o definitivare optimă a performanțelor acestor mașini, care după cum este cunoscut, funcționează de regulă în regim intermitent și la cuplu static rezistent constant atît în perioada de pornire cît și pe durata funcționării acestora. În consecință verificarea și definitivarea parametrilor proiectați și a duratei de viață în exploatare a unor asemenea mașini în laboratorul de încercări, constituie o problemă de actualitate fiind în atenția atît a institutelor de învățămînt și cercetare cît și a întreprinderilor constructoare de mașini electrice.

Din analiza lucrărilor existente în literatura de specialitate, a standardelor și prescripțiilor privind încercarea mașinilor electrice de largă circulație internațională, [14, 34, 35, 36, 68, 81, 129, 134, 173, 181, 202, 228, 229, 236, 252] , ca și a celor în vigoare în țara noastră, [53, 59, 130, 154, 158, 159, 163, 227] rezultă că asigurarea calității acestor tipuri de mașini este abordată incomplet. În unele cazuri tratarea acestei probleme se rezumă la o serie de recomandări constructive cu caracter general, rezolvîndu-se de obicei pe măsura experienței proiectanților de specialitate și în raport de materialele de care se dispune la un anumit moment.

Față de această situație, rezultă ca necesară conceperea unor metode și realizarea unor instalații de încercare adecvate care să permită satisfacerea în bune condițiuni a principalelor deziderate și anume:

- un cuplu static rezistent constant pe toată durata procesului tranzitoriu de pornire cât și pe durata încercării propriu-zise;

- un moment inerțial al sistemului acționat cum și un timp de pornire, corespunzător cu cel real;

- servicii de funcționare, frecvențe de conectare și durate relative de funcționare conform normelor în vigoare;

- obținerea unei simulări perfecte a condițiilor din exploatare;

- simplitate, fiabilitate și un înalt grad de precizie;

- posibilitatea de a obține o concordanță optimă între caracteristicile de încălzire și prescripțiile din norme în vederea determinării cât mai corecte a rezervelor de putere posibilă.

Pornind de la considerentele enumerate, prezentate detaliat în lucrare, autorul printr-o serie de lucrări de cercetare, comunicări și publicații elaborate [87, 94, 96, 99, 101, 102, 105, 106, 109, 113-116] sau în colaborare [39, 40, 86, 92, 93, 95, 97, 98, 119, 120, 214], a căutat să răspundă cerințelor impuse unei proiectări, realizări și funcționări în exploatare optime a mașinilor electrice destinate acționării instalațiilor de ridicat și transportat.

Prin problemele teoretice și experimentale cu caracter original pe care le conține, autorul apreciază că lucrarea de față constituie în continuare o contribuție atât la eforturile depuse pentru realizarea de astfel de mașini electrice, cu performanțe îmbunătățite cât și la obținerea de economii însemnate de materiale și de energie electrică. Rezultatele obținute sînt aplicate, în baza unor contracte, la Intreprinderea de Mașini Electrice București (în două variante) și la I.C.M. Reșița.

La definitivarea soluțiilor privind metodele de încercare adoptate s-au avut în vedere propunerile și observațiile unor serii de institute și întreprinderi din țara noastră care au preocupări în domeniu (I.P.B., I.P.T., I.P.C.M.T.R., INCERC, I.F.M.A., I.M.E.B., I.M.E.P. etc.).

Metodele de încercare și instalația corespunzătoare, expuse în lucrare sînt originale, făcînd obiectul a șase brevete de invenții [99, 104-107, 110].

.....

Conținutul lucrării este grupat în opt capitole, fiecare capitol cuprinzând scurte concluzii.

Astfel, în capitolul doi, în baza bibliografiei indicate se face o trecere în revistă a principalelor aspecte specifice din punct de vedere constructiv și funcțional a mașinilor electrice destinate acționării instalațiilor de ridicat și transportat caracterizate în general printr-o funcționare în regim intermitent, la diferite durate relative de funcționare, frecvențe de conectare și la un cuplu static constant. De asemenea, se fac unele considerații cu privire la problemele legate de alegerea și stabilirea datelor tehnice a mașinilor electrice folosite în cadrul instalațiilor de ridicat și transportat, punându-se în evidență interdependența care există între încălzire, durata relativă de funcționare, frecvența de conectare și momentul inerțial a mașinilor electrice respective. Se conchide că centrul de greutate pentru stabilirea datelor nominale ale mașinilor electrice destinate acționării instalațiilor de ridicat și transportat în diferite regimuri de funcționare, se deplasează spre determinările experimentale pe platformele de încercare.

În capitolul trei se face o clasificare a principalelor metode de încercare și o analiză critică a acelor metode care ar putea prezenta interes pentru realizarea obiectivului principal propus: asigurarea unui cuplu static constant atât în perioada de pornire cât și pe parcursul încercării propriu-zise;

În continuare se prezintă o schemă de încercare, propusă de autor, care prin combinarea unor mijloace cunoscute, folosind un sistem mașină de c.c. - redresor comandat cu amplificatoare magnetice și un dispozitiv complex de blocare și măsură a cuplului (alcătuit în principal dintr-o frână mecanică și un traductor de cuplu), asigură obținerea modelării regimurilor de funcționare a mașinilor electrice folosite în instalațiile de ridicat și transportat, în condiții acceptabile.

În capitolul patru, se definesc condițiile principale ce trebuie îndeplinite de o instalație de încercare pentru realizarea dezideratelor amintite mai sus. Totodată se prezintă schema bloc și se explică principiul de funcționare a unei instalații de încercare moderne proiectată și realizată la I.C.P.E.

București, după o concepție originală [99.] și aplicată la I.M.F. București. Totodată se fac o serie de considerații cu privire la particularitățile de funcționare ale instalației și la aspectele legate de funcționarea acesteia în regim recuperativ. Tot în acest capitol, se prezintă o serie de probleme teoretice cu privire la funcționarea unui sistem mașină de c.c. - mutator static comandat, făcându-se referiri cu privire la funcționarea acestuia în cazul instalației de încercare concepute.

În capitolul cinci, după introducerea premiselor de calcul se stabilesc ecuațiile funcționale pentru funcționarea în regim dinamic a sistemului mașină de c.c. - mutator static comandat din cadrul instalației, făcându-se o serie de considerații originale cu privire la influența saturației circuitului magnetic, fenomenului de reacție a indusului și a curenților turbionari în funcționarea sistemului și în speță asupra posibilității de reglare precisă a cuplului electromagnetic a mașinii de c.c. Se stabilește în continuare funcția de transfer a sistemului și ecuația caracteristică în vederea analizei comportării acestuia în regim dinamic, folosind criteriile de stabilitate clasice. Totodată se stabilesc ecuațiile care urmează a fi luate în considerare pentru a fi transpuse pe calculatorul numeric.

În capitolul șase este prezentată modelarea funcției de transfer a sistemului adoptat în cadrul instalației de încercare, pe calculatorul numeric, stabilindu-se totodată schema de modelare matematică a sistemului. În ceea ce privește definitivarea caracteristicilor optime ale regulatorului, s-a utilizat metoda locului rădăcinilor. În continuare sînt redată rezultatele obținute pe calculatorul numeric I.C.L, inclusiv curbele de răspuns ale sistemului modelat.

În capitolul șapte, se prezintă instalația (inclusiv subansamblele) și rezultatele experimentale referitoare atât la funcționarea acesteia cât și la diferite încercări efectuate pe diferite mașini electrice destinate acționării instalațiilor de ridicat și transportat de fabricație indigenă sau străină. În vederea ilustrării în mod comparativ a rezultatelor obținute, sînt date oscilogramele la funcționarea instalației în regim recuperativ, cu cele trei regimuri de funcționare distincte.

Cercetările experimentale confirmă rezultatele obținute atât pe cale analitică cât și prin simulare numerică și pun în evidență particularitățile de funcționare ale instalației de încercare inclusiv proprietatea esențială a acesteia de a funcționa la cuplu static constant și în regim recuperativ. Totodată se prezintă posibilitățile de extindere a aplicabilității instalației realizate (verificarea fiabilității mașinilor electrice, încercarea simultană a mașinilor electrice etc.).

În capitolul opt sînt prezentate concluziile cu caracter general, care decurg din lucrarea de față. Sînt evidențiate principalele aspecte considerate de autor drept originale cum și unele aprecieri cu privire la actualitatea și oportunitatea problemei tratate, obiectivul principal propus spre rezolvare fiind în fond determinarea unor metode și conceperea, respectiv realizarea unor instalații care să conducă în final la stabilirea performanțelor optime ale mașinilor electrice folosite în instalațiile de ridicat și transportat în condiții cât mai apropiate de regimurile reale de exploatare.

În concluzie, autorul apreciază că lucrarea răspunde unor necesități economice, obiective și actuale, fiind de actualitate practică imediată pentru toți cei care se ocupă cu studiul, proiectarea, realizarea și exploatarea unor asemenea mașini. Totodată lucrarea se înscrie în contextul valorificării din punct de vedere tehnic, energetic și economic a eforturilor susținute în prezent de toate întreprinderile constructoare pentru îmbunătățirea performanțelor produselor lor. Deasemeni, teza de față deschide perspectivele producerii la noi în țară a unor instalații de încercare moderne, pentru diferite tipuri de mașini electrice, oferind un larg câmp de investigații. Aceasta situează țara noastră pe un loc de frunte în acest domeniu, ținînd cont și de faptul că se obține o importantă reducere a efortului valutar.

Pentru coordonarea permanentă și sprijinul deosebit acordat în elaborarea tezei de doctorat, autorul adresează sincere mulțumiri și pe această cale conducătorului științific Prof.Dr. Ing. EUGEN SERACIN.

Totodată autorul aduce mulțumiri tuturor celor care l-au sprijinit direct sau indirect la elaborarea lucrării de față.

C A P I T O L U L II

ASPECTE SPECIFICE PRIVIND MASINILE ELECTRICE DE ACTIONARE A INSTALATIILOR DE RIDICAT SI TRANSPORTAT

2.1. Generalități.*)

După cum este cunoscut, într-o instalație industrială ca de exemplu în cazul I-R.T., un rol important îl joacă A.E. ce cuprinde grupul de M.E., inclusiv partea lor de comandă, adică în principal utilajele electrice plus organele de transmitere a cuplului la mașina de lucru. A.E. este preferată celorlalte moduri de acționare (manual, pneumatic, hidraulic sau mecanic) datorită avantajelor ce le prezintă și anume: fiabilitate, simplitate în transportul energiei, cheltuieli de investiție și întreținere reduse, reglare simplă și ușoară a vitezei, frânare eficientă și cu posibilitate de recuperare a energiei.

În general I-R.T., după particularitățile lor constructive se pot clasifica în următoarele categorii principale:

- a) instalații de ridicat propriu-zise (prevăzute cu un mecanism pentru prinderea și ridicarea sarcinilor individuale);
- b) instalații de transport continuu (destinate transporturilor continue ale sarcinilor în masă după un traseu strict determinat, cu mișcare principală pe orizontală);
- c) instalații de transport terestru și suspendate (destinate în principal pentru transportarea sarcinilor în masă sau a sarcinilor individuale după un traseu). [158,213]

Instalațiile de ridicat și transportat funcționează în marea majoritate a cazurilor în regimuri intermitente și variabile, fiind supuse la porniri și opriri dese, inversări ale sensului de mișcare, frânări mecanice și electrice și la importante variații și șocuri de sarcină. [46,63,124,213] Acestea funcționează uneori în medii care conțin pulberi (în fabrici de ciment), gaze corosive (industria chimică), gaze explozive (în rafinării, mine de cărbuni), sau la temperaturi înalte (ca de exemplu la turnătorii). Adeseori, I-R.T. sînt montate în exterior, unde sînt supuse precipitațiilor atmosferice și variațiilor de temperatură. [24, 63,124,131,157,158,185,212,213,220,241]

*) În cele ce urmează se folosesc prescurtările din anexa II-a.

Ca atare, alegerea utilajului electric este condiționată atât de felul mașinilor de lucru și de regimurile de funcționare ale acestora, cum și de procesele tehnologice realizate de acestea, pe baza cărora se determină cuplul rezistent, condițiile de modificare și reglare a vitezei, de pornire, frânare și reversare, cerințele de automatizare etc., fiind cunoscut faptul că I-R.T. sînt caracterizate prin cuplu static rezistent constant, (un exemplu tipic, fiind constituit de mecanismul de ridicare la care greutatea fixată pe cîrlig este aceeași la ridicare și coborîre - grupa I de mașini de lucru). [28, 131, 213]

2.2. Sisteme de acționare electrică specifice instalațiilor de ridicat și transportat.

Sistemele uzuale de acționare folosite în I-R.T. sînt cele de c.a. sau c.c.

În cadrul sistemelor de c.a. se folosesc aproape exclusiv M.E. asincrone cu inele sau în scurtcircuit. Astfel M.E. asincrone în scurtcircuit se utilizează la macaralele pentru construcții, palane, macarale folosite în locuri cu pericol de explozie, funiculare, poduri rulante mici etc. M.E. asincrone cu inele se folosesc de regulă la A.E. a podurilor rulante, a macaralelor din industria metalurgică, a macaralelor mari și în general la o gamă mare de tipuri de I-R.T.

A.E. prin grupe de M.E. cu mers sincron, cu sau fără mașini auxiliare, se aplică la poduri rulante, macarale portal sau poduri de transbordare cu deschidere mare. O grupă specială de M.E. destinate acționării I-R.T. o constituie M.E. de c.a. cu colector, ca de exemplu motorul cu repulsie, care prezintă o serie de avantaje nete față de M.E. asincrone, mai ales în ceea ce privește frînarea electrică, fapt ce le recomandă la utilizarea acestora în cazul I-R.T. cu viteze de ridicare mari. [24]

În cadrul sistemelor de c.c. se întrebuintează mai ales mașini de c.c. cu excitație serie sau mixtă.

Mașina de c.c. cu excitație serie se folosește la macarale de diferite tipuri, în special la mecanisme de ridicare și la troliuri marine. Mașina de c.c. cu excitație mixtă și derivație se utilizează mai ales la acționarea mecanismelor de translație și a celor de transport continuu.

Grupul Ward-Leonard se folosește de regulă la macarale speciale și pentru greutăți mari. În ultima perioadă, în scopul îmbunătățirii performanțelor acestora, se folosesc pe scară tot mai largă convertizoare statice echipate cu A.M. sau elemente semiconductoare (tiristoare). [18, 28, 79, 213]

Dacă ne referim la procesele proprii sistemelor de A.E. [25] (care depind de particularitățile de funcționare atât ale M.E. cât și ale mașinii de lucru respective) acestea pot fi termice, electromecanice și electromagnetice.

Folosirea unei M.E. de acționare în condiții optime este una din problemele cele mai importante ale proiectării și exploatarei unui sistem de A.E. În consecință este necesară determinarea puterii M.E. de acționare așa fel încât ea să funcționeze pe cât posibil la temperatura maximă admisă pentru clasa de izolație folosită la construcția acesteia. Depășirea temperaturii admise chiar numai într-o singură parte componentă a M.E. de acționare poate conduce la deteriorarea izolației sau la scurtarea vieții mașinii datorită îmbătrânirii rapide a izolației.

Funcționarea M.E. de acționare la o temperatură sub cea admisă de clasa sa de izolație, duce la o subutilizare a acesteia, la scumpirea instalației, la scăderea randamentului și deci la creșterea pierderilor, iar în cazul M.E. asincrone în scurtcircuit sau cu inele și la scăderea factorului de putere. [204]

În ceea ce privește procesul tranzitoriu electromecanic, acesta are loc de obicei la pornire, la schimbarea sensului de rotație, la oprire, la modificarea unor parametri ai M.E. de acționare în vederea trecerii de pe o caracteristică mecanică pe alta etc., adică la orice trecere a sistemului de la o stare stabilă la altă stare stabilă de funcționare. Desfășurarea procesului tranzitoriu electromecanic are loc într-un interval de timp de ordinul secundelor, iar în unele cazuri chiar de ordinul minutelor. Deoarece de cele mai multe ori timpul cât durează procesul tranzitoriu reprezintă un timp neproductiv, este indicat să se cunoască factorii de care depinde durata acestuia.

În schimb analiza procesului tranzitoriu electromagnetic este de regulă foarte complexă și în consecință studiul comportării sistemelor de A.E. se abordează de la caz la caz.

Totodată este de menționat că funcționarea M.E. de acționare trebuie să aibă loc în condiții care să permită obține-

rea unui cost minim, reducerea consumului specific de energie electrică. Acest fapt în cea mai mare măsură depinde de alegerea soluției de proiectare precum și de exploatarea rațională a instalației de A.E. respective.

2.3. Mașinile electrice destinate acționării instalațiilor de ridicat și transportat.

M.E. destinate acționării I-R.T. se deosebesc de cele normale prin aceea că unele părți sînt adaptate condițiilor de lucru mai grele, regimurile de funcționare al acestora fiind impus în fond de regimul de lucru al mecanismului acționat. Partea mecanică a unor asemenea mașini trebuie să fie întărită la eforturi dinamice. Astfel, acestea se disting printr-o construcție mecanică mai robustă, (de exemplu din fontă cenușie turnată). Infășurările sînt de regulă fretate pentru a rezista la forțe centrifuge mai mari, iar arborii și lagărele sînt mai larg dimensionate.

Totodată M.E destinate acționării I-R.T. trebuie să aibă atît momentul inerțial (respectiv produsul $J\Omega_s^2$) și curentul de pornire cît mai mic, iar cuplul maxim, cuplul de pornire și alunecarea nominală mărite.

Pe de altă parte pierderile în procesele tranzitorii sînt cu atît mai mari cu cît produsul $J\Omega_s^2$ este mai mare. Ca atare pentru o anumită acționare cu frecvență de conectare mare, se alege M.E. pentru care produsul respectiv este minim. Astfel, respectînd această condiție, la M.E. pentru I-R.T. se constată că pînă la 30 kW, viteza sincronă optimă este de 1000 rot/min., de la 30 kW la 60 kW este de 750 rot/min., iar pentru puteri mai mari 600 și 500 rot/min.

Regimul termic al M.E. destinate acționării I-R.T. este mult influențat de procesele de pornire și frînare. De menționat că funcționarea în regim intermitent a M.E. de c.a. cu rotorul în scurtcircuit este mult mai grea decît a mașinilor de c.c. sau a M.E. asincrone cu inele, avînd în vedere că întreaga cantitate de căldură degajată în cadrul proceselor tranzitorii este disipată în mediul ambiant numai de M.E. însăși, în timp ce la celelalte M.E. o mare parte din căldură este degajată de către rezistențele înseriate pe durata proceselor tranzitorii respective. Utilizarea unor izolanți de clasă superioară în construcția M.E. duce la

micșorarea dimensiunilor și deci la degajări mai mici de căldură. [48,185] Ca atare pentru protecție la suprasolicitări termice de obicei se introduc în coroana bobinajelor microîntrerupătoare bimetalice sau termistoare. [48,120,187]

Este de remarcat că parametrii acestor mașini sînt aceeași cu parametrii mașinilor normale, din care derivă de fapt, avînd însă valori diferite pentru fiecare din serviciile tip. Astfel că pentru fiecare serviciu și în cadrul serviciului pentru fiecare D.A., se vor obține alte valori pentru parametrii respectivi. [169,171]

La M.E. destinate acționării I-R.T., un parametru deosebit de important ce trebuie avut în vedere la proiectare și care este necesar să fie verificat pentru fiecare D.A. îl constituie coeficientul de supraîncărcare mecanică λ . Acest coeficient are în acest caz valori mult mai mari față de M.E. normale. În timp ce pentru motoarele normale $\lambda \approx 1,6 \div 2$, la M.E. destinate acționării I-R.T. $\lambda \approx 2 \div 3,5$. [192,213]

De asemenea, raportul χ dintre pierderile constante și cele variabile ale mașinii considerate la puterea nominală, diferă față de cele normale, fiind de regulă mai mare, [27, 28] așa cum rezultă și din tabelul 2.1.

Tabelul 2.1.

Tipul mașinii electrice	χ x)
Mașini de c.c. cu excitație în serie (pentru macarale)	0,5 - 1
Mașini de c.c. cu excitație derivație	1 - 2
Motoare asincrone pentru instalații de ridicat	0,5 - 1,5
Motoare asincrone obișnuite	0,5 - 1

x) Valorile pentru χ indicate în tabelul 2.1. sînt valabile numai cu titlu orientativ.

Valorile exacte se pot obține de la întreprinderea constructoare sau prin măsurări experimentale.

În ceea ce privește parametrii energetici, factorul de putere $\cos \varphi$ și randamentul η , determinarea valorilor acestora pentru fiecare serviciu și regim de funcționare trebuie făcută astfel încât să se obțină utilizarea optimă a M.E. respective, avînd în vedere că datorită pornirilor dese, au un factor de putere mediu scăzut. [24]

Dacă M.E. ce se folosesc în cadrul I-R.T. sînt expuse intemperiei sau dacă funcționează în condiții dificile de lucru (de exemplu în oțelării), atunci acestea sînt de construcție capsulată. Ele pot avea mai multe regimuri de funcționare (continuă, de scurtă durată sau intermitentă).

În scopul caracterizării regimurilor de funcționare ale I-R.T. și construirii de M.E. corespunzătoare [72] s-au standardizat valorile pentru:

- durata relativă de funcționare activă:

D.A. % - 15; 40; 60;

(de exemplu dacă $D.A. \geq 0,6$ se aleg M.E. construite pentru funcționare continuă, iar dacă $D.A. \leq 0,6$ se aleg M.E. construite pentru regim intermitent);

- numărul conectărilor pe oră (frecvența de conectare)

h: 60; 90; 120; 240; 360; 480; 600;

- regimul nominal de lucru (stabilit în raport de durata de utilizare anuală t_a [ore/an max.], factorul de încărcare K_1 , durata relativă de funcționare D.A. %, frecvența de conectare pe oră h și temperatura mediului ambiant θ_a): ușor - U; mediu - M; greu - G; foarte greu - F.G.; foarte greu continuu - F.G.C. (K_1 reprezentînd raportul între sarcina medie care se transportă în cursul unui an Q_{med} și sarcina nominală Q_N).

M.E. pentru I-R.T. trebuie să corespundă condițiilor tehnice prevăzute în STAS 1893-72, [159, pag.147] precum și unor precizări și completări prevăzute în STAS 6968/1-75 [159, pag. 510] și normelor interne de produs. (Regimurile de funcționare și serviciile tip fiind definite atît în STAS 1893-72 cît și în publicația C.E.I. - 34 - I.)

Astfel pentru M.E. asincrone cu inele serviciul nominal tip este serviciul intermitent periodic S_3 (fig.2.1) definit prin ciclul de 10 minute și D.A.: 40 % [159, pag.511 pct.2.3.3.] Pentru M.E. asincrone cu rotorul în scurtcircuit serviciul nominal tip este serviciul intermitent periodic cu durată de pornire S_4

(fig.2.2.) definit prin 120 conectări pe oră, D.A. 40 % și factor de inerție $FI=3$ [159, pag.511 pct. 2.3.4]

De asemenea, M.E. destinate acționării I-R.T. sînt caracterizate de constructor prin încadrarea acestora într-un serviciu nominal tip conf. STAS 1893-72, care se înscrie în mod obligatoriu pe plăcuța indicatoare a mașinii respective. [159]

De altfel majoritatea întreprinderilor ce fabrică asemenea M.E. garantează puterile acestora, pentru regimuri de funcționare standard, fapt ce presupune efectuarea „timbrării” acestora. [93, 97,227]

Astfel după unele norme străine [129], proiectarea și realizarea M.E. de acționare se face pentru regimul de scurtă durată (S2), cu o durată de funcționare în sarcină de 60 minute și pentru regimul intermitent (S3) la D.A. %: 15; 25; 40; 60 și 100 și la o durată a ciclului de 10 minute (6 c/oră). În schimb unele firme străine [34] realizează asemenea M.E. pentru următoarele regimuri de funcționare:

- regim de scurtă durată R.S.D. (S2) la o durată de funcționare în sarcină de 60 minute;
- regim intermitent R.I. (S3), la o durată a ciclului de 10 min. (6 c/oră), cu D.A. %: 25; 40; 60; 100;
- regim intermitent cu perioadă de pornire, R.I.P. (S4) conform tabelului 2.2. în care sînt date D.A. pentru diferite frecvențe de conectare (h).

Tabelul 2.2.

Frecvențe de conectare h (c/oră)	150	300	600
Durate relative de funcționare D.A. %	25 40 60	- 40 60	- - 60

- regim intermitent cu perioadă de pornire și frînare R.I.P.F. (S5) în aceleași condiții ca serviciul S4. [35, 36]

Alte firme avînd în vedere interdependența între frecvența de conectare (h), durata relativă de funcționare activă (D.A), puterea, momentele inerțiale și gradul de încălzire a M.E., dau o serie de relații de calcul sub formă de tabele și curbe, cu ajutorul cărora pot fi alese M.E. destinate acționării I-R.T, corespunzătoare unei anumite A.E., în acest scop fiind necesară o

apreciere a energiei disipate sub formă de căldură de către M.E. de acționare în diferite regimuri de funcționare. [15, 16, 57, 93, 97, 211]

În țara noastră proiectarea și executarea M.E. destinate acționării I-R.T. se face conform standardelor și normelor de produs în vigoare. [159]

De exemplu Intreprinderea de Mașini Electrice din București, principala producătoare de astfel de M.E. (conform catalogului de mașini electrice asincrone 100/1976) indică pentru M.E. respective următoarele date:

- tipul motorului;
- caracteristicile nominale: P , n , η , $\cos \varphi$, I_n ;
- parametrii: M_p ; I_p ; GD^2 ; G ;
- puterea la serviciul: S_1 , S_2 (cu durată de funcționare în sarcină 60'), la serviciul S_4 ($FI=3$ pentru h și D.A. conform tabelului 2.3.).

Tabelul 2.3.

Frecvența de conectare h (c/oră)					
120	150	180	240	300	360
durata relativă de funcționare D.A. %					
40	25	30	40	50	60

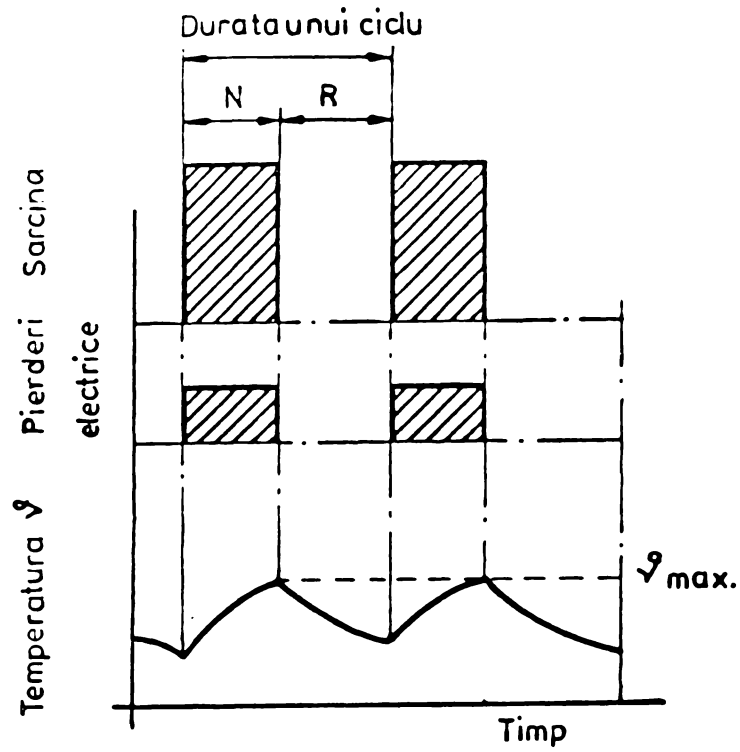
Pentru M.E. asincrone cu inele se indică puterea la serviciul S_2 și durata de funcționare în sarcină de 30' și 60', iar pentru serviciul S_3 , $h=6$ c/oră și D.A. % = 25; 40; 60 și 100.

2.4. Probleme privind alegerea datelor tehnice pentru mașinile electrice de acționare destinate instalațiilor de ridicat și transportat.

Tipul M.E. de acționare, turația și tensiunea se stabilesc avînd în vedere cerințele impuse de A.E. respectivă în raport de seriile existente de M.E. de acționare pentru macarale.

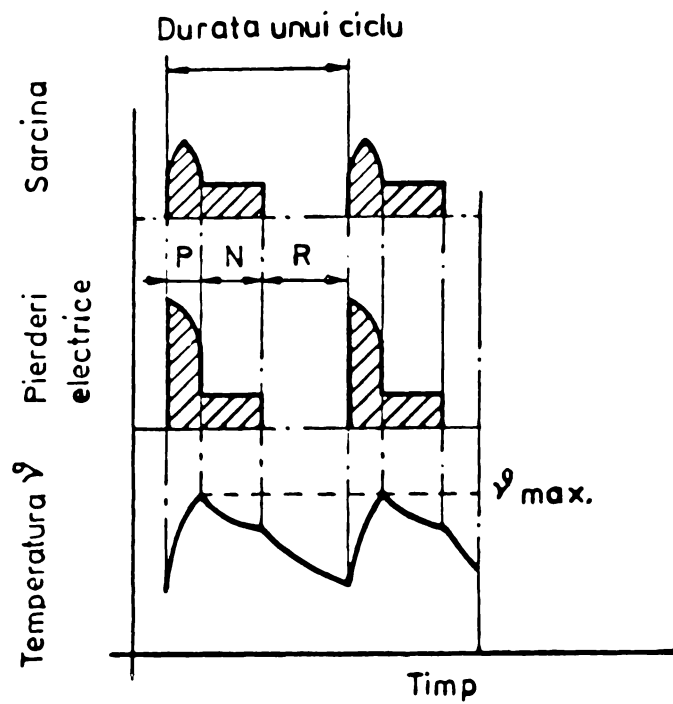
Puterea M.E. de acționare se poate calcula cu aproximație pe baza regimului de funcționare la viteză constantă și greutatea nominală de ridicat sau transportat, alegînd puterea P_N în raport de puterea în regim staționar P_S , astfel încît să se respecte condiția ca $P_N \geq P_S$.

M.E. aleasă din catalog, de putere apropiată se verifică la încălzire, suprasarcină și condiții de pornire.



Serviciu intermitent periodic S3

Fig.2.1



Serviciu intermitent periodic cu durata de pornire S4

Fig.2.2

La calculul puterii M.E., trebuie să se aibă în vedere pe lângă asigurarea demarării mecanismului corespunzător și eventualele regimuri de frînare speciale care pot fi determinante (îndeosebi la mecanismele de ridicare). Astfel, o mărire a puterii M.E. poate fi necesară pentru asigurarea demarării mecanismului în timp util sau a unei temperaturi admisibile a bobinajelor, dar în multe cazuri, I-R.T. lucrează frecvent la o sarcină redusă față de cea nominală și ca atare pentru determinarea corectă a puterii, este necesar să se țină cont de toți factorii enumerați mai înainte [131]

Există mai multe metode de verificare pe baza mărimilor echivalente a puterii M.E. de acționare (dacă se pot determina diagramele de funcționare), redată în literatura de specialitate [23-29, 48, 71, 138, 145, 148, 156, 166, 209, 213, 238]. Astfel pentru M.E. la care se poate considera că există proporționalitate între cuplu și curent, adică la mașinile de c.c. cu excitație în derivație și la M.E. asincrone cu inele, cu o anumită aproximație se poate aplica metoda cuplului echivalent determinat pe baza diagramei de funcționare. [213]

Cuplul echivalent M_e se poate calcula din expresia:

$$M_e = \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^v M_{Px}^2 t_{Px} + \sum_{x=1}^v M_{Nx}^2 t_{Nx} + \sum_{x=1}^v M_{Fx}^2 t_{Fx}}{\beta_P \sum_{x=1}^v t_{Px} + \beta_N \sum_{x=1}^v t_{Nx} + \beta_F \sum_{x=1}^v t_{Fx} + \beta_R \sum_{x=1}^v t_{Rx}}} \quad (2.1)$$

unde:

v - reprezintă numărul operațiunilor dintr-un ciclu (de exemplu numărul pornirilor); iar $\beta_P = \beta_F$; $\beta_N = 1$.

Dacă se lucrează la turații scăzute atunci: $\beta_N < 1$.

Se consideră că o M.E. de acționare este corespunzător aleasă dacă:

$$M_e \leq M'_N \quad (2.2)$$

unde:

M'_N - reprezintă cuplul nominal recalculat pentru condițiile reale de funcționare din exploatare.

În condițiile unei temperaturi a mediului de răcire superioară cele de 40°C , puterea nominală P_N a M.E. de acționare

./.

trebuie recalculată, ea devenind $P'_N < P_N$, datorită înrăutățirii condițiilor de evacuare a căldurii. Astfel, P'_N se obține [27, 72,213] din relația:

$$P'_N = \alpha_{DA} \cdot \alpha_{\theta} \cdot P_N \quad (2.3)$$

unde:

$$\alpha_{\theta} = \sqrt{1 - \frac{\Delta\vartheta}{\vartheta_N}} (1 + \kappa) \quad (2.4)$$

și

$$\alpha_{DA} = k_{\varepsilon} \sqrt{\frac{DA_N}{DA_r}} \quad (2.5)$$

iar

$$DA = \sqrt{\kappa \left(\frac{DA_N}{DA_r} - 1 \right) + \frac{DA_N}{DA_r}} \quad (2.6)$$

în care:

$\Delta\vartheta = \theta_a - 40^{\circ}$ - reprezintă depășirea în grade Celsius (sau Kelvin) a temperaturii de $+40^{\circ}\text{C}$ de către mediul de răcire;

κ - raport conform tabelului 2.1;

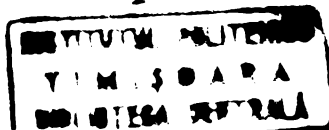
k_{ε} - factor de corecție în funcție de tipul M.E. [213]

Cunoscând puterea P'_N se obține cuplul M'_N .

În cazul M.E. de acționare la care nu există proporționalitate între cuplu și curent cum este de exemplu cazul mașinii de c.c. cu excitație serie, nu se poate aplica metoda cuplului echivalent ci a curentului echivalent, folosind relații similare cu (2.1). Diagrama $I=f(t)$ se obține din $M=f(t)$ cunoscând caracteristica M.E., $M=f(I)$. [213]

Aplicarea metodei curentului echivalent la calculul puterii M.E. asincrone în scurtcircuit nu conduce la rezultatele cerute, deoarece pierderile variabile depind și de pătratul curentului și de variația rezistenței rotorului (ca urmare a variației frecvenței). [43, 79]

În consecință metoda de calcul recomandată este cea care se bazează pe formula pierderilor medii la aplicarea căreia se ține seama de căldura produsă în procesele tranzitorii sau de variația în timp a curentului și alunecării, deci a frecvenței. [247]



./.

349.617

La variații mari ale alimentării, pierderile în cuprul statorului și rotorului nu rămân proporționale între ele. Creșterea pierderilor în fier datorită măririi frecvenței rotorice este neglijabilă, chiar pentru alunecări mai mari ca 1, ceea ce conduce la concluzia că se poate admite și în acest caz invariabilitatea pierderilor "constante". Pentru pierderile variabile însă, este necesar să se țină seama de variațiile curenților din stator și rotor cum și de variația rezistenței rotorice cu alunecarea. Dacă frînarea prin contraconectare se execută cu periodicitate programată și frecvență, atunci pierderile variabile trebuie analizate în special la rotor, a cărei încălzire va fi mai mare decât a statorului, datorită energiei din rețea și a energiei mecanice de la arbore. [48]

Pierderile încălzitoare cresc atât din cauza curentului rotoric cât și din cauza creșterii rezistenței.

Expresia pierderilor medii Q_m în perioada activă poate fi prezentată sub forma:

$$Q_m = \frac{\sum_0^{t_P} (Q_{1P} + Q_{2P}) + \sum_0^{t_N} (Q_{1N} + Q_{2N}) + \sum_0^{t_F} (Q_{1F} + Q_{2F}) t}{\alpha_c (t_P + t_F) + t_N} \quad (2.7)$$

unde:

α_c - coeficientul de corecție a duratei proceselor tranzitorii.

Dacă Q_N este cantitatea de căldură admisibilă în regim permanent la viteza nominală și β_R coeficientul de corecție a duratei pauzei, atunci pierderile echivalente admisibile în perioada activă Q_e , se pot determina din egalitatea pierderilor medii:

$$Q_e (t_P + t_N + t_F) = Q_e t_a = Q_N t_a + Q_N \beta_R t_R = Q_N (t_a + \beta_R t_R) \quad (2.8)$$

se deduce:

$$Q_e = Q_N \frac{t_a + \beta_R t_R}{t_a} = Q_N \frac{1}{DA} \quad (2.9)$$

unde:

$$t_a = t_P + t_N + t_F \quad (2.9a)$$

./.

Pentru simplificarea calculelor, la funcționarea ciclică cu frînarea prin contraconectare, se poate lua în considerare numai rotorul. În acest caz în formulă nu vor intra decât pierderile din rotor Q_2 , Q_{2N} , Q_{2F} relația (2.7) devenind:

$$Q_m = \frac{\sum_0^{t_P} Q_{2P}t + \sum_0^{t_N} Q_{2N}t + \sum_0^{t_F} Q_{2F}t}{\alpha_c (t_P + t_F) + t_N} \quad (2.7a)$$

Prin această metodă, M.E. aleasă va avea o rezervă de putere. M.E. asincronă în scurtcircuit poate fi aleasă din seriile speciale pentru regimuri intermitente a căror putere nominală este specificată la D.A._N. [237].

Pierdere echivalentă admisibilă la o durată de conectare D.A.' se deduce din egalitatea pierderilor medii:

$$Q_e \cdot DA' = Q_N DA'_N \quad (2.10)$$

de unde:

$$Q_e = Q_N \cdot \frac{DA'_N}{DA'} \quad (2.11)$$

M.E. asincronă în scurtcircuit dacă funcționează în regim intermitent, trebuie verificată la numărul admisibil de conectări pe oră, aceasta deoarece intensitatea curentului de pornire depășește cu mult valoarea dublului intensității curentului nominal. [27,213]

Numărul admisibil de conectări pe oră h la un motor cu pierdere admisibilă în regim permanent Q_N și care este încărcat termic în perioada activă cu pierdere Q_e , se poate obține din relația:

$$h \cdot t_c = 3600 \text{ (s)} \quad (2.12)$$

$$t_R = t_c - t_a = \frac{3600}{h} - t_a \quad (2.13)$$

Introducînd în relația 2.8 se obține

$$\frac{Q_e t_c \cdot h}{3600} = Q_N \left(1 + \beta_R \frac{t_R}{t_a}\right) = Q_N \left(1 - \beta_R - \frac{3600 \beta_R}{h \cdot t_a}\right) \quad (2.14)$$

din care se deduce:

$$h = 3600 \frac{Q_N}{Q_e t_c} \left[\frac{1-\beta_R}{2} + \sqrt{\left(\frac{1-\beta_R}{2}\right)^2 + \frac{\beta_R Q_e t_c}{Q_N t_a}} \right] \quad (2.15)$$

Însă raportul:

$$\frac{Q_N}{Q_e} = DA' \quad (2.16)$$

deci:

$$h_{adm} = 3600 \frac{DA'}{t_c} \left[\frac{1-\beta_R}{2} + \sqrt{\frac{1-\beta_R}{2}^2 - \frac{\beta_R}{t_a DA'}} \right] \quad (2.17)$$

În concluzie relația 2.17 exprimă dependența h_{adm} , de durata relativă de funcționare, durata ciclului și de factorul de corecție β_R , (care poate fi determinat și experimental).

În unele norme [129] se dau valorile pentru h la fiecare tip de M.E. de acționare, iar pierderile la pornire se calculează pentru fiecare D.A. solicitat.

Dacă nu este asigurată o oprire exactă, numărul de conectări pe oră crește considerabil, în funcție de precizia cu care trebuie făcută aducerea sarcinii respective.

În literatura de specialitate [158] se recomandă unele formule simplificate pentru numărul admisibil de conectări pe oră:

$$h_{adm} = 3600 \frac{DA_M - k_s^2 DA}{i_p^2 t_p} \quad (2.18)$$

unde:

DA_M - durata relativă de funcționare a M.E. aleasă.

În unele publicații [57] se dau diagrame sau relații care exprimă interdependența între putere, frecvența de conectare, masa în rotație și încălzire în cazul M.E. de ascensor cu două viteze și cu posibilitate de schimbare a numărului de poli. În contrast cu M.E. asincrone normale, la M.E.

./.

care lucrează în regimuri intermitente cum sînt cele pentru ascensoare (cu circuit magnetic nesaturat) pierderile în cupru sînt atît de însemnate, încît toate celelalte pierderi în comparație cu acestea pot fi neglijate. La frînare în regim de generator, apar și curenți de o frecvență mai ridicată în rotoare, ceea ce îndreptățește presupunerea că pierderile în fier aici sînt foarte mari. Dacă se efectuează totuși un postcalcul, se constată că inducțiile cu frecvență crescută vor fi atît de mici încît pierderile în fier și în acest caz nu urcă sensibil. Experiința arată că în cazul celor mai mari solicitări posibile în timpul funcționării, cuplul mediu al sarcinii nu depășește 75 % din cuplul motor nominal. Unele norme (DIN 42680) prescriu de exemplu în cazul probei de încălzire a M.E. pentru ascensoare o sarcină statică de 75 % a cuplului motor, (în regim staționar cantitatea de căldură produsă în M.E. este egală cu cea evacuată).

În lucrarea [57] se dau expresiile (în cazul unui M.E. pentru ascensor cu poli comutabili) pentru frecvența de conectare, în funcție de D.A., momentul inerțial și încălzirea M.E. respective.

Astfel, pentru o M.E. solicitată static se indică relația:

$$h = \frac{\left[\alpha_m + (1 - \alpha_m) \frac{DA}{100} \right] Q_N - (1 - \eta) 0,75 \frac{J\Omega^2 s_I}{t_I^*} q \frac{DA}{100}}{J\Omega^2 s_I \left[x - (1 - \eta) 0,75 q y \right] + (1 - \alpha_n) t_I y Q_N} \quad (2.19)$$

Iar pentru o M.E. nesolicitată static:

$$h_0 = \frac{\left[\alpha_m + (1 - \alpha_m) \frac{DA}{100} \right] Q_N}{J\Omega^2 s_I x_0 + (1 - \alpha_n) t_I y_0 Q_N} \quad (2.20)$$

în care s-au notat cu:

$$x = q + \frac{a}{2} \left[\left(\frac{p_{\cdot\cdot}}{p} \right)^2 \left(\frac{p_{\cdot\cdot}}{p} - 1 \right) \right] e + \left(1 - \frac{p_{\cdot\cdot}}{p} \right) \frac{b}{2} \quad (2.21)$$

$$y = 1 + \frac{e}{q} \left(1 - \frac{p^{\cdot}}{p^{\ddot{\cdot}}}\right) \quad (2.22)$$

$$x_0 = d + 0,5 + \left[\left(\frac{p^{\cdot}}{p^{\ddot{\cdot}}}\right)^2 \left(\frac{p^{\ddot{\cdot}}}{p^{\cdot}} - 1\right) \right] f + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{p^{\cdot}}{p^{\ddot{\cdot}}}\right)^2 \quad (2.23)$$

$$y_0 = 1 + \frac{f}{d} \left(1 - \frac{p^{\cdot}}{p^{\ddot{\cdot}}}\right) \quad (2.24)$$

$$a = \frac{M_N}{M_N - M'_R} = 1,55 \quad (2.25)$$

$$b = \frac{M_N}{M_N - M'_R} = 0,75 \text{ (în cazul frînării cu sarcină statică);} \quad (2.26)$$

$$M'_R = 0,75 M_N \quad (2.27)$$

$$q = - \frac{M_N}{M - M'_R} (1 - S_N) (0,75 S_N - 1) \quad (2.28)$$

$$e = - \frac{M_N}{M - M'_R} (1 - S_N); f = 0,39; d = 0,44 \quad (2.29)$$

$$Q_R = \alpha_m Q_2 \quad (2.30)$$

$$Q_{NF} = \alpha_n Q_2 \quad (2.31)$$

unde:

Q_{NF} - cantitatea de căldură la Ω_{max} și frinare

$$t_I = \frac{d}{q} t_I^* \quad (2.32)$$

în care:

t_I^*, t_I - timpul corespunzător turației mari Ω_I în ipoteza solicitării statice, respectiv nesolicitării statice.

./.

BUPT
CENTRAL

În cazul în care $p' = p''$ rezultă:

$$x = q; x_0 = d+0,5; y = y_0 = 1 \quad (2.33)$$

În fig.2.3 sînt redade curbele $h = f(GD^2)$ și $h_0 = f(GD^2)$ pentru un motor cu $\Omega_{sI} = 105 \text{ rad/s}$ (1000 rot/min.) și altul cu $\Omega_{sII} = 158 \text{ rad/s}$ în următoarea ipoteză:

$$t_R = 2,5 \text{ s}; Q_N = 2500 \text{ ws}; \frac{p}{p} = 6; DA = 60\%; \alpha_m = 0,2; \alpha_n = 0,5$$

valabilitatea curbelor extinzîndu-se pînă la $h = 420 \text{ c/oră}$.

Este de remarcat că pe lîngă verificarea la încălzire a M.E. de acționare trebuie efectuată verificarea la suprasarcină. La mașina de c.c. posibilitatea de supraîncărcare este determinată de comutație.

Cuplul maxim admis [158,213] este aproximativ:

$$M_k = 2,5 M_N \quad (2.34)$$

La pornirea cu reostat cuplul variază între o limită maximă M_{\max} și una minimă M_{\min} , ce trebuie să satisfacă condițiile:

$$M_{\min} \geq (1,1 \sim 1,2) M_{s\max} \quad (2.35)$$

$$M_{\max} < M_k \quad (2.36)$$

Cuplul mediu de pornire este:

$$M_{pm} = \frac{1}{2} (M_{\max} + M_{\min}) \quad (2.37)$$

La M.E. asincrone posibilitatea de supraîncărcare este limitată de cuplul de răsturnare, fiind egal cu aproximativ $2,5 \sim 3,5 M_N$ în cazul M.E. pentru I-R.T. Datorită căderilor de tensiune în rețea, tensiunea la pornire U_p scade conform relației:

$$U_p = \beta_u U_N \quad (2.38)$$

unde:

β_u - se consideră de obicei în calculele de verificare 0,85 pentru M.E. de joasă tensiune uzuală și 0,95 pentru cele de tensiuni mai mari.

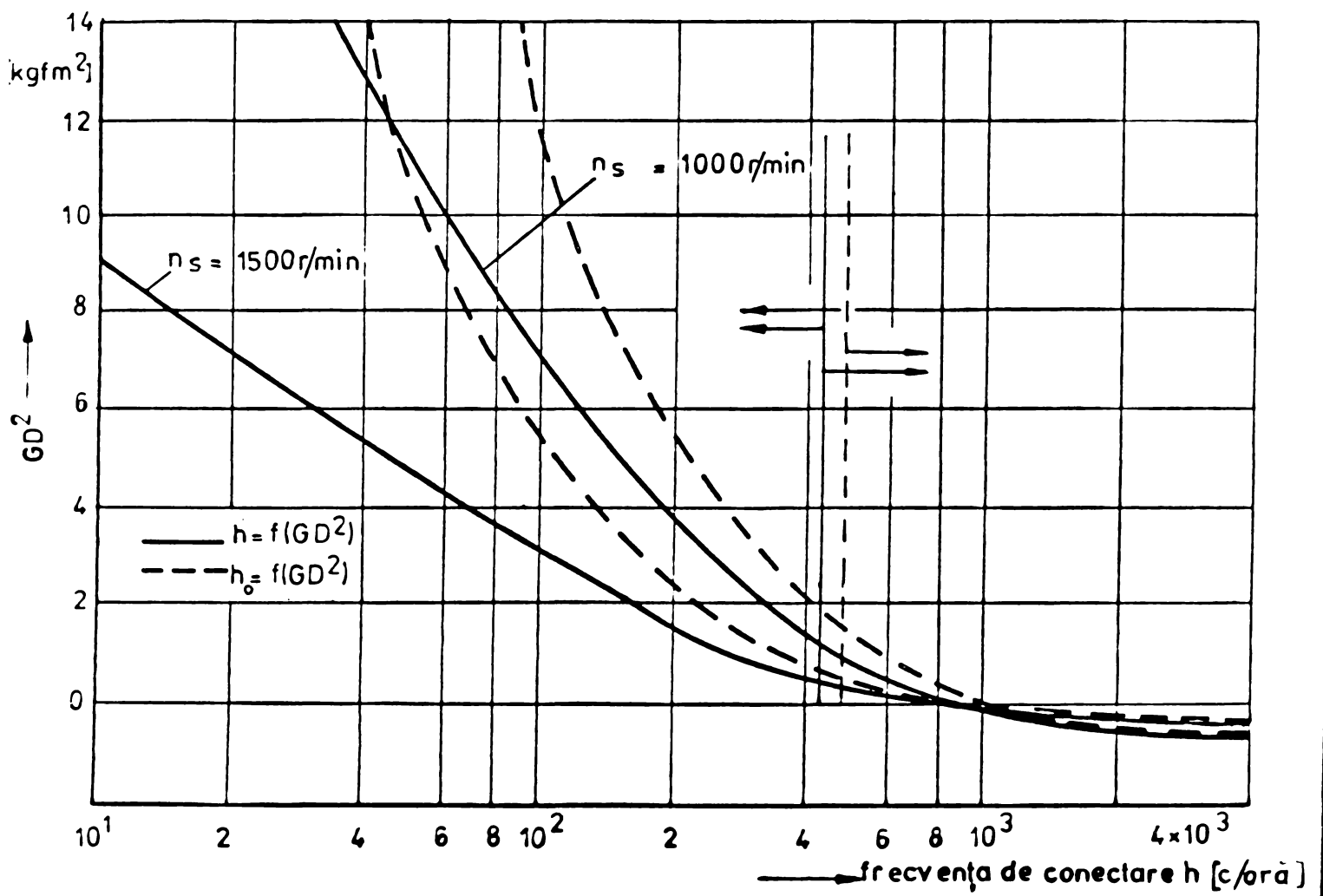


Fig.2.3

In această situație cuplul maxim va deveni:

$$M'_k = \left(\frac{U_p}{U_N}\right)^2 M_k = \beta_u^2 M_k \quad (2.39)$$

La M.E. asincrone cu inele, cuplul mediu la pornire cu reostat, se poate admite [213] (pentru cele de joasă tensiune):

$$M_{pm} = \alpha_\lambda \beta_u^2 M_k = 0,85 \cdot 0,85^2 M_k \cong 0,6 M_k \quad (2.40)$$

în care:

$$\alpha_\lambda = \frac{M_{pm}}{M_k} \quad (2.41)$$

La M.E. asincrone în scurtcircuit pentru cuplul mediu în timpul pornirii se poate considera valoarea aproximativă dată de relația:

$$M_{pm} = \frac{\beta_u^2}{2} (M_k + M_p) \quad (2.42)$$

Deasemeni alunecarea poate ajunge la 0,03-0,10 în cazul M.E. pentru I-R.T. față de 0,02-0,05 la M.E. pentru acționări industriale obișnuite [213]

Există multe situații în care nu se pot stabili diagramele de funcționare din cauză că regimul de lucru este foarte variat. In astfel de cazuri determinarea puterii M.E. de acționare se face cu ajutorul unor curbe și coeficienți indicați în literatura tehnică. [213]

In realitate M.E. funcționează (precizînd că cuplul static corespunzător sarcinii nominale M_{SN} , se compară cu cuplul nominal corectat M'_N , adică admisibil în condiții reale de exploatare, M.E. alegîndu-se astfel ca $M'_N \geq M_{SN}$):

- la o durată relativă de funcționare $DA_R \neq DA_N$, (cuplul nominal M_N al M.E. se modifică într-un raport k_{DA});

- la un ciclu în care există cel puțin un timp de accelerare, cuplul fiind mai mare decît cel stabilit în regim staționar.

La frînare electrică, cuplul motor de asemenea, diferă de cel staționar.

Cu cît numărul ciclurilor pe oră h și numărul accelerațiilor și frînărilor electrice n_f din fiecare ciclu este mai mare, cu atît mai mare este influența acestora asupra încălzirii M.E. [213]

Pentru ca temperatura să nu treacă de limita admisă se impune o micșorare a cuplului sub valoarea normală, ținînd cont de coeficientul:

$$k_c = 1 - k \cdot n_f \cdot h \quad (2.43)$$

Dacă în exploatare M.E. nu funcționează decît opt ore din 24, cuplul admisibil se poate mări cu coeficientul:

$$k_8 = \frac{M_8}{M_{24}} > 1 \quad (2.44)$$

Dacă M.E. lucrează la turații mai scăzute decît cea nominală, cuplul admisibil se micșorează cu $k_\Omega < 1$ datorită condițiilor mai defavorabile de evacuare a căldurii. Există perioade de funcționare cu sarcină mai mică (de exemplu ridicarea și coborîrea cîrligului gol). În acest caz cuplul admisibil al M.E. de acționare se poate mări față de cel nominal cu un coeficient k_α care depinde de tipul I-R.T. și specific cu locul de deservire. De asemenea de influența temperaturii mediului ambiant se ține seama printr-un coeficient k_θ , iar de influența altitudinii de peste 1000 m, se introduce un coeficient de corecție k_H .

Ca atare cuplul admisibil care poate fi dezvoltat de M.E. va fi în final:

$$M'_N = k_{DA} \cdot k_c \cdot k_8 \cdot k_\Omega \cdot k_\alpha \cdot k_\theta \cdot k_H \cdot M_N \quad (2.45)$$

unde: constantele k (din relația 2.45) se obțin din diagrame și tabele date pentru diferite tipuri M.E. [213]

2.5. Concluzii.

M.E. destinate acționării I-R.T. trebuie să corespundă unor condiții tehnice și regimuri de funcționare specifice acționării I-R.T. În consecință atît din punct de vedere constructiv cît și din punct de vedere al caracteristicilor tehnice și parametrilor energetici, acestea diferă de M.E. normale din care derivă în fond.

Ca atare alegerea M.E. cât și stabilirea datelor tehnice ale acestora în raport de cele amintite în paragrafele anterioare, implică cunoașterea regimurilor de funcționare cât și a condițiilor de lucru și mediu din exploatare. Totodată pentru întreprinderile constructoare de asemenea M.E. se impune stabilirea și verificarea în condiții de laborator a parametrilor proiectați, a duratei de viață în exploatare și a fiabilității acestora.

Pentru folosirea M.E. în diferite servicii tip, apare necesitatea determinării parametrilor principali pentru fiecare din serviciile tip pentru care a fost proiectată adică să se efectueze așa-numita "timbrare a motorului". Cunoașterea încălzirii și răcirii M.E. care funcționează în condiții de variație a valorii mărimilor electrice și mecanice, precum și a succesiunii și duratei de menținere a lor, cu luarea în considerare a condițiilor reale de exploatare, reprezintă o problemă esențială de care depinde în mare măsură determinarea cât mai exactă a puterii M.E. respective. [54, 56, 213]

În concluzie centrul de greutate al stabilirii datelor nominale ale M.E. destinate acționării I-R.T. se deplasează spre determinările experimentale. Numai efectuând o serie de experimentări succesive în laboratorul întreprinderii producătoare de M.E. se pot definitiva optim performanțele acestor M.E.

Pe de altă parte făcând o apreciere comparativă a diagramelor $h = f(GD^2)$ și $h_0 = f(GD^2)$ se conchide că se poate preciza mărimea unui moment inertial de înlocuire, cu care va trebui să fie încărcat un motor nesolicitat static, în cazul când se impune să aibă aceeași încălzire la un anumit h ca și unul care este solicitat static. Deoarece platformele de încercare pentru M.E. aproape în exclusivitate sînt prevăzute cu mașini de sarcină, la care variația cuplului de sarcină cu turația reprezintă o caracteristică liniară, asemenea diagrame prezintă interes la încercarea M.E. pentru acționarea I-R.T. Totodată există posibilitatea ca la probele de încălzire a M.E. respective să se renunțe la o sarcină statică, ele putînd fi încercate numai la momente inertiiale înlocuitoare calculate sau la frecvențe de conectare de înlocuire corespunzătoare.

C A P I T O L U L III

METODE DE DETERMINARE EXPERIMENTALA A PARAMETRILOR MASINILOR ELECTRICE PENTRU INSTALATIILE DE RIDICAT SI TRANSPORTAT

3.1. Generalități.

În ultima perioadă, în literatura tehnică de specialitate sînt prezentate numeroase metode noi de încercare și control a M.E. în general [14, 44, 45, 59, 77, 81, 134, 154, 159, 173, 221, 231] și a celor asincrone în special [9, 41, 42, 56, 68, 129, 163, 212, 224, 225, 236]. Aceste metode se disting în general față de metodele clasice [130] prin mărirea rapidității și eficienței de control a M.E. respective.

Studiile și experimentările efectuate în ultimii ani de autor [87, 92-95, 97-99, 101-110] precum și de alți cercetători [10, 53, 57, 95, 97, 181, 190, 206, 207, 214, 222, 223, 227-229] demonstrează elocvent atît actualitatea problemei cît și necesitatea de a modela optim programul și metodele de încercare a M.E. destinate acționării I-R.T. astfel încît să se reflecte cît mai perfect posibil condițiile de exploatare ce acționează legic asupra acestora.

Din analiza lucrărilor existente în literatura de specialitate, precum și a standardelor și prescripțiilor de încercare de largă circulație internațională, ca și a celor în vigoare în țara noastră [34-36, 41, 57, 129, 130, 159, 211, 214] rezultă că asigurarea calității acestor mașini este abordată incomplet, iar în unele cazuri tratarea acestei probleme se rezumă la o serie de recomandări constructive cu caracter general, care se rezolvă de obicei pe măsura experienței proiectanților și în raport de materialele de care se dispune. De asemenea, absența unor studii sistematice privind fiabilitatea acestor mașini, a condus și conduce încă la durate de serviciu reduse și la importante pagube cauzate de avarii și întreținere relativ dificilă a M.E. respective.

În consecință, se impune existența unor metode de încercare ce se referă la M.E. destinate acționării I-R.T., care să permită modelarea cât mai fidelă a regimurilor reale de exploatare ale acestora în scopul stabilirii unei concordanțe optime între performanțele M.E. de încercat și prescripțiile și normele în vigoare cum și a rezervelor de putere posibilă ale M.E. respective. Aceste metode trebuie să permită totodată satisfacerea și asigurarea următoarelor cerințe principale:

- un cuplu static rezistent constant pe toată durata procesului tranzitoriu de pornire (respectiv perioada de accelerare), precum și pe toată durata încercării propriu-zise^{x)};
- un moment inertial al sistemului acționat, precum și un timp de pornire, corespunzător cu cel real;
- frecvențe de conectare și durate relative de funcționare standardizate;
- servicii de funcționare tip standardizate.

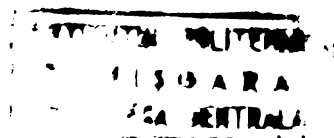
Dacă se ia în considerare în mod comparativ funcționarea M.E. în două situații distincte: cuplu static proporțional cu turația și cuplu static constant cu variația turației, se constată, pe baza unor calcule comparative efectuate în aceste două ipoteze, că în cel de al doilea caz, la o putere dată, cu creșterea frecvenței de conectare se mărește și încălzirea M.E., fapt care este cu atât mai evident cu cât puterea M.E. considerată în calcul este mai mare [87,214,227]

3.2. Clasificarea metodelor de încercare a mașinilor electrice pentru instalațiile de ridicat și transportat.

În funcție de scopul urmărit și a condițiilor de experimentare, se pot face următoarele clasificări a metodelor de încercare:

-
- x) Cuplul static rezistent constant - în special independent de turație - se întâlnește la I-R.T. și la mașinile de prelucrare prin așchiere sau deformare (mașini de găurit, strunguri, mașini de fabricat hârtie etc.). În acest caz puterea este proporțională cu turația. [156]

./.



- a) după condițiile de experimentare:
- metode de încercare (respectiv "timbrare") a motoarelor la cuplu static rezistent constant:
 - în condițiile unui stand de încercări;
 - în condițiile de exploatare reale în cadrul unei acționări date.
- b) după principiul de bază al metodei:
- metode de încercare ("timbrare") prin determinări experimentale:
 - directe (cu posibilitate de măsurare directă a cuplului și turației);
 - indirecte (determinarea cuplului efectuându-se pe bază de calcul grafoanalitic sau prin măsurători de mărimi legate funcțional de cuplu)
- c) după fenomenele puse în joc pentru absorbirea lucrului mecanic:
- mecanice (inclusiv cele hidraulice și aerodinamice);
 - electrice:
 - electromagnetice;
 - electrodinamice;
 - de încărcare:
 - cu mașini de c.c. (tarate);
 - cu mașini trifazate derivație;
 - cu grup mașină c.c. și mutator static etc.

3.3. Expunere succintă a principalelor metode de încercare cunoscute.

3.3.1. Metode de frînare mecanice.

3.3.1.1. Turnul de încercare.

Una din metodele adoptate la noi în țară (la INCERC, IFMA, ITM) este și aceea a utilizării unui turn de încercare (fig.3.1). Turnul de încercare 1, are o înălțime adecvată H (ce poate fi eventual majorată și prin crearea unei denivelări corespunzătoare) și permite ridicarea sau coborîrea unor greutăți G ce sînt antrenate de M.E. de încercat (la ridicare sau coborîre) în

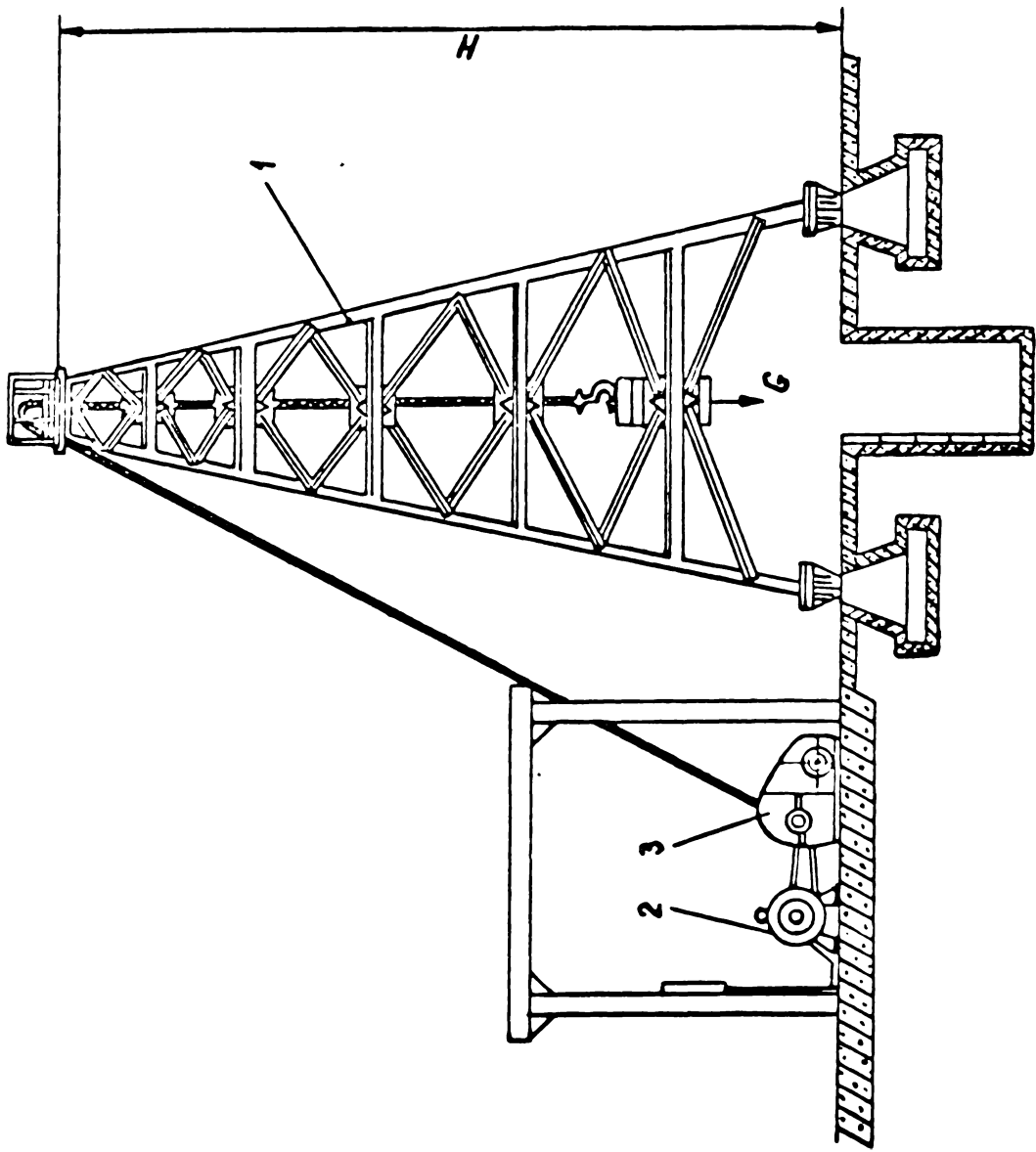


Fig. 3.1

spațiul din interiorul acestuia (pentru asigurarea condițiilor de protecție și tehnica securității muncii). Sarcina M.E. de încercat poate fi modificată în funcție de necesități, însă în mod discontinuu. [87, 92, 93, 97]

Turnul de încercare poate asigura deci o încercare apropiată de condițiile reale de exploatare și la un cuplu static constant.

Orientativ, gama de puteri pentru M.E. de încercat 2 (cuplate eventual printr-un reductor 3), se poate stabili în principiu în funcție de înălțimea turnului și de durata de ridicare sau coborîre efectivă a greutăților respective. [87,158]

Metoda expusă prezintă o serie de inconveniente și anume:

- din punct de vedere constructiv necesită un spațiu corespunzător pentru amplasarea turnului;
- situații reale pentru un număr relativ restrâns de cazuri;
- manevrabilitate dificilă (în special la adaptarea greutăților);
- cupluri parazite datorită trecerii de la starea de repaos la starea de mișcare (în procesul tranzitoriu de pornire);
- frecări în ghidaje, ce diferă la ridicare față de cele de coborîre.

Totuși metoda este de reținut mai ales acolo unde se urmărește și încercarea mecanismelor intermediare. [87]

3.3.1.2. Frîne mecanice. [130]

La aceste frîne, lucrul mecanic este absorbit și transformat în căldură prin frecare.

Aparatele de acest fel se compun, în esență, dintr-o șaibă calată pe arborele M.E. de încercat și dintr-un ansamblu de corpuri care freacă pe șaiba respectivă. Forțele care iau naștere prin frecare sînt echilibrate prin greutăți, putîndu-se determina astfel cuplul motor.

După sistemul și natura corpurilor care freacă pe șaibă, se disting:

- frîne în care corpurile care freacă sînt solide (în această categorie intrînd de exemplu frînele cu saboti și pîrghie);

- frâne în care unul din corpurile care freacă este un fluid; de obicei un lichid (frânele hidraulice).

Frâna cu saboți are o serie de inconveniente și anume:

- necesită material special pentru executarea saboților care se uzează în timp, (durata de utilizare fiind deci limitată) și după caz, un debit de apă corespunzător pentru răcirea acestora;
- unul din saboți poate prezenta o frecare parazită pe șaibă (în situația inițială);
- nu asigură reproductivitatea încercărilor la pornire;
- absența certitudinii asupra momentului de desfacere a frânei;
- produce o frînare bidirecțională, precum și abateri statice și de viteză la arborele de ieșire.

O variantă a frânelor mecanice o reprezintă dinamometrele balansoare cu fricțiune ce se compun la rândul lor, dintr-un manșon de fontă calat pe un arbore, pe care sînt apăsate elastic elementele de fricțiune. Acestea transmit cuplul de rotație la statorul basculant, ce poate fi ușor echilibrat la un cuplu constant. Se pot executa asemenea frâne pînă la circa 500 kW, cînd însă se cer măsuri speciale pentru evacuarea căldurii provenite din lucrul mecanic de frînare. Simplitatea și robustețea lor le asigură o oarecare răspîndire. Dezavantajul principal al acestora constă în instabilitatea cuplului de frecare (mai ales la turații foarte mici), uzura rapidă, încălzirea lor pronunțată și producerea unei frînări bidirecționale (cu toate că permit dezvoltarea unui cuplu aproape independent de turație). [9]

3.3.1.3. Metode de frînare hidraulice.

În vederea frînării M.E. de încercat se pot utiliza și dinamometre cu balansoare hidraulice, care se execută cu elemente de fricțiune prevăzute cu discuri netede, striate sau înclinate, cu palete, cu știfturi, cu camere alveolare, cu filtru de ulei sau volumice. Acestea sînt simple și robuste și au avantajul că se pot folosi și la puteri și turații extrem de mari și cu o precizie relativ mare; de asemenea, prezintă stabilitate în funcționare cu posibilitate de reglare ușoară și comodă. [9,130]

Un alt model practic de frână hidraulică [77,130] constă dintr-un rotor în formă de disc care se învîrtește în interiorul unei carcase metalice circulare, care constituie statorul frînei. Pe stator este amplasat brațul de pîrghie și contra-greutatea ce se poate roti, cu un unghi redus în jurul axei frînei. Pe periferia rotorului cît și pe cea interioară a statorului sînt fixate o serie de palete mici, sub forma unor dinți care se țes între ei (cei ai statorului cu cei ai rotorului) în direcție axială. Frîna este cuplată elastic, printr-un cuplaj cap la cap cu arborele M.E. de încercat.

În spațiul dintre rotor și stator se introduce apă. Prin mișcarea rotorului, paletetele fixate pe el antrenează apa, provocînd mici vîrtejuri; moleculele de apă respective se freacă la rîndul lor de paletetele statorului, care este astfel antrenat și rotit ușor, în același sens. Astfel frîna absoarbe lucrul mecanic transmis de M.E. de încercat, lucru care se transformă în căldură preluată de lichidul respectiv.

Cuplul de frecare, ce reprezintă în fond cuplul util al M.E. de încercat, se echilibrează prin greutate, iar variația sarcinii se obține prin variația cantității de apă introdusă în frînă.

Dezavantajul principal al acestui tip de frînă constă în necesitatea racordului cu apă și mai ales în existența unui cuplu foarte mic la turații joase. [9,130]

Deoarece frîna hidraulică produce o frînare bidirecțională rezultă ca necesară adaptarea unui eventual dispozitiv pentru menținerea constantă a cuplului pe timpul funcționării la variații de viteză.

Un alt gen de frînă care ar putea fi adaptat și la încercarea M.E. destinate acționării I-R.T. este și frîna electrohidraulică, realizată în țara noastră la Intreprinderea Mecanică Timișoara. [12].

Astfel de frînă nu asigură un cuplu static constant, în special în perioada de pornire.

3.3.2. Metode de frînare electrice.

3.3.2.1. La frînele de acest fel se utilizează fenomenele electrice și magnetice pentru a se transforma energia mecanică - fie parte în căldură și parte în energie electrică recuperabilă, (frîne electrodinamice) fie integral în căldură (frîne electromagnetice).

Se disting două tipuri principale de frâne electrice:

- frâne electromagnetice;
- frâne electrodinamice

3.3.2.2. Frâne electromagnetice.

O serie de constructori din țara noastră sau din alte țări, folosesc cu rezultate bune, frâne electromagnetice care se bazează pe acțiunea curenților turbionari. Un asemenea gen de frână [77] pentru puteri mici se compune dintr-un disc de oțel, fixat pe axul motorului și dintr-un sistem magnetic, așezat prin lagăre pe aceeași platformă cu M.E. de încercat, astfel încât să se poată roti cu un anumit unghi în jurul axei sale. Sistemul magnetic se compune dintr-o serie de poli magnetici așezați simetric de o parte și de alta a discului și care sînt excitați de la o sursă de c.c. [130]

La mișcarea discului în cîmpul magnetic creat de poli, se nasc în disc curenți Foucault, iar din interacțiunea acestora cu cîmpul care îi produce, rezultă un cuplu care tinde să antreneze sistemul magnetic în sensul de rotație a discului respectiv și care poate fi echilibrat de cuplul antagonist creat cu ajutorul unor greutăți atîrnate la capătul pîrghiei balanței.

Este de remarcat că la un cîmp de excitație variabil se obține un cuplu variabil, iar la o excitație constantă, acesta crește cu viteza.

Frânele electromagnetice se reglează ușor și precis, permit un reglaj manual și automat, sînt relativ simple din punct de vedere constructiv și pînă la o anumită putere nu este necesară răcirea forțată cu aer sau apă. [9, 77, 130, 147]

Inerția, disiparea de pierderi în rotorul frînei, precum și faptul că cuplul variază cu turația (la turația zero, cuplul este zero) conduc la concluzia certă că această metodă nu poate fi luată în considerare pentru scopul propus. [87]

3.3.2.3. Frâne electrodinamice.

Frîna electrodinamică (dinamul-frînă) reprezintă o mașină de c.c. obișnuită în care însă, carcasa, împreună cu polii inductori fixați pe ea, este mobilă în jurul arborelui mașinii, prin intermediul unor lagăre cu bile. Pe carcasa mașinii, se fixează o pîrghie prevăzută cu contragreutăți sau cu balanțe.

Arborele mașinii de c.c. are un cuplaj elastic ce se cuplează pe arborele M.E. de încercat. Prin învîrtirea M.E. de

încercat, în cadrul dinamului frână se exercită un cuplu, care la o M.E. obișnuită este echilibrat de cuplul de reacție al platformei M.E., dar în cazul acesta poate fi echilibrat de cuplul antagonist M dat de niște greutateți.

Cuplul util la arborele M.E. de încercat va fi însă mai mare decât M, cu valoarea cuplului M_0 corespunzător pierderilor mecanice (inclusiv cele de ventilație) și pierderilor din cadrul frânei electrodinamice (pierderi histerezis și prin curenți turbionari). Încărcarea dinamului se face de regulă pe o rezistență de sarcină. Această metodă se distinge printr-o mai mare sensibilitate și ușurință de manipulare, însă prezintă dezavantajul că pentru obținerea cuplului util la arborele M.E. de încercat trebuie făcute corelațiile date de curbe de tarare a dinamului-frână. [14, 45, 130, 134]

3.3.2.4. Metoda generatorului de curent continuu tarat.

Mărirea puterii frânelor a condus în mod implicit la necesitatea consumării energiei de frânare în afara frânei. O soluție optimă în acest sens o oferă mașina de c.c. folosită ca generator frână, la care puterea de frânare este disipată în afara frânei într-o rezistență de balast sau chiar este transmisă recuperativ rețelei. [9, 27, 130, 134]

Metoda cuplării generatorului la rețea permite recuperarea energiei și este deci foarte economicoasă. De exemplu prin această metodă se poate transforma energia mecanică a M.E. de încercat în energie de c.c., care se retransformă apoi în energie de c.a., restituindu-se rețelei de alimentare, cu excepția bineînțeles a pierderilor. Metoda își găsește aplicare mai ales pe platformele de încercări a întreprinderilor de mașini electrice. [130]

De asemenea, un avantaj mare al acestei metode îl constituie și posibilitatea de a putea obține ușor diferite forme ale curbei cuplului de frânare. Lucrând astfel cu excitație constantă pe o rețea de c.c. cu tensiune variabilă se obțin puncte stabile de funcționare cu M.E. asincrone în toate domeniile de funcționare. [9, 134] Evaluarea propriu-zisă a cuplului în regim staționar se face pornind de la relația cunoscută din literatura de specialitate [79] :

$$M = k_m \Phi i_A \quad (3.1)$$

unde:

k_m - constantă de proporționalitate conform relației

$$k_m = \frac{P}{2\pi a} N \quad (3.2)$$

Folosind o mașină de c.c. cu excitație separată și constantă, se poate presupune în prima aproximație, neglijând fenomenul de reacție a indusului, că la $I_{ex} = ct$, corespunde $\Phi = ct$ și ca atare cuplul rezultă direct proporțional cu curentul absorbit în rotorul mașinii de c.c.

$$M = k'_e \cdot I_A \quad (3.3)$$

$$k'_e = C_e I_e \quad (3.4)$$

unde:

C_e - constantă de proporționalitate. În acest mod se pot obține numai valori orientative.

În cazul când cerințele de precizie sînt mai mari se tacează mașina la $I_{ex} = ct$, și $\Omega = ct$ ca parametru variabil. Pe baza acestei evaluări experimentale a randamentului $\eta = f(I_A)$, se determină în final curbele de tarare, respectiv etalonare. Precizia metodei bazată pe măsurarea curentului absorbit de rotor, la excitație constantă este satisfăcătoare și se mărește mult dacă în locul etalonării prin intermediul curbei randamentului, tararea se face prin intermediul determinării dependenței $M=f(I_A)$ la $\Omega = ct$, măsurîndu-se direct I_A și M prin evaluarea cuplului static de reacție al statorului. O tarare la fel de precisă se poate obține folosind pentru încărcare un alt generator frînă de curent continuu cu stator basculant. Dezavantajul principal al metodei nu rezidă în cerințele de precizie, ci în faptul că metoda necesită o rețea de curent continuu de tensiune variabilă, deci un grup convertizor, mașina excitatoare și aparataj de comandă și protecție anex [9]

Conform STAS 7246/10-74 [159 pag.419] se recomandă ca în cazul folosirii unei mașini de c.c. de construcție clasică, drept generator de frînare, determinarea următoarelor caracteristici pentru mașina respectivă și anume:

- caracteristica de funcționare în gol, în regim de generator, $U_0 = f(i_e)$, la $\Omega = ct$;

./.

- caracteristica curentului de mers în gol I_0 în funcție de turație $I_0 = f(\Omega)$, pentru cuplu la arbore nul și la valoare constantă a curentului de excitație ($I_e = ct$), egală cu cea din timpul ridicării caracteristicii mecanice a motorului de încercat.

Valoarea cuplului la arbore în acest caz se determină cu relația:

$$M = k \frac{U_0}{\Omega} (I_0 + I_A) \quad (3.5)$$

unde:

k - constantă de proporționalitate.

3.3.2.5. Metodă de încercare, folosind o mașină de curent continuu cu stator basculant. [9]

În fig.3.2. este redată schema unui montaj ce poate fi folosit și la încercarea la cuplu static constant. Schema este alcătuită din următoarele părți componente: $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6$ - transformator cu tensiune secundară reglabilă, M.E. de încercat, mașină de c.c. cu stator basculant, generator de c.c., mașină primară de antrenare a generatorului de c.c. respectiv, excitatoare; $c_{1,2,3}$, contactoare; $a_{1,2}$ întreruptoare; a_3 inversor; a_4 întreruptor - scurtcircuitor pentru forțarea excitației în vederea măririi turației în pauze pentru ventilare; r_1, r_2, r_3 reostat de câmp al mașinii de c.c. cu stator basculant, reostat de excitație a generatorului de c.c. respectiv - reostat de excitație pentru excitatoare; $g_{1,2}$ voltmetre, $g_{3,4}$ ampermetre.

Dimensionarea schemei se efectuează avînd la bază puterea M.E. încercat. Transformatorul m_1 , are o putere aproximativ de două ori mai mare decît puterea nominală a M.E. și servește atît pentru reducerea tensiunii în cazul ridicării alurii curbei cuplului M.E. încercat, cît și pentru menținerea exactă a tensiunii nominale în cazul determinării punctelor esențiale. Ca atare trebuie ca tensiunea să fie reglabilă în secundar în limitele:

$$U_s \in [0,3 U_n, 1,3 U_n] \quad (3.6)$$

Mașina de c.c. cu stator basculant m_3 trebuie să permită măsurarea cuplului maxim M_{max} , respectiv a puterii

./.

maxime P_{\max} dezvoltată de M.F. de încercat, date de relațiile:

$$M_{\max} \approx \lambda M_n \quad (3.7)$$

și

$$P_{\max} \approx \lambda P_n \quad (3.8)$$

Intrucât în general și pentru intervale scurte mașina de c.c. poate fi supraîncărcată de 1,5 ori, rezultă că pentru $\lambda = 3$, puterea mașinii de c.c. cu stator basculant P_{m3} trebuie să satisfacă relația:

$$P_{m3} \approx 2 P_{m2} \quad (3.9)$$

la turații nominale apropiate.

Deoarece cuplul, respectiv puterea utilă, variază practic cu tensiunea de alimentare, relația 3.9 în final devine:

$$P_{m3} \approx 2 \left[\frac{U}{U_n} \right]^2 P_{m2} \quad (3.10)$$

La puteri date ale mașinii de încercat m_2 și ale mașinii de c.c. folosită ca frână, avînd în vedere relația 3.10, rezultă tensiunea:

$$U \approx U_n \sqrt{\frac{P_{m3}}{2P_{m2}}} \quad (3.11)$$

Deasemeni pentru grupul auxiliar:

$$P_{m4} \approx 2,5 \left[\frac{U}{U_n} \right]^2 P_{m2} \quad (3.12)$$

$$P_{m5} \approx 3 \left[\frac{U}{U_n} \right]^2 P_{m2} \quad (3.13)$$

Ca dezavantaje principale ale metodei amintite mai sus putem enumera:

- numărul de mașini rotative și prețul relativ ridicat;
- nu asigură un cuplu constant în perioada de pornire;

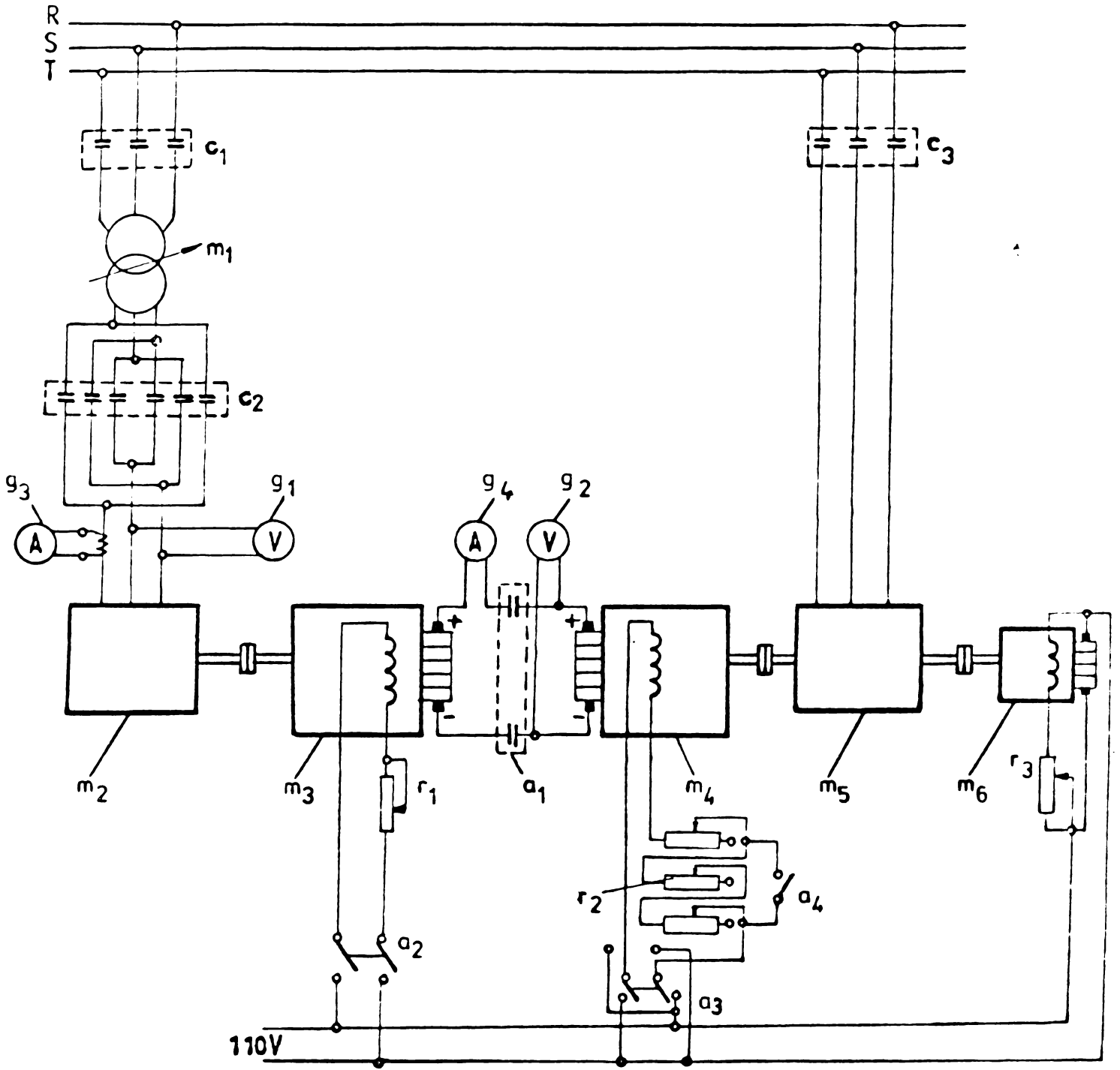


Fig.3.2

- necesită schimbarea generatorului de frînare pentru diverse game de puteri ale motorului de încercat și mai ales pentru asigurarea unui factor de inerție corespunzător.

3.3.2.6. Metodă de încercare bazată pe folosirea unei amplidine.

În fig.3.3. este redată schema unei instalații pentru încercarea la cuplu static constant, în special a M.E. de putere mică, universale. [242]

În circuitul comun al mașinii de c.c. m_1 și a amplidinei m_2 este introdusă o rezistență r_1 ce are rolul de a îmbunătăți proprietățile dinamice ale schemei.

T.e.m. dată de generatorul de frînare m_1 este proporțională cu turația M.E. de încercat m_6 . Această tensiune este în opoziție și egală în orice moment cu acea parte a t.e.m. a amplidinei m_2 ce se datorește excitației alimentată de la tahogeneratorul m_3 (întreruptorul bipolar "a" fiind pe poziția 1). T.e.m. care rezultă în acest circuit este practic constantă, deoarece circuitul de excitație este alimentat de la o sursă separată, constantă; prin urmare și curentul dat la această t.e.m. este constant și determină împreună cu fluxul constant al generatorului de c.c., un cuplu constant. De asemenea schema mai are în componența sa două tahogeneratoare m_4 și m_5 folosite atunci când se urmărește obținerea unui cuplu $M=f(\Omega)$.

În regim staționar [165] mărimea curentului I_A din cadrul circuitului comun al celor două mașini se deduce din relația (considerînd caracteristica mașinii de formă liniară):

$$I_A = \frac{U_{1G} - U_{2A}}{R_a} \quad \dots \quad (3.14)$$

în care:

U_{1G} - t.e.m. a generatorului de frînare;

U_{2A} - t.e.m. a amplidinei;

R_a - rezistența totală din circuitul comun a celor două mașini.

Pentru obținerea unei funcționări la un cuplu static proporțional cu turația, întreruptorul bipolar "a" se comută pe poziția 2. Această metodă prezintă dezavantajul principal că utilizează un număr mai mare de mașini rotative, iar puterea M.E. de încercat este limitată de puterea M.E. utilizate (în cazul în speță amplidina).

./.

3.3.2.7. Metodă de încercare folosind un grup Ward-Leonard.

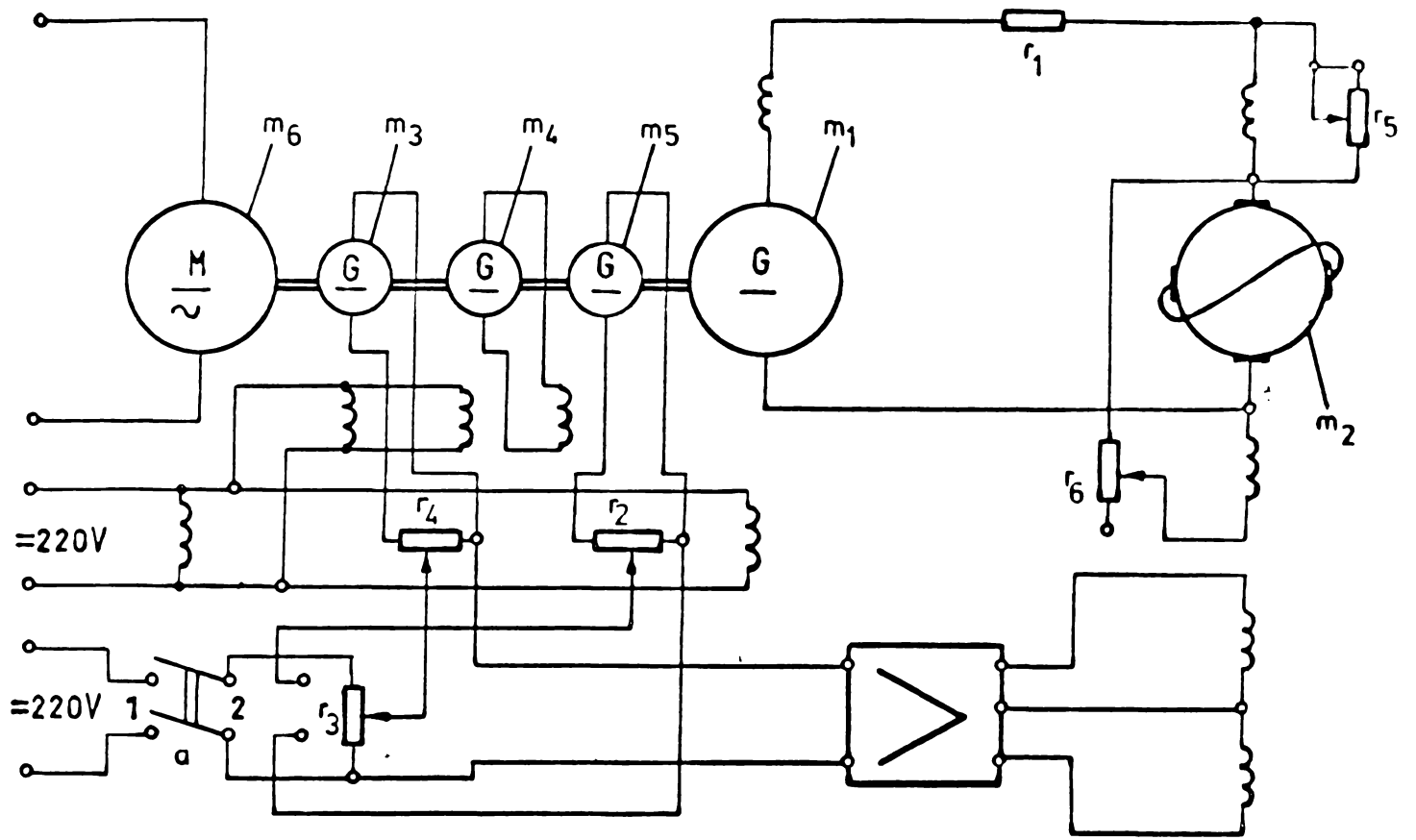
În fig.3.4. este redată o schemă privind o metodă de încercare bazată pe principiul de funcționare al grupului Ward-Leonard. [61] Mașina de c.c. m_2 antrenată de M.E. de încercat m_1 are două înfășurări de excitație alimentate alternativ de câte un A.M. [131] Regulatorul generatorului de frînare compară tensiunea obținută cu tensiunea de referință (prestabilită la valoarea dorită printr-un potențiomtru r) și corectează astfel excitația cu mărimea și sensul dat de semnalul de eroare respectiv. Semnalul ce apare este necesar trecerii excitației de la funcționarea în gol la funcționarea în sarcină. Această eroare este mică în raport cu factorul de amplificare ridicat. În perioada de accelerare intervine un limitator de curent p_1 ce reduce curentul de excitație, astfel încît curentul de sarcină al generatorului să rămînă în limitele fixate. Ca atare se poate obține o accelerare la curent constant și deci la cuplu constant, grupul auxiliar format din mașina de c.c. și M.E. asincronă m_4 putînd fi astfel comandat încît să funcționeze în regim recuperativ. Posibilitatea de a regla cuplul de accelerare, utilizînd elemente statice [8] în sistemele de excitație (A.M. sau tiristoare), conferă instalației fiabilitate și posibilitatea de a obține performanțe dinamice superioare.

Această metodă permite și recuperarea energiei, însă este costisitoare necesitînd un număr relativ ridicat pe mașini rotative. Totodată nu asigură obținerea unui cuplu static constant în momentul inițial de pornire.

3.3.2.8. Metode de încercare folosind o mașină trifazată derivație, cu stator basculant [9, 181,192]

Utilizarea unei mașini trifazate derivație cu stator basculant drept frînă reprezintă una din soluțiile cele mai moderne. Ea s-a impus net ca metodă optimă acolo unde turația nu trebuie variată decît în raportul de aproximativ 1 : 3 față de nominal. De cele mai multe ori se folosește mașina trifazată derivație cu excitație rotorică și cu perii deplasabile.

Avantajul principal al soluției constă în investiții globale mici, schema de lucru fiind foarte simplă, mașina m_1 lucrînd în regim de recuperare pe rețea (fig.3.5). Nu sînt necesare reostate, grupuri convertizoare etc., reglarea turației,



r_2, r_6 - reostate reglabile

Fig. 3.3

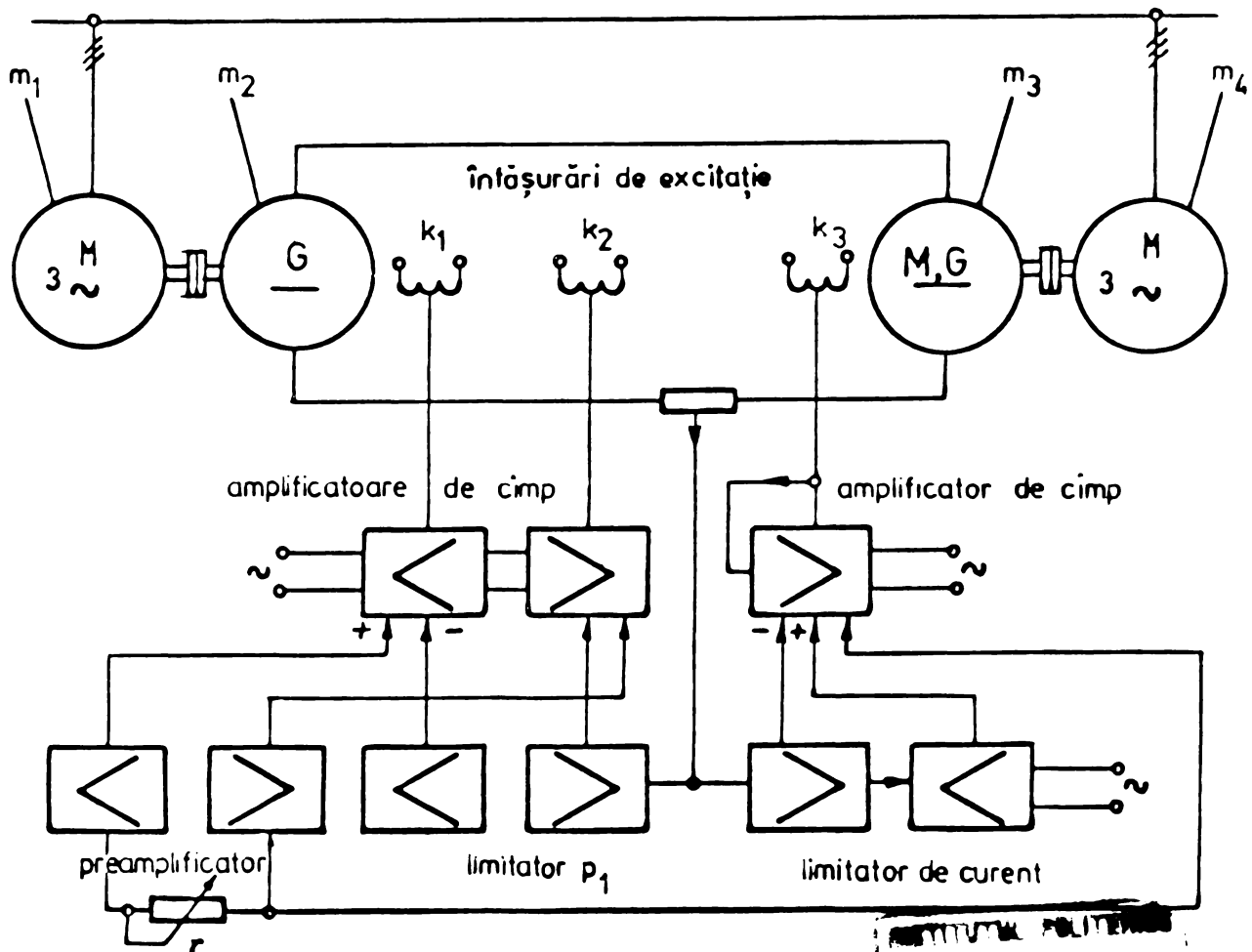


Fig. 3.4

INSTITUTUL POLITEHNIC
TIMIȘOARA
SISTEMULUI DE CONTROL

respectiv a sarcinii, făcându-se simplu prin deplasarea periilor acționate de un servomotor. Există de asemenea posibilitatea măsurării precise a cuplului. Inconvenientul principal al metodei constă în faptul că variațiile de turație sînt limitate în domeniul 1:3. De asemenea nu se poate asigura un cuplu static constant pe durata procesului tranzitoriu de pornire a M.E. de încercat.

3.3.3. Metode de frînare electrice destinate încercării mașinilor electrice pentru acționarea instalațiilor de ridicat și transportat.

3.3.3.1. Metodă de încercare bazată pe folosirea unei mașini de c.c. și a unui grup auxiliar.

La elaborarea schemei de principiu a instalației de încercare propusă în lucrarea [227] s-a pornit de la premisa că se poate menține cu suficientă aproximație curentul I_A în jurul unei mărimi constante, prin înserierea în circuitul rotoric a unui rezistor de valoare substanțial mai mare în raport cu rezistența proprie a înfășurării rotorului R_A , alimentarea acestui circuit efectuându-se cu o tensiune de valoare relativ ridicată. Aceste măsuri speciale se impun pentru respectarea condiției $I_A = ct$, indiferent de valoarea vitezei unghiulare Ω [70].

În schema din fig.3.6 mașina de c.c. m_1 , este conectată în serie cu mașina de c.c. m_2 prin rezistorul de limitare r_1 care la viteza de lucru a M.E. de încercat m_3 (cuplată mecanic cu mașina de c.c. cu rol de generator de frînare m_1) are tensiunea la borne U_1 . Această tensiune este mult mai mică decât tensiunea U_2 a mașinii de c.c. m_2 ce funcționează de asemeni ca generator. Prin urmare de la starea de repaos și pînă la viteza nominală a mașinilor cuplate, timp în care tensiunea generatorului de frînare m_1 variază de la zero pînă la $U_1 \ll U_2$, curentul I_A din circuitul rotoric a celor două mașini rămîne aproximativ constant și în consecință cuplul M va fi cuprins în limitele $M \in (M_2, M_1)$. Reglarea curentului din circuitele de excitație ale celor două mașini de c.c. se efectuează prin intermediul reostatelor r_2 și r_3 . Cuplul în această ipoteză va fi:

$$M_2 = k_e \frac{U_2}{R_a} \quad (3.15)$$

și

$$M_1 = k_e \frac{U_2 + U_1}{R_a} \quad (3.16)$$

unde:

R_a - reprezintă rezistența totală din circuitul comun a celor două M.F.

Dacă se admite ca variația relativă a cuplului în perioada de accelerare este:

$$\frac{M_1 - M_2}{M_1} = m_\alpha \quad (3.17)$$

rezultă de aici condiția:

$$\frac{U_2 + U_1}{U_1} = \frac{1}{m_\alpha} \quad (3.18)$$

sau:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1 - m_\alpha}{m_\alpha} \quad (3.19)$$

Aceasta înseamnă, făcînd abstracție de randamente, că mașina de c.c. m_2 și M.F. de antrenare m_4 dezvoltă o putere de $\frac{1 - m_\alpha}{m_\alpha}$ ori mai mare decît a generatorului m_1 , iar pierderile de putere (în regimul de lucru) sînt:

$$\dot{P}_R = (U_1 + U_2) I_A = \frac{1}{m_\alpha} U_1 I_A \quad (3.20)$$

adică de $\frac{1}{m_\alpha}$ ori puterea de încercat.

În consecință, rezultă că schema este neeconomică. Spre exemplu, pentru $m_\alpha = 1/10$, se produc pierderi aproximativ a 10-a parte din puterea M.F. de încercat (fapt ce la mașini mari nu poate fi neglijat) iar tensiunea și puterea mașinii m_2 trebuie să fie de circa nouă ori mai mare decît cea a mașinii m_1 . Totodată se pune și problema unei eventuale evacuări a cantității de căldură degajată datorită pierderilor respective.

Deficiențele prezentate la această metodă constau și în inexistența unei certitudini cu privire la valorile cuplului și curentului de pornire, în momentul pornirii, (pentru reducerea erorilor putîndu-se recurge și la o eventuală forțare a excitației). De asemenea, puterea instalată este exagerată, grupul auxiliar m_2 - m_4 trebuind să aibă o putere mult mai mare decît a grupului M.F. de încercat - mașină de c.c.

3.3.3.2. Metodă pentru încercarea în sarcină a M.E. la cuplu static constant.

Avînd în vedere cele de mai sus în cadrul laboratorului de mașini electrice de medie putere din ICPE s-a conceput și s-a realizat un model experimental al unei scheme sintetice pentru încercarea M.E. la cuplu static constant (în formă de treaptă) expusă în lucrările [87, 93].

Schema de principiu, reprezentată în fig.3.7. se bazează deasemeni pe faptul că la o mașină de c.c., cuplul electromagnetic este proporțional cu curentul total I_A , cu fluxul util și o constantă de proporționalitate (care depinde de unele mărimi constructive ale mașinii respective).

Evident, variînd curentul de excitație I_e , se modifică implicit cuplul M la un curent în înfășurarea rotorului dat, independent de viteza de rotație. [70]

În cadrul schemei amintite se poate stabili deci ecuația de echilibru a t.e.m. la curent constant, pornind de la ecuația de funcționare a mașinii de c.c. în regim de generator (fig.3.8.a):

$$U_e = R_A I_A + U_A + \Delta U_p \quad (3.21)$$

în care:

R_A - rezistența totală a înfășurării rotorului, a înfășurării polilor auxiliari și a înfășurării de compensare;

ΔU_p - cădere de tensiune în contactele perie-colector.

Neglijînd variațiile t.e.m. datorită reacției transversale a rotorului și căderea de tensiune ΔU_p . [77,78], ecuația 3.21 devine:

$$U_e = R_A I_A + U_A \quad (3.22)$$

În consecință, în conformitate cu schema din fig.3.7 se poate scrie următoarea ecuație:

$$U_{e1} + (R_{A1} + R_{A2}) I_A = U_{e2} \quad (3.23)$$

Totodată t.e.m. U_{e1} obținută de la generatorul de frînare m_1 antrenat de M.E. de încercat m_4 (considerînd fluxul $\Phi_{m1} = ct$, respectiv curentul de excitație $I_{e1} = ct$) este:

$$U_{e1} = k_{m1} \Phi_{m1} = k_1 \Omega_1 \quad (3.24)$$

Deasemeni, t.e.m. U_{e2} , dată de generatorul m_2 (considerînd fluxul Φ_{m2} și viteza de antrenare a mașinii de c.c. m_2 , constantă) va fi:

$$U_{e2} = k_{m2} \Phi_{m2} \Omega_2 = k'_2 I_{e2} \quad (3.25)$$

Deci, ecuația 3.23, ținînd cont de relațiile 3.24 și 3.25 poate fi scrisă și sub forma:

$$k_1 \Omega_1 + (R_{A1} + R_{A2}) I_A = k'_2 I_{e2} \quad (3.26)$$

sau:

$$k'_2 I_{e2} - k_1 \Omega_1 = (R_{A1} + R_{A2}) I_A = R_a I_A \quad (3.27)$$

în care:

$$R_a = R_{A1} + R_{A2} \quad (3.28)$$

unde s-a notat cu:

R_{A1} și R_{A2} - rezistențele rotorului mașinii de c.c. m_1 , respectiv m_2 ;

k_1, k'_2 - constante de proporționalitate.

Rezultă că sursele respective trebuie înseriate și ca atare dacă $R_a = ct$, atunci și curentul din circuitul rotoric va fi:

$$I_A = \frac{|U_{e1}| \pm |U_{e2}|}{R_a} = ct \quad (3.29)$$

sau:

$$|U_{e1}| \pm |U_{e2}| = ct \quad (3.30)$$

✓✓

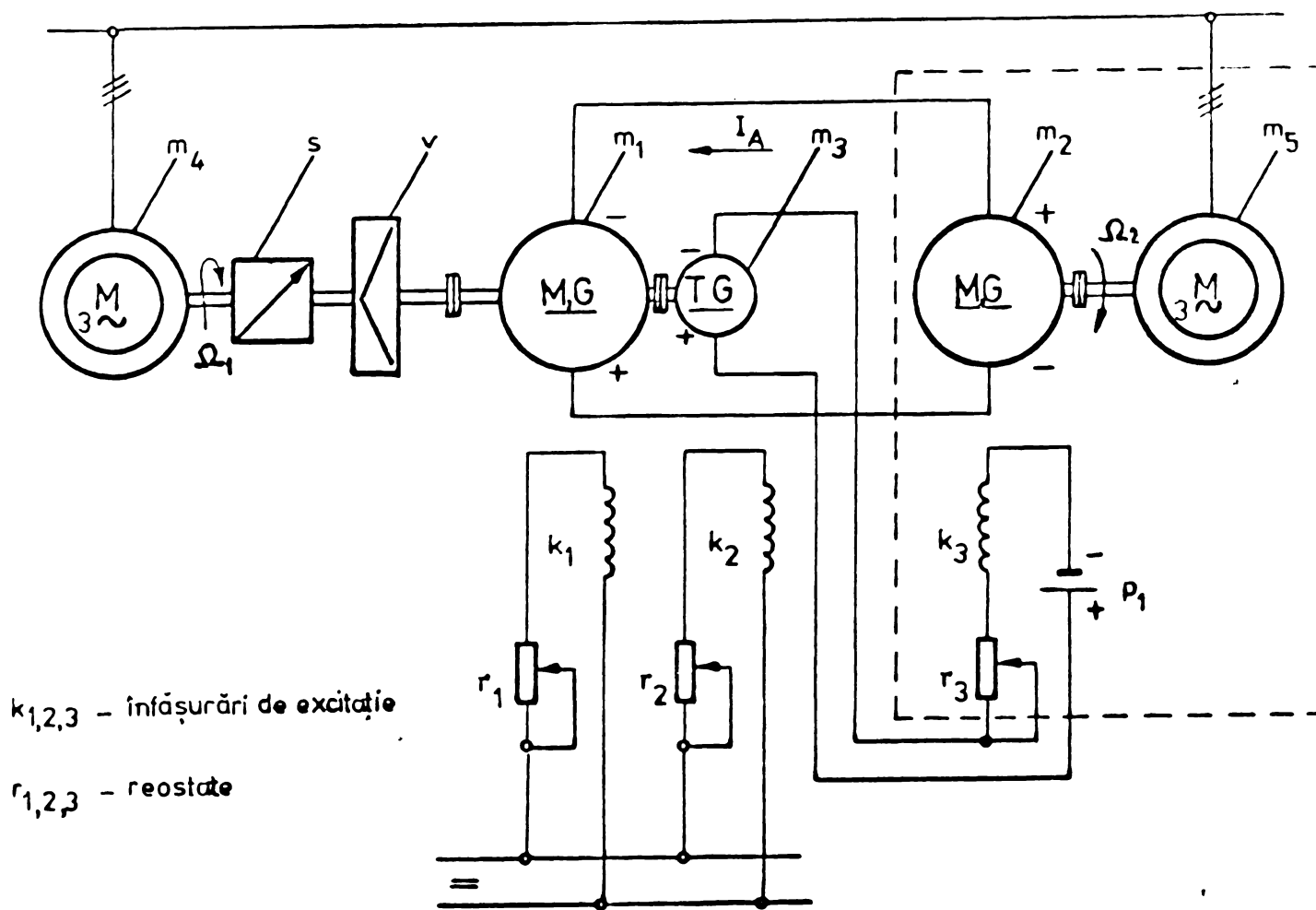


Fig.3.7

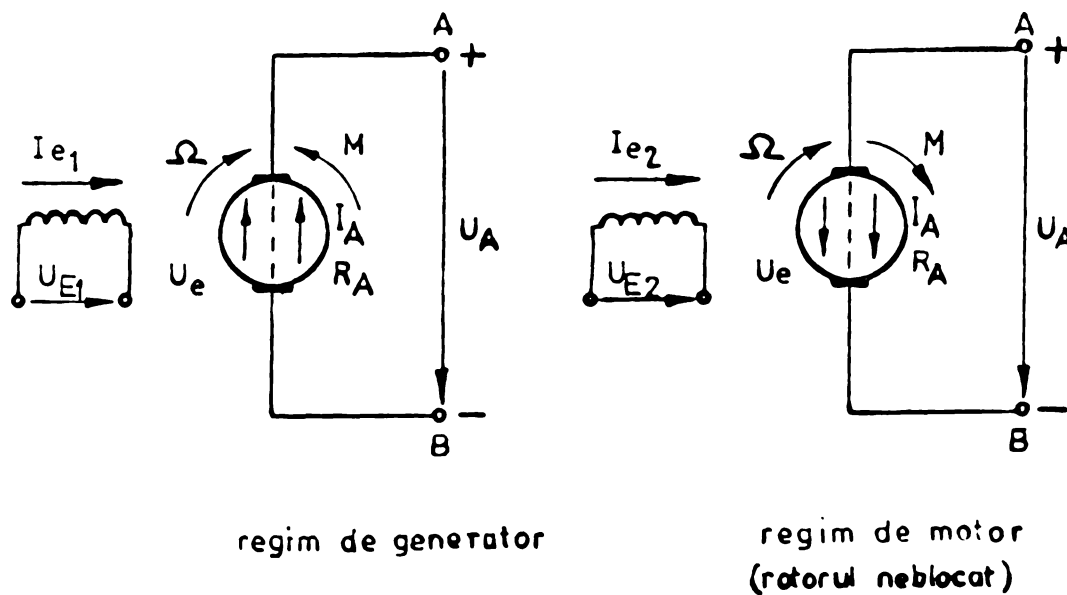


Fig.3.8

Evident, la o creștere a turației Ω_1 va corespunde și o mărire corespunzătoare a tensiunii U_{e1} , fiind necesară pentru menținerea constantă a curentului din circuitul rotor, o scădere adecvată a tensiunii U_{e2} . Acest lucru este realizabil cu ajutorul tahogeneratorului m_3 și a unei surse de c.o. constantă, notată în schemă cu P_1 .

Astfel circuitul de excitație al mașinii de c.o. m_2 va fi alimentat în permanență de tensiunea:

$$\Delta U = |U_0| - |U_{e3}| \quad (3.31)$$

unde:

U_0 - este tensiunea dată de sursa de c.o. constantă, auxiliară

iar

U_{e3} - t.e.m. a tahogeneratorului conform relației:

$$U_{e3} = k_{m3} \dot{\phi}_{m3} \Omega_1 = k_3 \Omega_1 \quad (3.32)$$

(considerînd $\phi_{m3} = \omega t$)

În consecință atunci cînd U_{e3} crește, ΔU scade și deci curentul de excitație I_{e2} al generatorului m_2 (antrenat de M.F. m_5) respectiv tensiunea U_{e2} va scădea întrucît conform relației 3.25:

$$I_{e2} = \frac{U_{e2}}{k_2'} \quad (3.33)$$

În consecință, rezultă că pentru menținerea constantă a curentului I_A , respectiv a cuplului M , între curentul de excitație al mașinii de c.o. m_2 și turația generatorului de frînare m_1 , trebuie să existe o proporționalitate, asigurată cu suficientă aproximație cu ajutorul tahogeneratorului m_3 [87]. Valorile diferite pentru constantele de timp se pot obține acționînd asupra valorii rezistențelor din circuitele de excitație.

Puterea grupului auxiliar P_u , va fi după cum urmează în cele două situații:

pentru: $\Omega_1 = 0$; $U_{e1} = 0$

$$P_u = |U_{e2}| I_A = R_A I_A^2, \quad (3.34)$$

./.

iar la o turație egală cu Ω_1 :

$$P_{u(\Omega_1)} = |U_{e1} I_A| \pm |U_{e2}| I_A = R_A I_A^2 \quad (3.35)$$

și .

$$P_{u\max} \cong |U_{e2}|_{\Omega_1\max} I_A \quad (3.36)$$

În stare de repaos generatorul de frînare m_1 are rotorul blocat prin intermediul unui sistem mecanic s (prevăzut cu clichet) care nu-i permite rotirea în sens opus, ce ar putea avea loc deoarece mașina este excitată la flux constant și parcursă de curentul I_A , produs de mașina de c.c. m_2 , (care la rîndul ei este antrenată la turația constantă de M.F. m_5 și excitată de sursa de c.c.). [87, 93] Pentru obținerea unui moment inerțial corespunzător, schema este prevăzută și cu un volant v .

În ceea ce privește grupul auxiliar, acesta se poate înlocui cu o altă sursă de c.c. echipată cu elemente statice (A.M. sau tiristoare) la care se adaugă de regulă o reacție produsă de curentul de sarcină. [10, 28, 79, 87, 92, 93, 131, 222, 223]

Pentru aplicarea acestei metode se obțin unele avantaje în ceea ce privește măsurarea cu precizie suficientă a cuplului și a puterii la arbore cu posibilitatea de a regla în limite largi, atât curentul rotoric cât și forma cuplului static. Metoda însă implică existența unei scheme și a unui aparat mai complex: grup convertizor de putere mare, tahogenerator, reostate de reglare și de sarcină etc.

3.3.3.3. Metodă de încercare folosind drept frînă o mașină de c.c. conectată la o sursă de c.c. reglabilă, echipată cu A.M.

Avînd în vedere inconvenientele metodelor expuse anterior, în lucrarea [87] s-a propus o schemă care permite menținerea unui cuplu static constant, la arborele M.F. de încercat prin înlocuirea grupului auxiliar cu un redresor comandat echipat cu A.M. în montaj autosaturat [88, 89, 90, 91, 96, 100, 111, 112, 117] , însă fără posibilitatea de recuperare a energiei în rețea.

Schema bloc a instalației (ce reprezintă de fapt o soluție originală) redată în fig.3.9, este prevăzută cu o ma-

șină de c.c. funcționând ca generator de c.c. cu rol de frînare m_1 , cuplată mecanic cu M.E. de încercat m_2 prin intermediul unui dispozitiv avînd în componența sa următoarele:

s - frînă cu mers liber într-un sens (sistem freilauf);

t - traductor de cuplu (o cuplă torsionometrică sau un sesizor de cuplu electronic);

v - volant cu inerție variabilă.

Generatorul de frînare m_1 are conectat în circuitul său rotorice un redresor reglabil cu A.M. p_1 ca element de execuție. Schema de reglaj este în buclă închisă, în cascadă. Semnalul obținut de la traductorul de cuplu t (cuplat direct la arborele M.E. de încercat) și amplificat prin intermediul unui amplificator p_2 este aplicat apoi pe una din înfășurările de reacție ale preamplificatorului trifazat p_3 , după ce se compară în prealabil cu mărimea de referință u_x .

Semnalul astfel rezultat este amplificat și aplicat pe înfășurarea de comandă a A.M. final p_1 (alimentat de către transformatorul de forță trifazat m_5). Orice abatere de la valoarea impusă prin potențiometrul de comandă r_1 (fig.3.9), se traduce printr-o scădere sau creștere corespunzătoare a curentului din circuitul rotorice a generatorului de frînare m_1 care are înfășurarea de excitație k_1 alimentată de un A.M. monofazat în montaj autosaturat p_4 și o sursă stabilizată u_1 . Este de remarcat că inerția magnetică a A.M. poate fi micșorată sensibil prin creșterea frecvenței c.a. (prin aceasta obținîndu-se totodată și o reducere a dimensiunilor de gabarit). [28, 76]

Schema electrică de principiu mai este prevăzută și cu un reglaj în scopul limitării curentului rotorice al generatorului de frînare m_1 .

În ceea ce privește traductorul de cuplu acesta poate fi de tipul TG - Vibrometer sau Hottinger. Cu asemenea cuple torsionometrice cu traductor (de tip rezistiv, inductiv, capacitiv sau piezoelectric) se pot efectua măsurători de cuplu pentru diverse M.E., atît în regim static cît și dinamic. La un anumit cuplu corespunde o anumită tensiune. [9] De exemplu, pentru un traductor de cuplu de tip TG/loo corespunde o tensiune de 0,23 mV/kgm.

Metoda are avantajul că prin înlocuirea grupului auxiliar rotativ cu un echipament static se obțin performanțe

dinamice superioare, însă funcționează cu pierderi de energie fără posibilitate de recuperare, iar precizia de menținere a cuplului static constant în perioada de pornire a M.E. este nesatisfăcătoare. Funcția de transfer, (pentru domeniul de puteri în care se folosesc A.M.), pentru mașina de c.c. în bucla de curent, (respectiv cuplu) se poate exprima prin ecuația:

$$Y_m(s) = \frac{1}{R_a} \frac{1}{1+sT_a} \quad (3.37)$$

în care:

$$T_a = \frac{L_a}{R_a} \quad (3.38)$$

R_a, L_a - reprezentînd rezistența totală, respectiv inductivitatea totală a circuitului rotor

3.4. Concluzii.

Metodele de încercare în condiții uzinale a M.E. (care în exploatare sînt cuplate cu mașini de lucru ce produc la arborele M.E. respective un cuplu static constant, atît în perioada de accelerare cît și în timpul funcționării propriu-zise) trebuie să fie astfel concepute încît să asigure încercarea acestora cu posibilitatea de a simula cît mai perfect condițiile reale de exploatare în primul rînd, în scopul stabilirii unei concordanțe optime între caracteristicile de încălzire a M.E. și prescripțiile standardelor și normelor în vigoare, iar în al doilea rînd, în vederea stabilirii cît mai corecte a rezervelor de putere posibilă ale mașinii respective. Încercările M.E. în condițiile lor reale de exploatare se efectuează rar, de aceea apare necesitatea unui control permanent al temperaturii, în special în cazul mașinilor de mare putere sau a mașinilor funcționînd în condiții grele de exploatare, cum este cazul M.E. destinate acționării I-R.T. De regulă, în această situație se încorporează în creștăturile statorului M.E. respective, detectori de temperatură, constituiți, după caz, din termocuple sau termistoare.

Există o mare varietate de metode ce pot fi luate în considerare pentru încercarea M.E. destinate acționării I-R.T.

În publicațiile de specialitate atît în cele mai vechi [130,154,181] , cît și în cele recent apărute [134,159] se tratează îndeosebi în principiu posibilitatea de a determina pe cale experimentală performanțele M.E., fără a se intra în metode concrete de măsurare și fără a se arăta dificultățile care apar în special la încercarea M.E. destinate acționării I-R.T. care funcționează în regim intermitent și la cuplu static rezistent constant atît în perioada de pornire cît și pe durata încercării propriu-zise.

Literatura citată recomandă pentru încercarea M.E. asincrone (și în special în scopul determinării caracteristicii mecanice) folosirea unei mașini de c.c. cu stator basculant, lucrînd pe o rețea de c.c. de tensiune variabilă, metoda prezentînd o serie de avantaje substanțiale tehnico-economice. [9, 14, 134]

Din analiza metodelor de încercare prezentate rezultă că o parte din acestea nu asigură un cuplu static rezistent constant impus de condițiile de încercare, iar altele care asigură realizarea unui asemenea cuplu, au o precizie nesatisfăcătoare și prevăd folosirea unor instalații scumpe, ancrumbrante și cu pierderi de energie sau cu posibilitatea de recuperare parțială a acesteia.

În consecință este necesară soluționarea problemei prin găsirea unei metode și realizarea unei instalații de încercare adecvate care să permită satisfacerea integrală a dezideratelor principale, pentru o instalație de încercare privind M.E. funcționînd în regim intermitent ca în cazul M.E. destinate acționării I-R.T. și obținerea unei simulări perfecte a condițiilor din exploatare, ca atare impunîndu-se realizarea unei instalații cu un înalt grad de precizie, economică, simplă în funcționare și fiabilă. [93,214]

În capitolele ce urmează este descrisă o asemenea instalație (inclusiv variantele posibile) și sînt tratate aspectele teoretice și experimentale legate de aceasta. . .

C A P I T O L U L IV

METODA SI INSTALATIE DE INCERCARE A MASINILOR ELECTRICE DESTINATE ACTIONARII INSTALATIILOR DE RIDICAT SI TRANSPORTAT

4.1. Condiții tehnice specifice instalațiilor de încercare a mașinilor electrice destinate acționării instalațiilor de ridicat și transportat.

4.1.1. Instalațiile pentru încercarea M.E. destinate acționării I-R.T. trebuie să permită asigurarea următoarelor condiții specifice (exceptând condițiile tehnice cu caracter general):

4.1.1.1. Încercarea M.E. destinate acționării I-R.T. la cuplu static constant atât în momentul pornirii (în procesul tranzitoriu) cât și pe toată durata încercării propriuzise.

4.1.1.2. Realizarea regimurilor de funcționare și serviciilor tip conform prescripțiilor și normelor în vigoare (obținerea D.A. și frecvențelor de conectare h , conform STAS 1893-72 și STAS 4762-64).

4.1.1.3. Efectuarea încercărilor la un moment inertial al sistemului acționat bine stabilit în raport cu cel propriu al M.E. destinate acționării I-R.T. de încercat (la un factor de inerție F.I., conform STAS 1893-72).

4.1.1.4. Efectuarea pornirilor, frînărilor, opririlor, inclusiv a inversărilor sensului de rotație) pentru M.E. de încercat în condiții de tensiune, frecvență, mediu climatic, temperatura mediului ambiant etc. conform normelor și prescripțiilor în vigoare (având în vedere STAS 6968/1-75).

4.1.1.5. Realizarea unei frînări a M.E. de încercat în două situații: alimentată sau nealimentată de la rețea.

4.1.2. Instalația de încercare I.M.E. va corespunde categoriei II de exploatare:

- temperatura maximă a aerului $+50^{\circ}\text{C}$;
- temperatura minimă a aerului -35°C ;
- variația temperaturii aerului în opt ore: 10°C ;
- umiditatea relativă maximă a aerului la temperatura de 35°C : 85 %;

./.

- altitudine maximă: 1000 m.

4.1.3. Verificarea calității M.E. destinate acționării I-R.T. se va efectua conform regulilor și metodelor prevăzute în STAS 6968/1-75 [159 pag.508], cu precizarea că încercarea în sarcină a acestor M.E. se va realiza prin folosirea unei instalații care să asigure condițiile tehnice prevăzute la punctele 4.1.1. și 4.1.2.

4.2. Schema de principiu a instalației de încercare (I-M.E.).

4.2.1. Funcționarea schemei.

Condiția esențială impusă a priori de a simula cât mai fidel posibil regimurile de funcționare reale ale M.E. destinate acționării I-R.T. a condus cum era firesc, la necesitatea de a elabora o metodă și a realiza o instalație care să permită obținerea unui cuplu static rezistent (în formă de treaptă) sau a unui cuplu static variabil după o lege dată, atât în procesul tranzitoriu de pornire cât și pe toată durata încercării propriu-zise. [87, 99, 105, 116, 142, 190, 227]

Schema bloc a instalației de încercare (I-M.E.), concepută de autor [99] (care prevede posibilitatea reglării directe a cuplului la o valoare prestabilită la arborele M.E. de încercat), este redată în fig.4.1. și se compune din patru subansamble distincte (exclusiv M.E. de încercat propriu-zisă, m_1) și anume:

4.2.1.1. Mașina de curent continuu (M.C.C.) cu excitație separată m_2 , (inclusiv blocul de alimentare a circuitului de excitație al mașinii de c.c., p_3 , ce cuprinde o sursă de c.c. stabilizată u_3 cu posibilitate de reglare, menținere constantă sau inversare a curentului de excitație), avînd înseriate în circuitul rotor, după caz, o bobină de filtrare k_1 și un șunt de măsură k_2 .

4.2.1.2. Mutator static comandat (M.S.C.) în montaj punte trifazată u_1 , (inclusiv dispozitivul de comandă pe grilă a tiristoarelor (D.C.G.) p_1 , cu regulatorul de cuplu p_2) alimentat de la un transformator m_3 prin intermediul unui bloc de comandă și protecție u_5 .

4.2.1.3. Dispozitiv special (D.B.M.) pentru realizarea unui moment inerțial adițional, blocarea mecanică a roto-

rului M.E. de încercat ω și pentru reglarea și măsurarea cuplului la arborele M.E. respective, (alcătuit dintr-un volant cu inerția variabilă v , o frână mecanică unidirecțională - gen "freilauf" s , respectiv un traductor de cuplu t);

4.2.1.4. Dispozitiv de programare și comandă (D.P.C.), a M.E. de încercat care asigură impunerea mărimii de referință și a regimurilor de funcționare a I.M.E. conform prescripțiilor și normelor în vigoare (alcătuit în principal dintr-un programator electronic u_2 , un bloc de impunere a mărimii de referință p_5 (și după caz, un generator de funcții p_6), inclusiv blocul de comandă și protecție u_4 a M.E. de încercat m_1).

Principiul metodei se bazează de asemeni pe expresia generală cunoscută din literatura de specialitate [11, 55, 60, 70, 77, 79, 135, 143, 154, 170, 192], care indică că la o mașină de c.c., cuplul electromagnetic este direct proporțional cu fluxul util, curentul rotoric și o constantă de proporționalitate depinzând de unele mărimi constructive ale mașinii de c.c. respective. [55, 70, 79] Menținerea fluxului constant, respectiv a curentului rotoric, conduce în mod implicit la obținerea unui cuplu constant, indiferent de variațiile turației.

Sistemul mașină de c.c. - mutator static comandat (cu funcționare reversibilă) din cadrul instalației de încercare I-M.E. ce face obiectul prezentei lucrări, prezintă unele particularități în funcționare, care o caracterizează și anume:

a) în momentul inițial de pornire a M.E. de încercat, mutatorul static funcționează ca redresor comandat, având drept sarcină mașina de c.c. ce se află în regim de motor, cu rotorul blocat (prin intermediul unei frâne cu mers liber într-un singur sens, de tip freilauf s , în vederea obținerii unui cuplu static rezistent constant încă din momentul $t < 0$);

b) în timpul procesului tranzitoriu de pornire a M.E. de încercat se produce o comutare automată a sistemului mașină de c.c.-mutator (cu structură variabilă), din regim de redresor comandat - motor de c.c. (cu rotorul blocat), în regim de generator de c.c. (cu rotorul liber) - invertor comandat, cu comutație forțată de la rețea;

c) pe toată durata încercării propriu-zise, sistemul mașină de c.c. mutator funcționează în regim de generator de

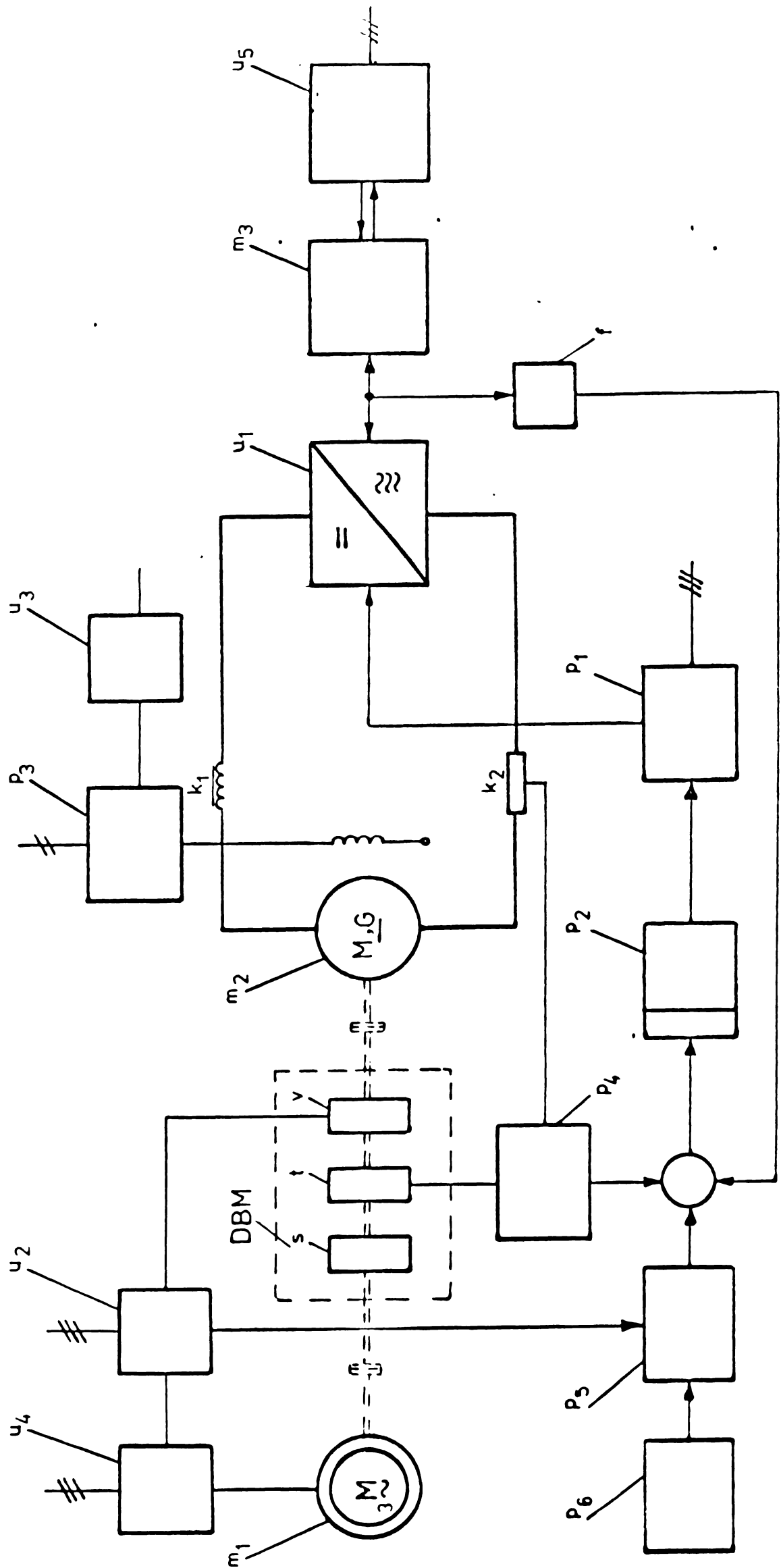


Fig. 4.1

c.c. cu recuperare, (debitînd în rețeaua de c.a.)^{x)}, reglarea cuplului la arborele M.E. de încercat la valoarea prestabilită fiind asigurată de S.A.

Controlul cuplului la valoarea prescrisă încă din momentul inițial de pornire ($t < 0$), este asigurată prin intermediul a două bucle de reglare, din care una externă, care preia mărimea de reacție de la un traductor de cuplu (t), cu performanțe dinamice superioare și una internă de protecție și limitare a curentului din circuitul rotoric, atât la anclanșare cât și pe toată durata procesului de încercare, (mărimea de reacție fiind preluată în acest caz de la un traductor de curent f).

Reglarea acestor mărimi se face cu un regulator electronic p_2 de tip P.I.D. (cu structură variabilă) alcătuit dintr-un amplificator tranzistorizat, cu factor corespunzător de amplificare. Obținerea unei precizii de reglare în limitele permise se efectuează prin compararea permanentă a valorii impuse cu cea reală, fapt ce conduce la reducerea apreciabilă a influențelor mărimilor perturbatoare (și în special a perturbației de sarcină). Regulatorul de cuplu în fond acționează asupra mărimii care evoluează cel mai rapid, adică asupra curentului din circuitul comun al mașinii de c.c. și mutatorului, asigurându-se astfel o bandă de trecere, respectiv o pulsație de tăiere mare.

În consecință semnalul rezultat din compararea celor două mărimi obținute de la blocul de referință p_5 și respectiv de la amplificatorul traductorului de cuplu p_4 , este aplicat regulatorului p_2 (din componența D.C.G.), determinînd astfel ajustarea corespunzătoare a unghiului de comandă al tiristoarelor. Acest fapt, conduce în final la modificarea valorii curentului din circuitul rotoric al mașinii de c.c. respectiv a cuplului la arborele M.E. de încercat.

Instalația de încercare I-M.E. mai este prevăzută cu sisteme de comandă, protecție, semnalizare și aparataj de măsură corespunzător. Astfel I-M.E. are în componența sa dispozitive de protecție la supracurenți sau supratensiuni precum și un dispozi-

x) Dacă invertorul nu debitează pe o rețea cu frecvență pre-determinată și se folosește o mașină sincronă proprie, frecvența poate fi modificată în limite largi, variînd viteza mașinii și în același timp unghiul de aprindere al invertorului comandat, în care caz sistemul are o frecvență autodeterminată. [27; 79]

tiv de protecție la o eventuală dispariție a tensiunii rețelei de alimentare. Dispozitivul de programare și comandă (D.P.C.) cu care este dotată instalația, asigură obținerea atât a unui cuplu static constant, la regimurile de funcționare și serviciile tip în conformitate cu un ciclu prestabilit, cât și posibilitatea de încercare la sarcini bruște sau la un cuplu static reglat după o lege dată, în care caz programatorul u_2 poate genera un semnal corespunzător dat de un generator de funcții p_G .

4.2.2. Considerații avute la elaborarea soluției pentru instalația de încercare.

Premisa esențială - modelarea cât mai exactă a regimurilor reale de exploatare a M.E. de încercat, în vederea stabilirii performanțelor acestora - a putut fi soluționată optim prin combinarea din punct de vedere funcțional a unui sistem mașină de c.c.-mutator cu structură variabilă, cu niște dispozitive speciale mecanice, respectiv electronice.

Sistemul mașină de c.c.-mutator (folosit în cadrul instalației de încercare), alimentat numai de la rețeaua de c.a., întrunește toate calitățile unui grup redresor comandat - M.E. (tot mai des întâlnit în A.E. industriale). [25, 27, 28, 79]

Asemenea sisteme permit reacții de tensiune sau curent, fapt ce asigură obținerea unor caracteristici de formă specială (de exemplu cuplu static constant în formă de treaptă, limitarea curentului, etc.). [28, 79]

De asemenea, sistemul mașină de c.c. mutator asigură o gamă mare de reglare a vitezei, viteză mare de răspuns și permite o mai largă posibilitate de automatizare, funcționarea în regim de invertor a mutatorului putînd fi utilizată la încercarea în sarcină a M.E., întocmai ca frînarea în regim de generator sau recuperare, prin aceasta obținîndu-se în același timp și însemnate economii de energie electrică. [79]

Totodată sistemele de acest fel prezintă un randament ridicat, o inerție, o greutate, un preț de cost și un spațiu necesar amplasării mai mici în comparație cu grupurile clasice (de exemplu Ward-Leonard). Pe lângă avantajul esențial de a obține caracteristici de formă specială simultan cu recuperarea energiei folosită la încercare, este de menționat că la funcționarea în regim de generator sau recuperare, punctele de intersecție ale liniilor cuplurilor acestuia cu curba cuplului M.E. asincrone de

încercat, reprezintă puncte de funcționare stabilă.

Utilizarea frânei mecanice, care permite o blocare silențioasă și practic instantanee a rotorului mașinii de c.c., are ca scop principal obținerea fără salturi bruște de curent, respectiv de cuplu și fără a modifica poziția inițială a rotorului M.E. de încercat (legată de zonele preferențiale magnetice ale acesteia) a unui cuplu static constant chiar din momentul inițial de pornire. [122, 220] Totodată blocarea rotorului mașinii de c.c. prin intermediul frânei mecanice, conduce la obținerea unei puteri instalate a motorului comparabile cu puterea mașinii de c.c. folosită ca generator de sarcină. (pct.3.3.4.)

Folosirea unui traductor de cuplu la reglarea direcției a cuplului la arborele M.E. este determinată de faptul că în regim dinamic, în special în perioada de pornire, datorită fenomenelor de neliniaritate univocă (saturație, variație neliniară a rezistenței de contact a periilor etc.) sau neunivocă (fenomenul de histerezis) expresia cuplului are forma:

$$M = k_m \Phi (I_A) I_A \quad (4.1)$$

Aceste fenomene influențează în mod sensibil funcționarea mașinii de c.c. neexistând deci o proporționalitate riguroasă între cuplul electromagnetic și curentul rotoric.

Dotarea instalației de încercare cu un dispozitiv de comandă și programare rezultă ca urmare atât a necesității de a asigura regimurile de funcționare corespunzătoare cât și a unui cuplu static constant sau variabil după o lege prestabilită.

În consecință, preponderența avantajelor instalației de încercare I-M.E. (realizată cu un scop bine precizat), compensează evident dezavantajele ce apar în funcționarea unor asemenea instalații și anume:

- un factor de putere mai redus;
- necesitatea ca mașina de c.c. să aibă un gabarit mai mare cu cca. 10 %, datorită încălzirilor suplimentare provocate de armonicile de curent;

Realizarea unor instalații de acest fel conduce implicit la satisfacerea cerințelor actuale pe plan mondial cu privire la finețea măsurărilor și a performanțelor care le prezintă.

.Instalația de încercare realizată și aplicată în industrie, reprezintă o soluție originală concepută în premieră în țara noastră, [99] fiind totodată net superioară prin avantajele pe care le prezintă din punct de vedere funcțional și tehnico-economic, altor soluții ce ar putea fi luate în considerare sau adaptate în scopul încercării la cuplu static constant în condițiile specificate anterior a M.E. destinate acționării I-R.T. [7, 31, 53, 59, 68, 69, 181, 221-223]

În continuare se analizează regimul de funcționare al unui mutator static comandat, funcționând în regim de redresor sau invertor la alimentarea unei mașini de c.c. cum și regimul de funcționare al unei mașini de c.c. alimentată de un asemenea mutator.

4.3. Regimul de funcționare a unui mutator static comandat la alimentarea unei mașini de c.c.

Analiza funcționării unui mutator static comandat, care alimentează o mașină de c.c. se poate efectua pornind de la considerentul că transformatorul de alimentare a mutatorului are secundarul în stea în conexiune simplă trifazată (fig.4.2.a.). [75, 100, 138, 155, 208]

Din punct de vedere electric, rotorul mașinii de c.c. poate fi înlocuit printr-un circuit echivalent format din:

o t.e.m. U_g , în serie cu o bobină de inductivitate L și o rezistență ohmică R , (pentru simplificare neglijându-se reactanța de comutație sau reactanța totală de scăpări a transformatorului). [49, 75, 155, 167, 184, 248]

În aceste condiții există două regimuri de funcționare distincte ale mutatorului: regim de conducție discontinuă, respectiv de conducție continuă.

În cazul regimului de conducție discontinuă (fig. 4.2.b), curentul dintr-un tiristor se anulează înainte ca tiristorul următor să fie deschis. Acest regim în practică are loc în cazul circuitelor de inductivitate redusă.

În cazul regimului de conducție continuă (fig.4.2.c) în momentul deschiderii unui tiristor, curentul din tiristorul precedent nu este încă anulat (din cauza reactanței de comutație), existînd astfel un transfer sau o comutație de curent de

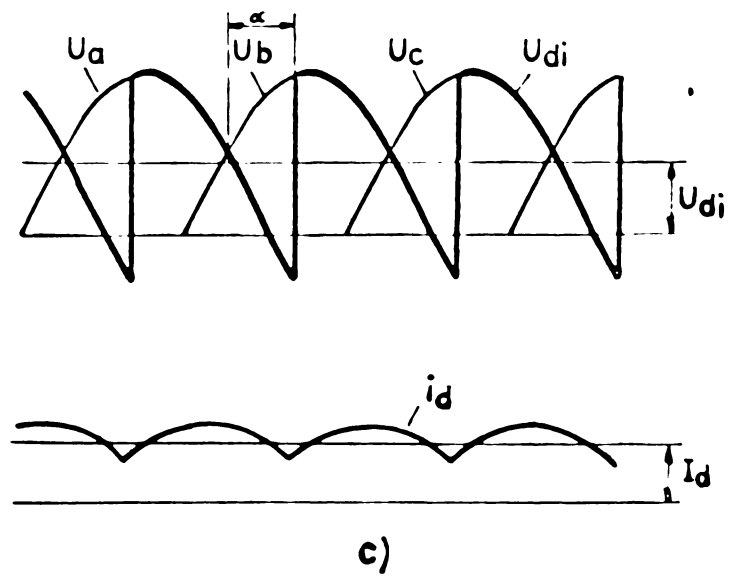
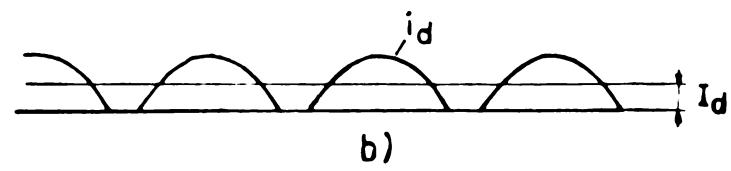
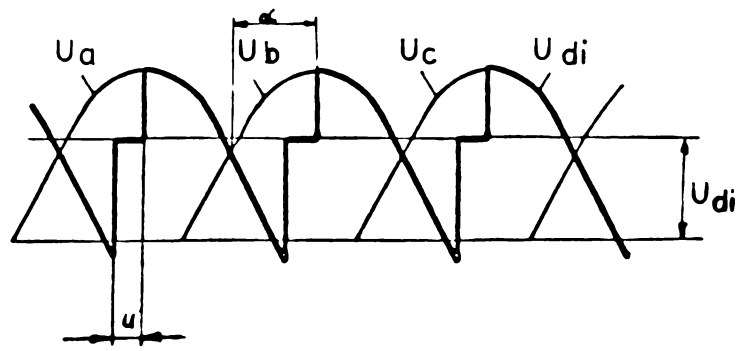
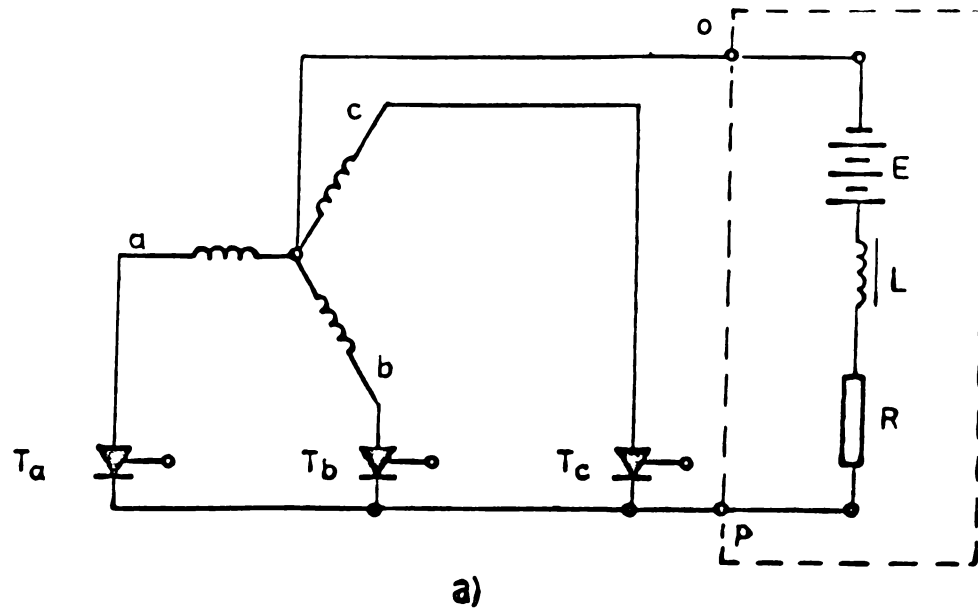


Fig. 4.2

la un tiristor la altul^{x)}. [184]

Comutația de la un tiristor la altul se poate efectua numai cu condiția ca tensiunea la bornele tiristorului care se deschide să fie în valoare algebrică superioară tiristorului ce-l precede în timp. Dacă se reprezintă (fig.4.3) tensiunile anodice a două tiristoare consecutive U_a și U_b , comutația de la anodul a la b va fi posibilă numai între momentele t_A și t_B , adică $0 < \alpha < \pi$ (α fiind unghiul de comandă^{xx)}).

Este imperios necesar ca în plus comutația să fie terminată în momentul t_B și chiar într-un timp mai scurt pentru a permite blocarea tiristorului T_a înainte ca tensiunea la bornele sale să se inverseze și să devină pozitivă.

În general se pot produce deranjamente în funcționarea invertorului în următoarele situații dacă:

- a) tiristorul T_b se deschide prea târziu ($\alpha > \pi$);
- b) chiar cu $\alpha < \pi$, curentul debitat este astfel încît comutația nu este terminată în momentul t_B ;
- c) unghiul de comutație este prea mic, tiristorul nefiind blocat în momentul t_B va fi incapabil de a bloca tensiunea pozitivă apărută la bornele sale;
- d) tiristorul T_b nu se deschide (este ratată aprinderea).

În toate aceste cazuri, tiristorul T_a va continua să conducă de la punctul B, urmărind partea pozitivă a sinusoidelor, iar tensiunea invertorului se adaugă atunci la tensiunea continuă, în loc să se opună. [167,184]

Pentru mutatoarele trifazate, conducția începe să devină continuă de la o anumită valoare a sarcinii nominale, denumită sarcină critică.

x) Perioada de transfer a curentului de la un tiristor la celălalt, este denumită perioadă de suprapunere (sau de comutație) anodică și căreia îi corespunde unghiul u_0 în regim necomandat, respectiv unghiul u în regim comandat. [64,153, 162]

xx) Unghiul de comandă reprezintă întârzierea exprimată în grade electrice cu care un tiristor primește comanda pe grilă, față de momentul în care tensiunea anod-catod a tiristorului respectiv devine pozitivă. . . .

Admițînd că inductivitatea circuitului de c.c. este suficient de ridicată astfel încît să se obțină o conducție neîntreruptă, (chiar în timpul intervalelor cînd tensiunea anod-catod a tiristoarelor va fi negativă) valoarea medie aritmetică a tensiunii continue nefiltrate, (egală cu valoarea medie a tensiunii din secundarul transformatorului U_s pe durata de conducție a unui tiristor $T = 2\pi/m$), poate fi scrisă sub forma:

$$u_{di} = \frac{1}{T} \int_0^T u_s(x) dx = \frac{\sqrt{2}U_s m}{2\pi} \int_{-\pi/m}^{\pi/m} \cos x dx = \sqrt{2}U_s \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} \quad (4.2)$$

unde s-a neglijat reactanța de comutație și căderea de tensiune datorată tiristoarelor. [100,167]

Dacă $m=3$, relația 4.2. devine:

$$u_{di} = \sqrt{2}U_s \frac{3}{\pi} \sin \frac{\pi}{3} = 1,17 U_s \quad (4.3)$$

În cazul unui mutator static comandat tensiunea medie redresată este:

$$u_{di\alpha} = \frac{\sqrt{2}U_s m}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{m} + \alpha}^{\frac{\pi}{m} + \alpha} \cos x dx = \sqrt{2}U_s \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha \quad (4.4)$$

Ținînd seama de relația 4.2 se poate scrie în continuare:

$$u_{di\alpha} = U_{di} \cos \alpha = U_{di} \cos \left(\frac{\pi}{2} + k_0 u_0 \right) \quad (4.5)$$

unde:

k_0 - constantă de proporționalitate;

și

$$\alpha = \arccos \frac{u_0}{u_{cmax}} \quad (4.6)$$

Este de remarcat că pentru $\alpha > \frac{\pi}{2}$, $U_{di\alpha}$ devine negativ, ceea ce corespunde funcționării mutatorului în regim de invertor. [18, 167, 208]

În consecință în cazul în care în circuitul de sarcină există o t.e.m. sau o sarcină inductivă (de exemplu o mașină

de c.c.), valoarea medie a tensiunii redresate poate să devină mai negativă, sensul de circulație al curentului menținându-se ca și în cazul unei tensiuni medii redresate pozitive. În aceste condiții se schimbă sensul de circulație al energiei între rețea și mașina de c.c. care va funcționa în acest caz ca generator, rețeaua de distribuție reprezentând sarcina acestuia. Totodată este însă necesar să se inverseze polaritatea mașinii de c.c. față de polaritatea corespunzătoare funcționării ca motor corelat cu manevrarea comenzii pe grilă a tiristoarelor, astfel încât să se producă deschiderea acestora la momentele potrivite. Mutatorul transformă astfel energia de c.c. a sursei în energie de c.a., funcționând în regim de invertor, transmisia energiei din spre mutator către rețeaua de distribuție efectuându-se la frecvența rețelei respectiv la o frecvență constantă. [138,151, 167,208]

Dacă se face în continuare raportul tensiunilor din relația 4.5. se obține:

$$K_{\alpha u} = \frac{U_{di\alpha}}{U_{di}} = \cos \alpha \quad (4.7)$$

în care s-a notat:

$K_{\alpha u}$ - adâncimea reglajului tensiunii redresate [155]

Deasemeni, prin derivare se obține:

$$dU_{di\alpha} = - U_{di} \sin \alpha d\alpha \quad (4.8.)$$

sau:

$$\frac{dU_{di\alpha}}{d\alpha} = g = - U_{di} \sin \alpha \quad (4.9)$$

în care:

g - reprezintă factorul de reglaj al mutatorului^{x)}.

În situația în care inductivitatea circuitului de sarcină este nulă (regim de curent întrerupt), caracteristica

^{x)} Factorul de reglaj poate fi parțial caracterizat prin raportul dintre variația tensiunii de la ieșirea mutatorului și variația unghiului de comandă, reprezentând în același timp panta caracteristicii $u_{di\alpha} = f(\alpha)$.

$U_{di\alpha} = f(\alpha)$ este sensibil diferită [184], iar conducția este discontinuă pentru tot domeniul de reglaj. Deasemeni, odată cu deformarea caracteristicii externe a mutatorului, se modifică în proporție însemnată și factorul de reglaj g .

În acest caz expresia 4.5. nu mai este valabilă, iar ecuațiile acestei caracteristici se modifică.

Astfel pentru $\alpha > \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}$, apare regimul de curent întrerupt iar în limitele $\alpha_1 = \frac{\pi}{2}$ și $\alpha_2 = \frac{\pi}{m} + \alpha > \frac{\pi}{2}$, curentul este nul.

Tensiunea medie redresată în acest caz va fi:

$$U_{di\alpha} = \frac{m}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{m} + \alpha}^{\pi/2} \sqrt{2}U_s \cos x dx = \frac{m}{2\pi} \sqrt{2}U_s \left[1 - \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{m}\right) \right] \quad (4.10)$$

Având în vedere relațiile 4.2. și 4.10. se obține pentru $K_{\alpha u}$ expresia:

$$K_{\alpha u(u=0)} = \frac{1 - \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{m}\right)}{2 \sin \frac{\pi}{m}} \quad (4.11)$$

În ceea ce privește caracteristica externă a mutatorului $U_{di} = f(I_d)$, unghiul de comandă nu face altceva decât să micșoreze valoarea inițială a tensiunii medii redresate de la U_{di} la $U_{di\alpha}$, panta caracteristicii rămânând neschimbată în timp ce unghiul de comutație scade cu creșterea unghiului de comandă. [155]

În fig.4.4. este redată caracteristica de comandă $K_{\alpha u} = f(\alpha)$ a unui mutator static trifazat în două variante: pentru $L \neq 0$ (curba 1) și pentru $L = 0$ (curba 2), unghiul de suprapunere fiind neglijat. În fig.4.5. este redată alura caracteristicii externe a unui mutator $U_{di\alpha} = f(I_d)$ în care pentru un unghi α dat, s-au considerat pe caracteristica respectivă două ramuri distincte: prima ramură a cărei pantă este foarte ridicată corespunde unui regim de conducție discontinuă, iar cea de a doua, orizontală, unei funcționări în regim de conducție continuă, (punctul M corespunzând curentului critic).

Plecând de la caracteristica $U_{di\alpha} = f(I_d)$ cu α ca parametru se pot obține și alte curbe caracteristice privind comportarea mutatorului ca element de reglare cum este cazul carac-

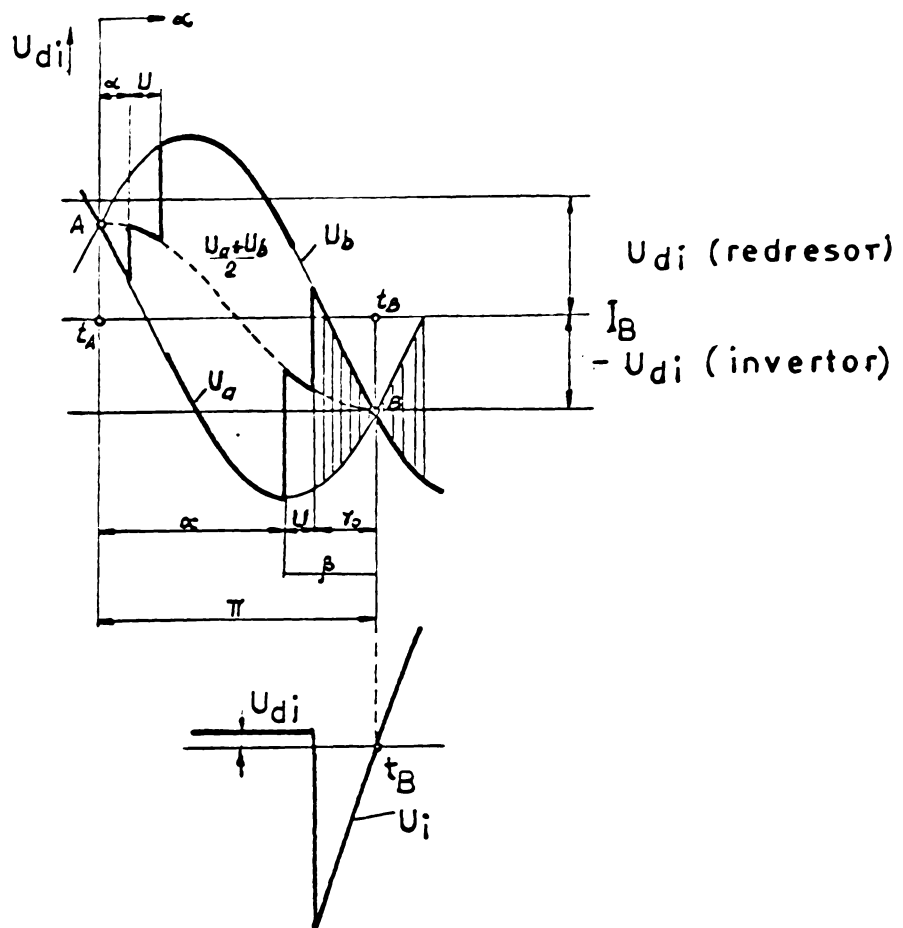


Fig. 4.3

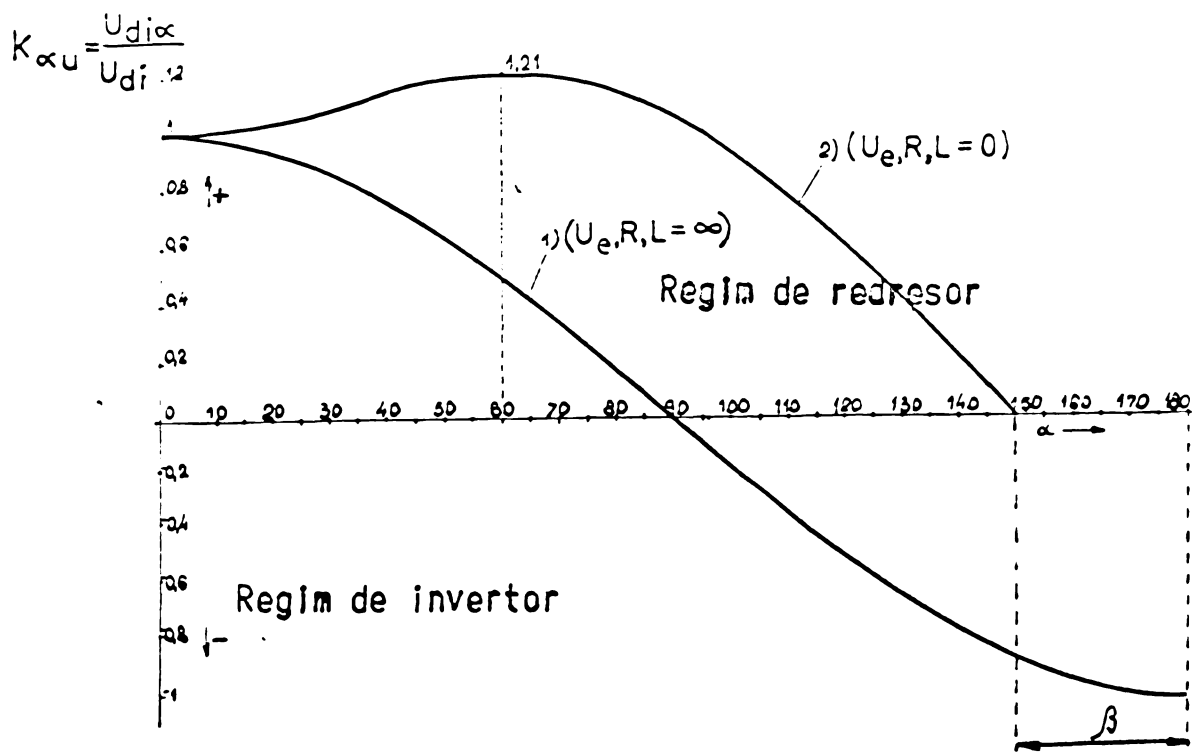


Fig. 4.4

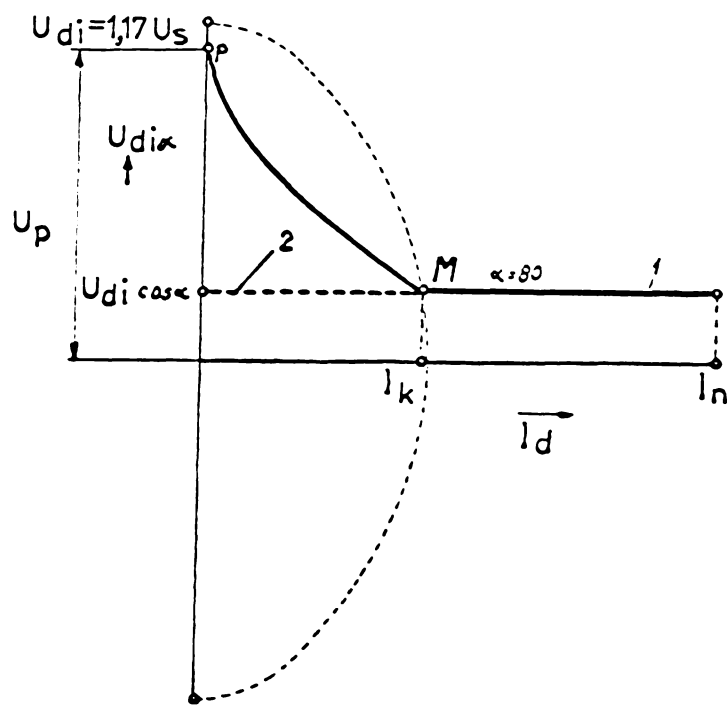


Fig. 4.5

teristicii $I_d = f(\alpha)$ la $U_d = \text{ct.}$ (fig.4.6), unde se observă că se obține valoarea maximă pentru curentul critic la unghiul $\alpha = 90^\circ$.

În cazul instalației de încercare (I-M.E.), rotorul mașinii de c.c. prezintă deja o oarecare inductivitate, care adesea este însoțită de o altă inductivitate adițională. În aceste condiții, fenomenul de conducție discontinuă apare numai pentru sarcini mici.

Datorită reactanței din circuitul de sarcină (presupusă de o valoare teoretic infinită), curentul este întrerupt oricare ar fi valoarea unghiului de comandă α , astfel încât tensiunea medie redresată în cazul mutatorului trifazat comandat, ținând seama de comutație, va fi:

$$U_{di\alpha} = \frac{m}{2\pi} \left[\int_{-(\frac{\pi}{m}-\alpha)}^{-(\frac{\pi}{m}-\alpha-u)} U_{di} \cdot dx + \int_{-(\frac{\pi}{m}-\alpha-u)}^{\frac{\pi}{m}+\alpha} U_b dx \right] \quad (4.12)$$

dacă în această expresie se introduce:

$$u_b = \sqrt{2}U_s \cos x \quad (4.13)$$

și

$$U_{di} = \frac{U_a + U_b}{2} = \sqrt{2}U_s \cos \frac{\pi}{m} \cos(x + \frac{\pi}{m}) \quad (4.14)$$

se obține

$$U_{di\alpha} = \sqrt{2}U_s \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} \left[\frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + u)}{2} \right] \quad (4.15)$$

sau

$$U_{di\alpha} = U_{di} \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + u)}{2} \quad (4.16)$$

În consecință adâncimea reglajului $K_{\alpha u}$ (cazul $u \neq 0$) va avea expresia:

$$K_{\alpha u} = \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + u)}{2} \quad (4.17)$$

Dacă se iau în considerare reactanța de comutație pe fază X_0 , rezistența înfășurărilor transformatorului și căderea de tensiune în tiristoare ΔU_a , atunci tensiunea la bornele circuitului de c.c. se poate scrie sub forma:

$$U_{di\alpha} = U_{di} \cos \alpha - \Delta U_x - \Delta U_r - \Delta U_a \quad (4.18)$$

Deoarece căderea de tensiune activă în perioada de suprapunere este:

$$\Delta U_x = \frac{m}{2\pi} I_d X_0 = 0,478 I_d X_0 = b_1 I_d \quad (4.19)$$

iar căderea de tensiune activă în circuitul de redresare:

$$\Delta U_r = \frac{P_r}{I_d} = b_2 I_d \quad (4.20)$$

și înlocuind în relația 4.12 valorile pentru U_{di} , ΔU_x și ΔU_r din relațiile 4.6, 4.13 respectiv 4.14 se obține:

$$U_{di\alpha} = 1,17 U_s - (b_1 + b_2) I_d - \Delta U_a \quad (4.21)$$

unde:

P_r - pierderile încălzitoare în transformatorul de alimentare a mutatorului;

b_1, b_2 - constante de proporționalitate.

În aceste condiții caracteristicile $U_{di\alpha} = f(I_d)$ nu mai sînt orizontale și se transformă într-un fascicol de drepte înclinăte, paralele, avînd ordonata conform relației:

$$U_{di\alpha} = U_{di} \cos \alpha - \Delta U_a \quad (4.22)$$

iar panta:

$$b_1 + b_2 = \frac{\Delta U_x + \Delta U_d}{I_d} \quad (4.23)$$

De remarcat că ecuația invertorului (4.12) poate fi scrisă în funcție și de unghiul de avans β :

$$U_{di\alpha} = -U_{di} \cos \beta + \Delta U_x - \Delta U_r - \Delta U_a \quad (4.24)$$

în care:

$$\alpha + \beta = \pi$$

./.

sau în funcție de unghiul γ :

$$U_{di\alpha} = - U_{di} \cos \gamma + \Delta U_x - \Delta U_r - \Delta U_a \quad (4.25)$$

Deasemeni ecuația inverterului la funcționare la unghi $\gamma = ct$ sau $\gamma = 0$, poate fi scrisă sub forma:

$$U_{di\alpha} = - U_{di} + \Delta U_x - \Delta U_r - \Delta U_a \quad (4.26)$$

Toate caracteristicile $U_{di\alpha} = f(I_d)$ trebuie să se oprească la dreapta limită (teoretică) ab (fig.4.7), porțiunile de dedesubt neavînd sens fizic.

Pe de altă parte dreapta cd are ecuația:

$$U_{di\alpha} = - U_{di} \cos \gamma_0 + \Delta U_x - \Delta U_r - \Delta U_a \quad (4.27)$$

și reprezintă o nouă limită a punctelor de funcționare a caracteristicilor externe ale mutatorului. Dacă se admite că sarcina maximă a mutatorului este $2 I_{dn}$, se poate imagina o funcționare la γ_0 variabil, cînd dreapta limită se transformă într-o curbă a cărei ordonată la origine va fi dată de expresia:

$$U_{di\alpha} = U_{di} \cos \gamma_{omin} - \Delta U_a \quad (4.28)$$

și care va trece pentru un curent I_d prin punctul dat de relația:

$$U_{di\alpha} = U_{di} \cos \gamma_{omax} - \Delta U_a - \Delta U_r + \Delta U_x \quad (4.29)$$

În ipoteza că funcționarea se efectuează la $\beta = ct$ este necesar ca la curentul de suprasarcină cel mai mare posibil, unghiul $\gamma_{omin} = \beta - \alpha_{max}$ să fie suficient, pentru a permite blocarea tiristorului (unghiul de stingere trebuind să fie mai mare decît timpul de revenire al tiristorului).

4.4. Mutatorul static comandat în regim de inverter (cazul unei punți trifazate).

Funcționarea unui mutator static comandat în montaj punte trifazată (fig.4.8a), în regim de inverter, cu unghiul cuprins între 90° și 150° electrice, se poate analiza foarte bine pentru un anumit unghi de comandă dat. [92,152]

Tiristoarele respective (de exemplu în cazul unui unghi $\alpha = 110^\circ$), vor conduce în următoarea succesiune: T_4 cu T_3 , T_3 cu T_5 , T_5 cu T_1 , T_1 cu T_6 , T_6 cu T_2 , T_2 cu T_4 , T_4 cu T_3 etc. (fig. 4.8a; 4.8b și 4.9).

La un moment dat există în conducție două tiristoare, celelalte fiind blocate. Comutarea unui tiristor din starea de conducție în starea de blocare nu necesită circuite de comutație forțată, (grupuri RC sau LC), aceasta fiind asigurată de rețeaua la care este cuplat mutatorul [1, 13, 178, 205]. Pentru $\alpha = 0$, tensiunea de ieșire va avea valoarea maximă pentru $\alpha = 90^\circ$, valoarea zero iar pentru $\alpha = 180^\circ$, valoarea maximă negativă. Caracteristica de comandă a mutatorului poate fi obținută prin integrarea în cadrul unui ciclu a curbei tensiunii de ieșire. [188]

Intre fundamentala curentului și tensiunea de linie U_n există defazajul: $\varphi = \pi - \alpha$

Presupunând ca origină de fază tensiunea:

$$u_n = U_n \sin \omega t \quad (4.30)$$

Curentul fiind nesinusoidal este de forma:

$$i_n = \sum_{k=0}^{\infty} I_{n,2k+1} \sin [(2k+1)\omega t + \varphi_{2k+1}] \quad (4.31)$$

și considerînd că funcționează doar două faze, energia ΔW pe cele două faze ale transformatorului pe intervalul de o perioadă va fi:

$$\begin{aligned} \Delta W &= \int_0^{2\pi/\omega} U_n \sin \omega t \sum_{k=0}^{\infty} I_{n,2k+1} \sin [(2k+1)\omega t + \varphi_{2k+1}] dt = \\ &= U_n I_{n1} \int_0^{2\pi/\omega} \sin \omega t \sin(\omega t + \varphi) dt = \frac{\pi}{\omega} U_n I_n \cos \varphi = \\ &= \frac{\pi}{\omega} U_n I_n \cos(\pi - \alpha) \end{aligned} \quad (4.32)$$

Pentru: $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$; $\Delta W < 0$ fiind vorba de o cedare de energie în rețea.

Pentru $\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi$; $\Delta W > 0$ și deci rețeaua primește energie.

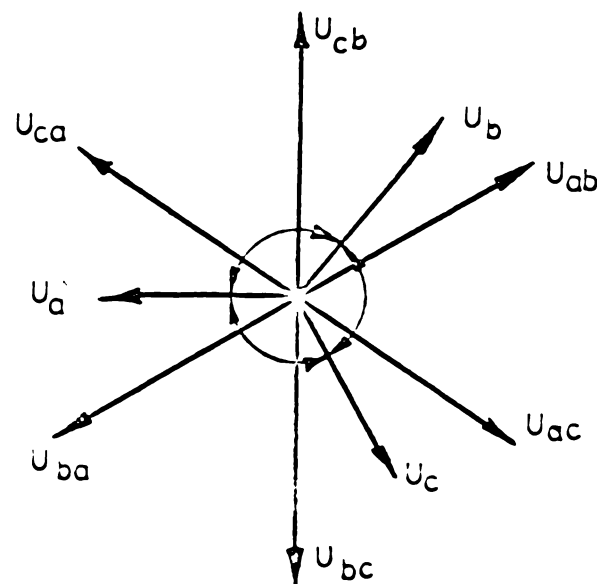
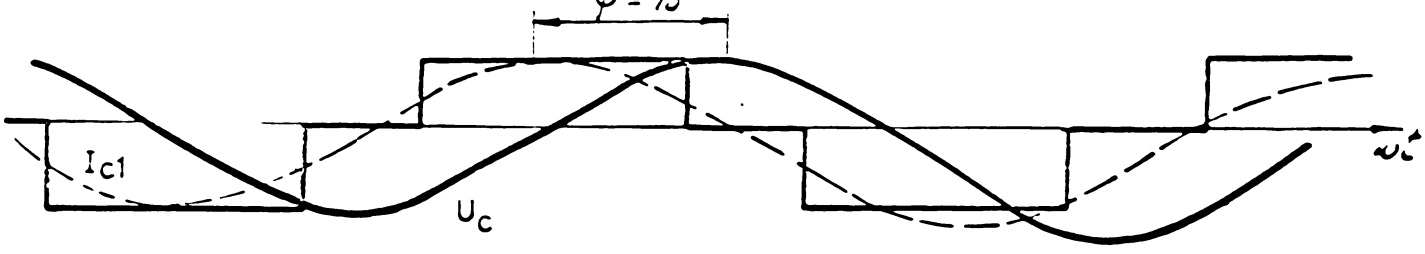
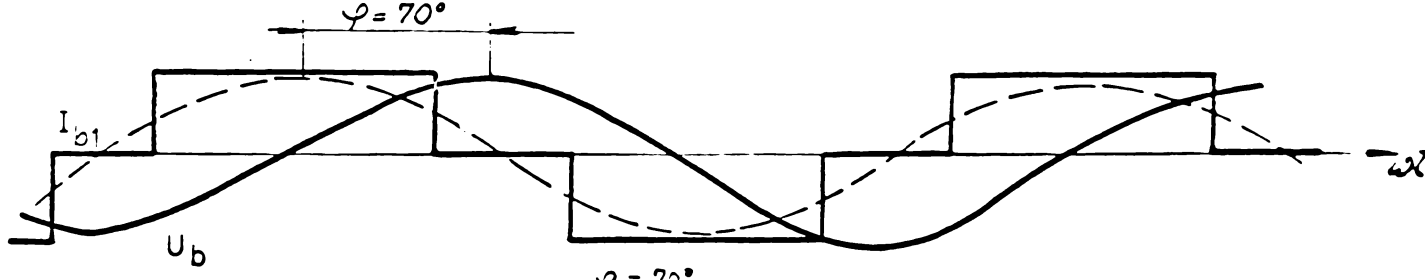
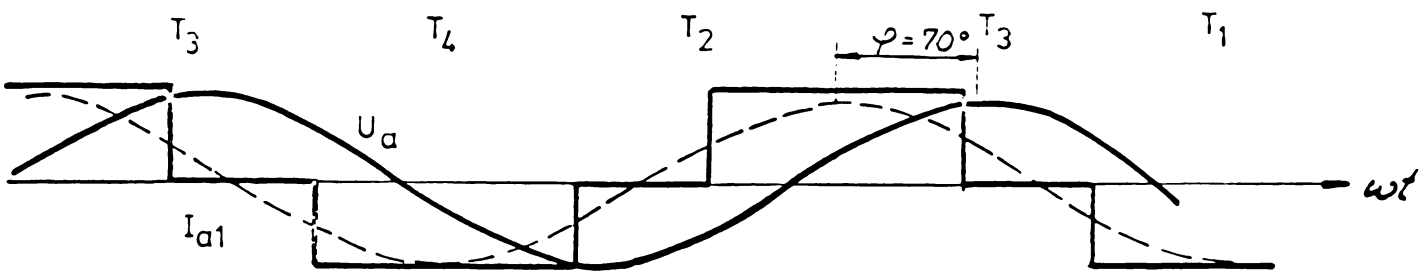
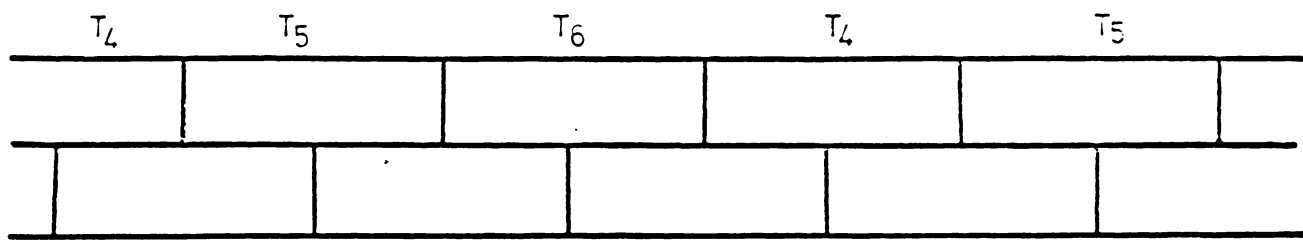
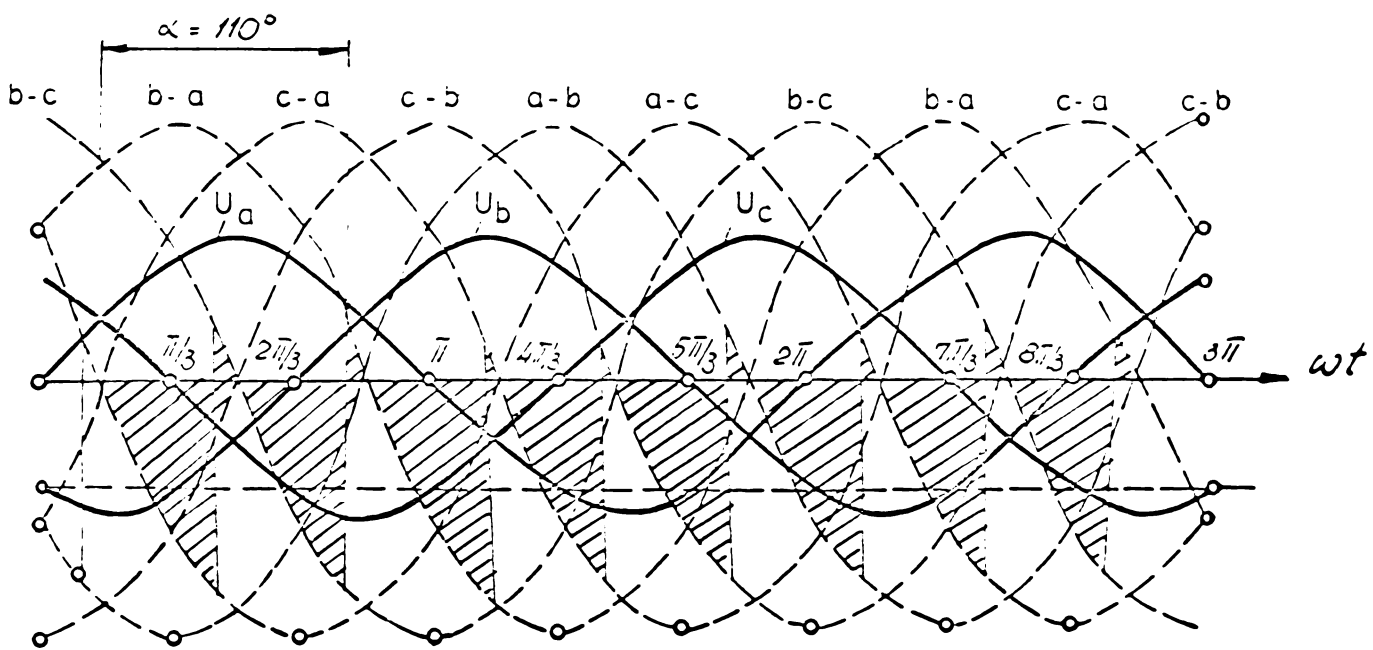


Diagrama fazoriala
Fig. 4.9

INSTITUTUL POLITEHNIC
TIMISOARA
UNIVERSITATEA CENTRALA

Componenta continuă a tensiunii care apare în secundarul transformatorului invertorului în conformitate cu fig. 4.8b va fi:

$$U_{di\alpha} = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha - \frac{\pi}{6}}^{\alpha + \frac{\pi}{6}} U_{\max} \cos \omega t d(\omega t) = \frac{3U_{\max}}{\pi} \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right) - \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{6}\right) \quad (4.33)$$

de unde rezultă imediat:

$$U_{di\alpha} = \frac{3U_{\max}}{\pi} 2\cos\alpha \sin \frac{\pi}{6} = \frac{3U_{\max}}{\pi} \cos \alpha \quad (4.34)$$

In consecință pentru: $\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{5\pi}{6}$ rezultă $U_{di\alpha} \leq 0$.

Totodată conform schemei echivalente din fig.4.8a pentru componenta continuă se poate scri relația:

$$U_{di\alpha} + RI_d = U_e \quad (4.35)$$

Eliminînd pe I_d și ținînd cont de relația 4.34, se obține:

$$I_d(\alpha) = \frac{U_e + U_{di\alpha}}{R} = \frac{U_e + \frac{3U_{\max}}{\pi} \cos \alpha}{R} \quad (4.36)$$

Valoarea curentului $I_d(\alpha)$ va scădea, cînd unghiul α crește.

Pentru: $\alpha = \frac{\pi}{2}$

$$I_d\left(\alpha = \frac{\pi}{2}\right) = \frac{U_{di}}{R} = I_{d\max} \quad (4.37)$$

Pentru $\alpha = \frac{5\pi}{6}$

$$I_d\left(\alpha = \frac{5\pi}{6}\right) = \frac{U_e - \frac{3U_{\max}}{\pi} \frac{\sqrt{3}}{2}}{R} = I_{d\min} \quad (4.38)$$

Dacă:

$$I_{dmin} > 0; U_e > \frac{3U_{max}}{2} \frac{\sqrt{3}}{2} \text{ și } U_{max} < \frac{2\pi}{3\sqrt{3}} U_e \quad (4.39)$$

În cadrul procesului tranzitoriu de comutație de pe o pereche de tiristoare pe alta se constată că reactanțele din circuitul transformatorului, rețelei de alimentare și ale sarcinii limitează valoarea curentului în momentul comutației de la o ramură la alta. [151,181,249,250]

Dacă inductivitatea de sarcină este suficient de mare (ca să asigure continuitatea conducerii curentului) iar unghiul de suprapunere anodică este mai mic de $\frac{\pi}{3}$, regimul de funcționare este denumit domeniul 1. La curenți mici de sarcină trecerea curentului poate deveni discontinuă și regimul de funcționare este denumit "domeniul zero".

La nivele foarte ridicate de curent de sarcină, comutația unei ramuri începe să influențeze comutarea ramurei următoare, iar dacă unghiul de suprapunere rămâne $\frac{\pi}{3}$, regimul de funcționare este denumit "domeniul 3". La valori și mai mari, unghiul de suprapunere poate crește peste $\frac{\pi}{3}$ existînd pericolul de scurtcircuit între faze și în acest caz, regimul de funcționare este denumit "domeniul 4". În scopul prevenirii funcționării în domeniile 3 sau 4, unghiul α se limitează la $\frac{5\pi}{6}$.

Din raționamente de natură practică se recomandă ca unghiul α să se modifice între 30° și 90° electrice la funcționarea în regim de redresor și între 90° și circa 150° electrice în regim de invertor. [248]

Fenomenele de comutație au ca rezultat deformarea formei de undă a tensiunii rețelei. Pentru micșorarea acestui fenomen se recomandă folosirea unei surse de putere cât mai mare. Tensiunile ridicate conducînd la impedanțe mai mici, este preferabil să se folosească rețele de tensiune mai mare, acolo unde investiția este justificată. [83,140,191]

Intârzierea impulsului de comandă și unghiul de suprapunere anodică influențează factorul de putere în sensul scăderii acestuia (comutația cu unghi de suprapunere conducînd la o deplasare suplimentară a curentului spre dreapta). [67, 92, 138,167]

./.

În ceea ce privește armonicile de curent acestea pot fi studiate descompunând în serie Fourier curentul din secundarul transformatorului, obținându-se termenii:

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_{nk} \cos k\omega t d(\omega t) \quad (4.40)$$

și

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_{nk} \sin k\omega t d(\omega t) \quad (4.41)$$

Deoarece $I_n(\omega t) = I_n(T-\omega t)$ descompunerea în serie Fourier va conține numai termeni în cosinus. [215,233]

$$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_n(t) d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \left\{ I_{o\alpha} \left[\int_0^{\pi/3} d(\omega t) - \int_{2\pi/3}^{4\pi/3} d(\omega t) + \int_{5\pi/3}^{2\pi} d(\omega t) \right] \right\} = 0 \quad (4.42)$$

iar:

$$\begin{aligned} I_k &= \frac{2}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_d(\alpha) \cos k\omega t d(\omega t) = \frac{1}{\pi} I_d(\alpha) \left[\int_0^{\pi/3} \cos k\omega t d(\omega t) - \right. \\ &\quad \left. - \int_{2\pi/3}^{4\pi/3} \cos k\omega t d(\omega t) + \int_{5\pi/3}^{2\pi} \cos k\omega t d(\omega t) \right] = \frac{1}{\pi} I_{o\alpha} \frac{1}{k} \left[\sin k \frac{\pi}{3} - \right. \\ &\quad \left. - \sin 4k \frac{\pi}{3} + \sin 2k \frac{\pi}{3} + \sin 2k\pi - \sin 5k \frac{\pi}{3} \right] = \\ &= - \frac{4}{k\pi} I_{o\alpha} \cos \frac{k\pi}{6} \sin \frac{k\pi}{2} \cos k\pi \quad (4.43) \end{aligned}$$

Armonicile de ordin $k = 2k'$ nu există, deoarece $\sin k'\pi = 0$; la fel și armonicile de ordin $k = 3k''$ deoarece $\cos \frac{k''\pi}{2} = 0$.

În consecință fundamentală are amplitudinea:

$$I_{n1} = - \frac{4}{\pi} I_{o\alpha} \cos \frac{\pi}{6} \sin \frac{\pi}{2} \cos \pi \quad (4.44)$$

sau

$$I_{n1} = + \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} I_{o\alpha} \quad (4.44a)$$

armonica a 5-a

$$I_{n5} = - \frac{4}{5\pi} \cos \frac{5\pi}{6} \sin \frac{5\pi}{2} \cos 5\pi I_0(\alpha) \quad (4.45)$$

sau

$$I_{n5} = \frac{4}{5\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} I_0(\alpha) \quad (4.45a)$$

armonica a 7-a

$$I_{n7} = - \frac{4}{7\pi} \cos \frac{7\pi}{6} \sin \frac{7\pi}{2} \cos 7\pi I_0(\alpha) \quad (4.46)$$

sau

$$I_{n7} = \frac{4}{7\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} I_0(\alpha) \quad (4.46a)$$

armonica a 11-a

$$I_{n11} = \frac{4}{11\pi} \cos \frac{11\pi}{6} \sin \frac{11\pi}{2} \cos 11\pi I_0(\alpha) \quad (4.47)$$

sau

$$I_{n11} = \frac{4}{11\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} I_0(\alpha) \quad (4.47a)$$

armonica a 13-a

$$I_{n13} = - \frac{4}{13\pi} \cos \frac{13\pi}{6} \sin \frac{13\pi}{2} \cos 13\pi I_0(\alpha) \quad (4.48)$$

sau

$$I_{n13} = \frac{4}{13\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} I_0(\alpha) \quad (4.48a)$$

Valorile relative ale armonicilor față de fundamentală sînt:

$$\frac{I_{n3}}{I_{n1}} = \frac{1}{5}; \quad \frac{I_{n7}}{I_{n1}} = \frac{1}{7}; \quad \frac{I_{n11}}{I_{n1}} = \frac{1}{11}; \quad \frac{I_{n13}}{I_{n1}} = \frac{1}{13} \quad (4.49)$$

În cazul punții trifazate în montaj dublă alternanță mărimea relativă a armonicilor în raport cu fundamentală se apreciază la valorile:

$$\begin{aligned} &\text{prima armonică } I_n/I_1 = 100\%; \text{ armonica a 5-a } I_{n5}/I_1 = 20\%; \\ &\text{armonica a 7-a } I_{n7}/I_1 = 14,3\%; \text{ armonica a 11-a } \\ &I_{n11}/I_1 = 9,1\%; \text{ armonica a 13-a } I_{n13}/I_1 = 7,7\%. \end{aligned} \quad (4.50)$$

./.

4.5. Funcționarea în mai multe cadrane a unei mașini de curent continuu alimentată de la un mutator static comandat.

Funcționarea mutatoarelor statice comandate în două regimuri diferite - de redresor și invertor - corelată cu aceea a mașinii de c.c. care poate funcționa ca motor sau generator, conferă sistemelor de acționare alimentate de mutatoare comandate, respectiv S.A., excelente proprietăți de reglare. [138]

Relațiile principale care stau la baza funcționării sistemului mutator - mașină de c.c. sînt:

- ecuația de echilibru a tensiunilor:

$$I_d(\alpha) = \frac{|U_{di} \cos \alpha| \pm |U_e|}{R_A} \quad (4.36.a)$$

- expresia cuplului electromagnetic al mașinii de c.c.

$$m = k \Phi i_A \quad (3.1.a)$$

- expresia t.e.m. :

$$U_e = k \Phi \Omega \quad (3.24.a)$$

Totodată la funcționarea sistemului mutator - mașină de c.c., trebuie avute în vedere următoarele:

- frînarea mașinii de c.c. se poate efectua prin schimbarea sensului fluxului sau inversarea curentului prin rotor (inversare care se poate obține prin contraconectare);

- inversarea mișcării se face schimbînd sensul t.e.m.

U_e , fapt care impune trecerea prealabilă în regim de blocare a mutatorului $U_{di} < 0$, cu condiția $|U_{di}| < |U_e|$ pentru a evita creșterea curentului);

- accelerarea mișcării în sens invers se face trecînd mutatorul în regim de invertor, adică făcînd $U_{di\alpha} < 0$, cu condiția $|U_{di\alpha}| < |U_e|$, astfel încît să se asigure existența curentului în circuitul comun al mașinii de c.c. și mutatorului.

În consecință, funcționarea în mai multe cadrane a sistemului de acționare este condiționată de următoarele posibilități:

- schimbarea sensului fluxului, deci a curentului de excitație, (caz în care mutatorul funcționează în două cadrane);

- schimbarea sensului curentului prin rotor cu ajutorul unui comutator (și în acest caz mutatorul funcționează în două cadrane);

- alimentarea mașinii de c.c. prin două mutatoare în antiparalel (fig.4.10) sau în cruce, astfel încât fiecare mutator să debiteze pe un sens (în caz în care ansamblul mutatoarelor funcționează în patru cadrane). [37,164]

Totodată regimul de funcționare a unei mașini de c.c. alimentată de către un mutator depinde în mod sensibil de felul reglajului folosit. [139, 181, 184]

Dacă se admit în mod convențional sensurile din fig. 4.11 și se consideră că semnul pentru U_e caracterizează sensul de rotație al mașinii, iar sensul cuplului corelat cu sensul curentului din rotor, atunci în planul U_e I se pot considera patru funcționări posibile, conform tabelului 4.1

Tabelul 4.1

Regimul de funcționare a mașinii de c.c.	U_e	I	Cadran	Tipul mutatorului
Motor	+	+ +	I	mutator static (unic)
Generator	+	- +	II	-
Motor	-	- -	III	-
Generator	-	+ -	IV	mutator static (unic)

Caracteristicile externe ale mutatorului pot acoperi numai cadranele I-IV (tab.4.1).

Curentul în acest caz are un sens unic iar polaritatea tensiunii se inversează. În cadranul I, mutatorul funcționează în regim de redresor, alimentând mașina de c.c. care funcționează în regim de motor, rotația acesteia fiind în sens pozitiv. În cadranul IV mutatorul funcționează în regim de invertor, opunând o tensiune U_d mașinii de c.c. Sensul de rotație este invers celui precedent, în schimb sensul cuplului este același. Acest mod nou de funcționare corespunde deci în mod obligatoriu unui mers în regim de generator, debitând pe invertor (fig.4.12), adică are un mers cu recuperare. [52,184] Pentru obținerea unui mers în regim cu recuperare (generator de c.c. - invertor) corespun-

zător unui sens pozitiv și în cadranul II, (respectiv la funcționarea în regim de redresor - motor de c.c. în sensul de rotație și invers, în cadranul III etc.) este necesar să se asigure o anumită dispoziție a conexiunilor.

În cazul reversării prin contraconectare este necesară introducerea unui comutator între mutator și mașina de c.c. (excitată la flux constant). Dacă sarcina mașinii de c.c. are un caracter potențial, procesul de reversare este favorizat, iar desfășurarea reversării este mai simplificată. Instalația în această situație se compune dintr-un mutator de două cadrane, mașina de c.c. fiind excitată de asemenea la flux constant. Schema pentru mecanismul de ridicare este redată în fig. 4.13a iar variația tensiunii și curentului este prezentată în fig. 4.13b.

Presupunând că instalația lucrează la ridicarea greutății în sarcină nominală [138], reversarea mișcării se obține comandând mutatorul de la α_1 (redresor) la $180^\circ - \alpha_2$, fapt ce determină anularea curentului I_d atunci când U_{di} devine mai mic decât U_o . Mașina de c.c. frânează și își inversează mișcarea în mod liber, sub efectul cuplului rezistent. T.e.m. U_o , fiind proporțională cu viteza mașinii de c.c., își modifică sensul iar când valoarea sa ajunge mai mare în valoare absolută decât tensiunea redresată corespunzătoare unghiului de comandă α_2 , apare curentul redresat I_d , respectiv cuplul electromagnetic m care produce frînarea mașinii de c.c.. Viteza acesteia se stabilizează la o valoare determinată de mărimea unghiului de comandă α_2 în regim de invertor, timpul mort al operației de reversare fiind determinat de inerția sarcinii și nu poate fi influențat de comandă.

În fig. 4.14 sînt reprezentate formele de undă ale tensiunii și curentului unui mutator funcționînd în regim de redresor, respectiv de invertor (cadranele I și IV). [38]

În concluzie dacă unghiul de comandă α al mutatorului este egal cu $\frac{\pi}{2}$, tensiunea continuă devine nulă, caz în care numai mașina de c.c. debitează energie (de exemplu pe un rezistor) cu toate că mutatorul este în funcționare, întrucît la acest unghi de comandă el nu poate să transmită nici o putere. Dacă unghiul de comandă este ajustat la o valoare $\alpha > \frac{\pi}{2}$ atunci sensul de transfer a fluxului de energie prin mutator se inver-

sează față de cazul regimului de redresor întrucît $\cos \alpha$ devine negativ și deci tensiunea continuă își schimbă polaritatea. În regim de invertor tensiunea rețelei nu trebuie să dispară deoarece nu mai poate avea loc nici o comutație, tensiunile din ramurile tiristarelor respective fiind nule.

4.6. Concluzii.

Instalația concepută, realizată și aplicată în industrie are un obiectiv bine conturat și anume: încercarea M.E. destinate acționării I-R.T. în vederea stabilirii performanțelor acestora, (respectiv "timbrării") în scopul satisfacerii criteriilor de apreciere funcționale, de siguranță și economice la cele mai ridicate exigențe.

Obținerea unor performanțe dinamice superioare în funcționarea instalației de încercare I-M.E. (cu o precizie de reglare sub 1%), este condiționată de folosirea unui ansamblu complex alcătuit la rîndul lui dintr-un sistem mașină de c.c. - mutator, un dispozitiv special de blocare mecanică și măsură și un dispozitiv electronic de comandă și programare.

Considerațiile teoretice cu privire la funcționarea unui mutator static comandat în regim de redresor, respectiv de invertor, (cu stabilirea relațiilor de calcul corespunzătoare pentru un caz concret folosit) conduc la concluzia că sistemul mașină de c.c.-mutator din cadrul instalației de încercare, poate asigura obținerea unei foarte variate game de caracteristici de formă specială (inclusiv ca cele date la ridicarea sau coborîrea unei greutăți în cadrul I-R.T.).

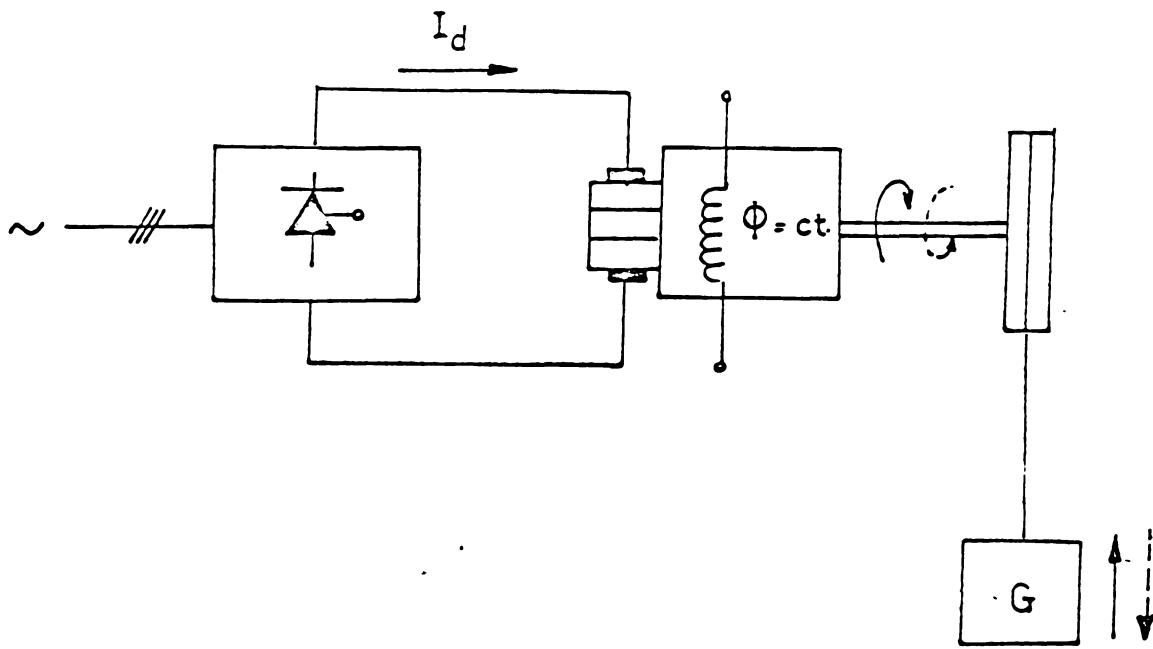


Fig.4.13 a

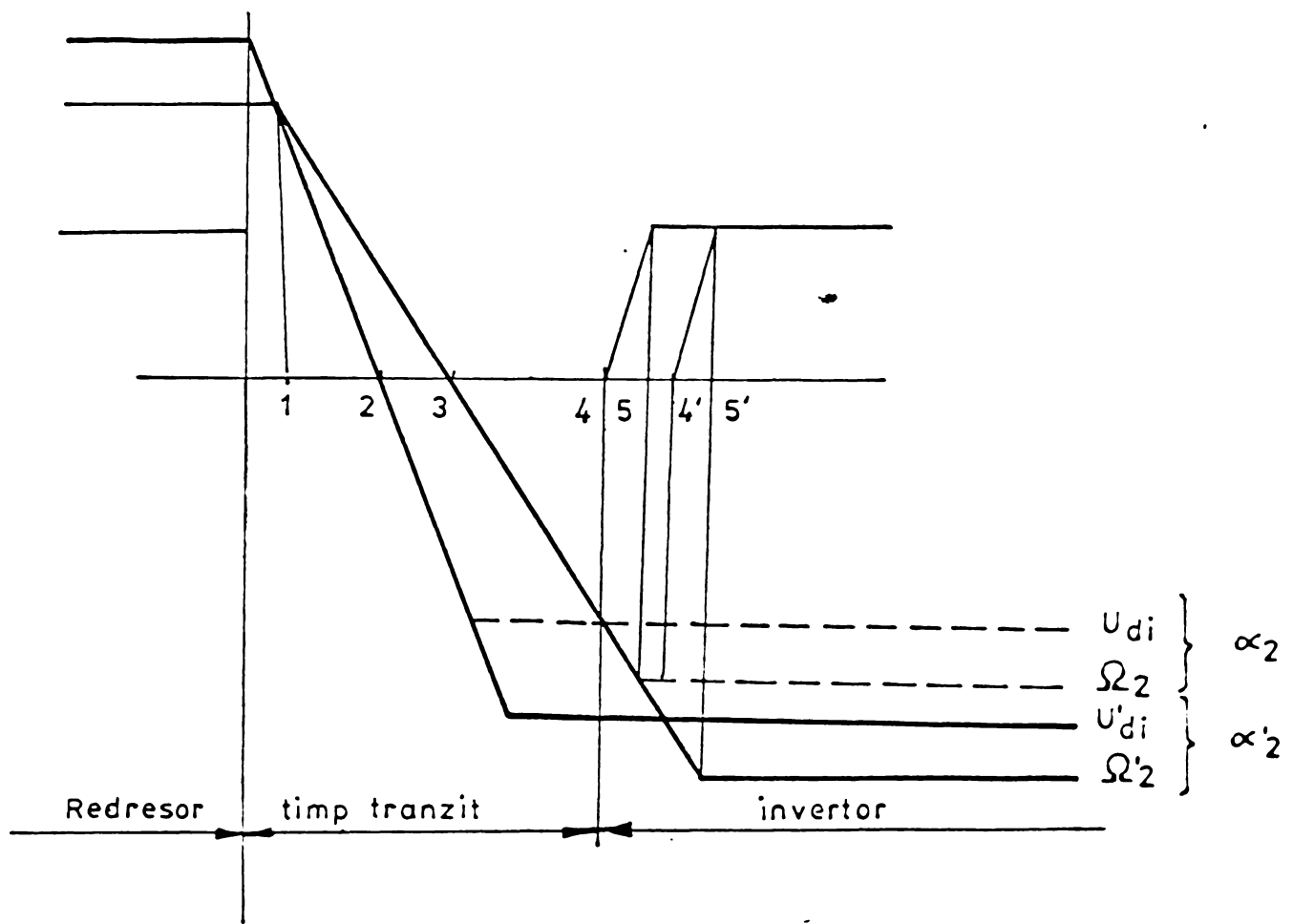
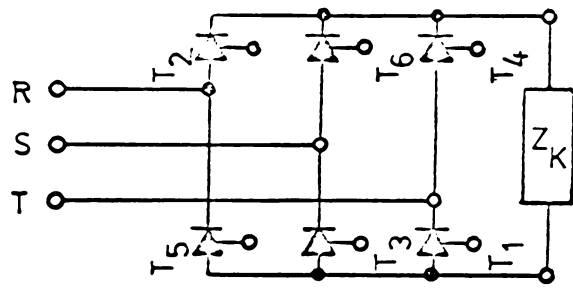
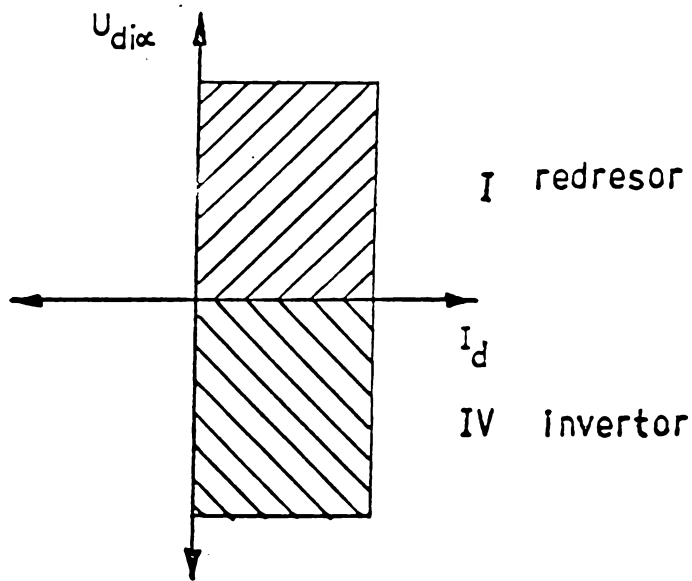


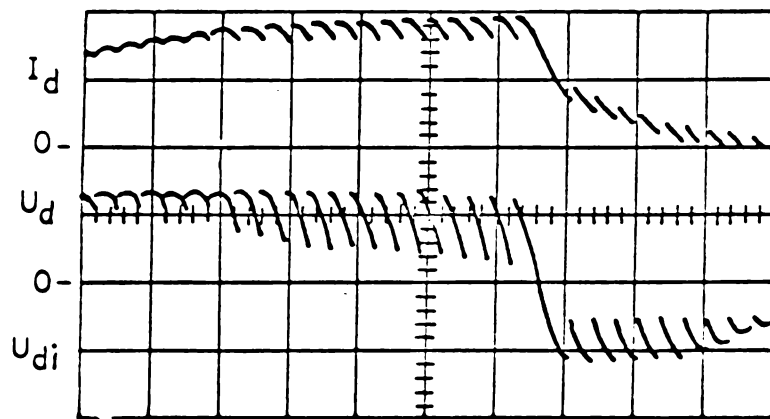
Fig. 4.13 b



a)



b)



c)

Fig. 4.14

C A P I T O L U L V

REGIMUL DINAMIC DE FUNCȚIONARE A ÎNSTALATIEI DE ÎNCERCARE

5.1. Introducere.

Analiza regimului dinamic de funcționare a instalației de încercare (I-M.E.) precum și a stabilității sistemului de reglare automată adoptat (S.A), se poate efectua având în vedere atât schema bloc a instalației de încercare cât și schema structurală a acesteia. [50,232]

În cazul instalației de încercare ce face obiectul lucrării, este necesar să se aibă în vedere totodată o serie de particularități în funcționare și anume:

- elementul de execuție mutatorul static comandat, prin natura sa, nu lucrează nici continuu și nici liniar, în sensul că generatorul de impulsuri eșantionează tensiunea continuă de comandă;
- mărimea de reacție ca valoare reală a curentului redresat sau a tensiunii redresate este însoțită de o serie întreagă de armonice de ordin superior, în timp ce mărimile de intrare a reguletoarelor sînt continue;
- mașina de c.c. cu excitație separată, funcționează în condiții de neliniaritate și la variații bruște ale curentului de sarcină (tensiunea la ieșirea mutatorului fiind o funcție neliniară de comandă);
- procesul tranzitoriu electromecanic și electromagnetic prezintă o importanță esențială pentru obiectivul propus, deoarece obținerea unui cuplu static constant se impune chiar din momentul pornirii M.E. de încercat respective;
- mașina de c.c. este alimentată cu curent pulsatoriu. [20, 50, 75,144,149,218]

5.2. Considerații teoretice privind regimul dinamic al sistemului mașină de curent continuu - mutator static comandat.

5.2.1. Ecuțiile de funcționare în regim dinamic ale mașinii de c.c. cu excitație separată.

,/.

Analiza funcționării în regim dinamic a mașinii de c.c. cu excitație separată, folosită în cadrul unui sistem de reglare automată (S.A), se bazează pe relațiile funcționale clasice redată în diferite lucrări de specialitate privind M.E.

[11, 55, 60, 70, 77, 79, 135, 143, 168, 170, 172, 189, 192, 193, 198, 232] sau A.E. automatizate [17, 20, 24-29, 48-50, 69, 71, 73, 136, 145, 148, 156, 160, 166, 196, 213, 217, 234, 237, 238, 244, 248, 251]

În cazul mașinii de c.c., avînd în vedere atît procesul tranzitoriu electromagnetic care are loc în circuitele M.E. cît și cel mecanic în care se găsește rotorul acesteia (păstrînd aceleași notații atît la funcționarea în regim de generator cît și regim de motor - în care caz față de sensul de integrare a t.e.m. de rotație, tensiunea la borne este negativă) se pot scrie următoarele ecuații funcționale: [168]

$$- \frac{d\psi_e}{dt} = R_e i_e - u_E \quad (5.1)$$

$$u_e - \frac{d\psi_A}{dt} = R_A i_A \pm u_A \quad (5.2)$$

$$u_e = \pm k \psi_{eA} \Omega \quad (5.3)$$

$$m = k \psi_{eA} i_A \quad (5.4)$$

$$m_R = m \pm m_0 \pm m_j \quad (5.5)$$

$$m_j = J_M \frac{d\Omega}{dt} \quad (5.6)$$

$$\psi_{eA} = f(i_e) \quad (5.7)$$

Ecuațiile (5.2-5.6) au valabilitate cu respectarea următoarelor convenții:

- în situația în care cuplul electromagnetic m este un cuplu rezistent în relația 5.4 acesta se introduce cu semnul minus;

- în relațiile 5.2, 5.3 și 5.5 semnul plus corespunde funcționării mașinii de c.c. în regim de generator iar semnul minus celui de motor.

De asemenea, relațiile 5.5. și 5.6. în cazul funcționării mașinii de c.c. în regim de generator pun în evidență procesul tranzitoriu mecanic al rotorului mașinii sub influența

variației sarcinii motorului primar de antrenare, în cazul de față a M.E. de încercat.

La stabilirea ecuațiilor de mai sus însă, nu s-au luat în considerare o serie de fenomene și anume; saturația circuitului magnetic, reacția indusului, influența curenților turbionari etc.

În cele ce urmează se prezintă ecuațiile respective avînd în vedere fenomenele amintite.

5.2.2. Ecuațiile complete de funcționare în regim dinamic ale mașinii de c.c.

Fenomenele care au loc la funcționarea mașinii de c.c. și în special în procesul tranzitoriu electromagnetic sau electromecanic pot fi luate în considerare introducînd unele corecții (recomandate și în unele lucrări din literatura de specialitate). [55, 79,198]

5.2.2.1. Efectele saturației circuitului magnetic.

Aceste efecte pot fi evidențiate prin introducerea unui factor de saturație k_μ [25, 27, 79,138]. Acesta reprezintă raportul dintre valoarea inductivității L_{eA} la un curent oarecare de excitație și valoarea nesaturată L_{eA_0} a aceleiași inductivități, corespunzătoare porțiunii rectilinii a curbei

$\psi_{eA} = f(i_e)$. Fluxul total $\psi_e = L_{ee} i_e$, se poate descompune deci în două componente: $\psi_{e\phi} = L_e i_e$ și $\psi_{eA} = L_{eA} i_e$. Prima componentă reprezintă fluxul de dispersie, iar a doua fluxul util care pătrunde în rotorul mașinii de c.c. fiind proporțional cu fluxul Φ al unui pol de excitație conform relației

$\psi_{eA} = k_\phi \Phi$ și legat de curentul de excitație prin curba de magnetizare. În consecință se ia în considerare numai dependența fluxului total util ψ_{eA} de starea de saturație a circuitului magnetic, care ca și factorul de saturație k_μ depinde neliniar de curentul de excitație i_e întrucît inductivitatea de dispersie $L_{e\phi}$ nu este afectată. [79,189]

Din punct de vedere teoretic, între circuitul de excitație și cel rotoric la o mașină de c.c. nu există inducție mutuală, dacă periile sînt plasate în axa neutră deoarece fluxul util al polilor de excitație, variabil în timp, nu induce nici o t.e.m. în înfășurarea rotorică. [11, 79,232]

În realitate, periile sînt deplasate totuși față de axa neutră, cu un decalaj ce poate ajunge uneori la 3-5 mm,

de o parte sau de alta a liniei neutre teoretice, fie din cauza unor eventuale erori la montaj, fie datorită particularităților fizice proprii contactelor perie-colector. [77,143] În consecință, t.e.m. longitudinală care apare în acest caz, poate să influențeze uneori în mod vizibil funcționarea mașinii de c.c., compensarea la orice valoare a curentului, implicând necesitatea modificării unghiului de decalaj al periilor în mod automat cu curentul rotorice respectiv, soluție posibilă, dar complicată. [77, 78,143]

Dacă se ține seama de starea de saturație a circuitului magnetic a mașinii de c.c. (cu periile plasate perfect în axa neutră), t.e.m. de rotație conform relației 5.3. poate fi scrisă în acest caz sub forma:

$$u_e = k \Psi_{eA} \Omega = k L_{eA} i_e \Omega = \frac{k_m L_{eA}}{k_\phi} i_e \Omega = \frac{k_m}{k_\phi} L_{eA_0} \cdot k_\mu i_e \Omega = M_{eA_0} k_\mu i_e \Omega \quad (5.3.a)$$

unde factorul:

$$M_{eA_0} = \frac{k_m}{k_\phi} L_{eA_0}, \text{ este de natura unei inductivități.}$$

Totodată și expresia cuplului electromagnetic m din relația 5.4. (avînd în vedere factorul de saturație k_μ) devine:

$$m = M_{eA_0} k_\mu i_e i_A \quad (5.4.a)$$

Din această relație rezultă evident că starea de saturație influențează și procesul tranzitoriu electromecanic.

Inductivitatea L_{AA} (care corespunde fluxului de reacție transversală a rotorului ca și fluxului de dispersie al secțiilor rotorice), în primă aproximație se poate considera practic constantă și independentă de starea de saturație a circuitului magnetic, întrucît este relativ mică ca valoare iar variațiile acesteia datorită saturației nu influențează sensibil procesul tranzitoriu al mașinii de c.c. respective.

Această supoziție este justificată în ceea ce privește componenta legată de fluxul de dispersie, dar mai puțin în-

dreptăţită dacă se are în vedere componenta corespunzătoare fluxului de reacţie transversală [79]. Dacă ne referim la circuitul magnetic al polilor auxiliari acesta poate să se satureze în mod sensibil la o creştere foarte mare a curentului i_A , liniaritatea curbei care reprezintă variaţia fluxului polilor auxiliari ϕ_k în funcţie de curentul rotoric respectiv, să fie perturbată. [143,154] În acest caz se poate introduce un factor de saturaţie $k_{\mu p}$ (prin analogie cu factorul k_μ), care să reprezinte raportul dintre valoarea inductivităţii polilor auxiliari L_{pA} , la un curent oarecare în rotorul maşinii de c.c. şi valoarea nesaturată L_{pA_0} a aceleiaşi inductivităţi. În realitate fluxul de dispersie al polilor auxiliari contribuie la o creştere mai rapidă a fluxului rezultat în miezul acestora în raport cu fluxul ϕ_k , (care pentru o anumită valoare a curentului din rotor poate să nu mai crească sau chiar să schimbe de semn), situaţie în care factorul de saturaţie $k_{\mu p}$ poate avea şi valori negative. [143]

În fond neliniaritatea ecuaţiilor de funcţionare a maşinii de c.c. nu se datorează numai factorilor de saturaţie k_μ sau $k_{\mu p}$, ci şi apariţiei ca termen a produşilor de două mărimi în general variabile în timp şi anume: $k_\mu i_e$, $i_e i_A$, $i_e \Omega$ sau $k_{\mu p} i_A$.

Cu aceste consideraţii relaţiile (5.1)-(5.5) şi avînd în vedere expresiile 5.3a şi 5.4a pot fi scrise sub forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} - L_{e\phi} \frac{di_e}{dt} - L_{eA_0} \frac{d}{dt} (k_\mu i_e) = R_e i_e - u_E \quad (5.1 \text{ a}) \\ u_e - L_{AA} \frac{di_A}{dt} - L_{pA_0} \frac{d}{dt} (k_{\mu p} i_A) = R_A i_A \pm u_A \quad (5.2 \text{ a}) \\ u_e = \pm M_{eA_0} k_\mu i_e \Omega \quad (5.3 \text{ b}) \\ m = M_{eA_0} k_\mu i_e i_A \quad (5.4 \text{ b}) \\ m_R = m \pm m_0 \pm m_j \quad (5.5 \text{ a}) \\ i_e = f(k_\mu i_e) \quad (5.7 \text{ a}) \\ i_A = f(k_{\mu p} i_A) \quad (5.8) \end{array} \right.$$

./,

5.2.2.2. Efectele fenomenului de reacție a indusului. În regim de încărcare, caracteristicile mașinii de c.c. funcționând ca generator devin neliniare și din cauza fenomenului de reacție a indusului (care apare datorită decalării periiilor, comutației curentului rotoric etc.), cum și datorită căderii de tensiune interioare și a căderii de tensiune la perii. În consecință t.e.m. de rotație, respectiv tensiunea la borne va fi mai mică decât tensiunea de mers în gol. Această cădere a tensiunii după cum se știe are un caracter neliniar și doar în prima aproximație și pentru valori ale curentului de ieșire care nu depășesc prea mult valoarea nominală a lui poate fi considerată liniară. Cu aceste presupuneri se poate asimila efectul reacției indusului cu acela al unei reacții negative de curent [147,198, 252]. În consecință, considerând fluxul rezultat în regim de încărcare egal cu diferența dintre fluxul principal la mers în gol Φ_0 și o componentă Φ_r de reacție proporțional cu curentul din rotor, se poate admite în această situație că t.e.m. indusă va avea expresia:

$$\begin{aligned} u_e &= k\psi_{eA}\Omega = \frac{k_m}{k_\phi}\psi_{eA}\Omega = k_m\Phi\Omega = k_m(\Phi_0 - \Phi_r)\Omega = \\ &= k_m(\Phi_0 - k_r i_A)\Omega \end{aligned} \quad (5.9)$$

în care:

$$\Phi_r = k_r i_A \quad (5.10)$$

iar

k_ϕ, k_r - constantă de proporționalitate.

Având în vedere relația 5.9, expresia t.e.m. poate fi scrisă sub forma:

$$u_e = (M_{eA_0} k_\mu i_e - k_m k_r i_A)\Omega \quad (5.3 c)$$

Punând în factor curentul de excitație i_e rezultă:

$$\begin{aligned} u_e &= (M_{eA_0} k_\mu - k_m k_r \frac{i_A}{i_e}) i_e \Omega = (M_{eA_0} k_\mu - k_m k_r k_i) i_e \Omega = \\ &= (M_{eA_0} k_\mu - M_{er} k_i) i_e \Omega \end{aligned} \quad (5.3 d)$$

în care s-a notat cu:

$$M_{eR} = k_m k_r \quad (5.11)$$

și

$$k_i = \frac{i_A}{i_e} \quad (5.12)$$

Relația (5.3 d) poate fi scrisă deci sub o formă clasică cunoscută:

$$u_e = c_M i_e \Omega \quad (5.3 e)$$

în care factorul de proporționalitate c_M are valoarea ce se poate calcula pentru un anumit regim de funcționare dat, cu relația:

$$c_M = M_{eA_0} k_\mu - M_{eR} k_i \quad (5.13)$$

Cuplul electromagnetic m , (făcînd un calcul similar) devine:

$$\begin{aligned} m &= k_m (\Phi_0 - k_r i_A) i_A = (M_{eA_0} k_\mu i_e - M_{eR} i_A) i_A = \\ &= (M_{eA_0} k_\mu - M_{eR} k_i) i_e i_A \end{aligned} \quad (5.4 c)$$

sau sub forma clasică, ținînd cont de relația 5.13:

$$m = c_M i_e i_A \quad (5.4 d)$$

5.2.2.3. Efectele curenților turbionari.

În comportarea mașinii de c.c. cu excitație separată în proces tranzitoriu, o influență însemnată asupra vitezei de răspuns și care nu poate fi neglijată, o au curenții turbionari induși în părțile masive (miezuri polare și jug statoric etc.) ale circuitului magnetic.

Intr-adevăr după cum rezultă din legea inducției electromagnetice curenții turbionari vor avea pe de o parte tendința să mențină starea magnetică anterioară a mașinii și pe de altă parte, vor determina inducerea în înfășurarea de excitație, a unor t.e.m. care conduc la întîrzierea procesului de stabilire a curenților de excitație. [189,198,215]

Această situație este valabilă și în cazul alimentării înfășurării de excitație de la un mutator static comandat, deci cu curent pulsatoriu.

Pentru aprecierea acestor influențe se pot utiliza una din metodele:

- mărirea constantei de timp a circuitului de excitație a mașinii de c.c., metodă care însă nu permite aprecierea influenței asupra solenației inductoare în procesul tranzitoriu;

- considerarea curenților turbionari ca un fenomen cu o distribuție uniformă pe întreaga secțiune transversală a miezului feromagnetic al mașinii, admitându-se că permeabilitatea fierului este constantă și aplicându-se metoda superpoziției fluxurilor, (aceasta constituie o metodă de primă aproximație ce conduce la aprecierea unei componente tranzitorii a solenației de excitație a mașinii de c.c. și la supraaprecierea influenței curenților turbionari);

- reprezentarea armonicilor spațiale ale curenților turbionari ca înfășurări echivalente legate în scurtcircuit, având miez laminat și cuplate magnetic numai cu înfășurarea respectivă.

În conformitate cu această din urmă metodă la sistemul de ecuații (5.1)-(5.7) se poate adăuga un număr de ecuații de tipul:

$$- L_{nm} \frac{di_{nm}}{dt} - M_{nm} \frac{di_{nm}}{dt} = R_{nm} i_{nm} \quad (5.14)$$

corespunzător gradului de precizie și unde $n, m = 1; 3; 5; 7$.

Notarea cu doi indici a mărimilor care definesc parametrii circuitelor echivalente se datorește faptului că secțiunile transversale ale miezurilor polare și jugul mașinii sînt de formă dreptunghiulară și repartiția spațială a inducției în miez în procesul tranzitoriu este diferită după cele două axe de coordonate. Pentru calcule practice este suficient să se țină seama numai de prima armonică. [180,198]

Aplicînd cea de a treia metodă, în conformitate cu schema echivalentă din fig.5.1 se pot stabili pentru circuitul de excitație a polilor principali următoarele relații:

$$\begin{cases} -L_e \sigma \frac{d i_e}{dt} - L_{eA_0} \frac{d}{dt} (k_\mu i_e) - M_{te} \frac{d i_t}{dt} = R_e i_e - u_E & (5.1 b) \\ -L_t \frac{d i_t}{dt} - M_{te} \frac{d i_e}{dt} = R_t i_t & (5.1') \end{cases}$$

în care:

L_t și R_t - inductivitatea proprie și rezistența circuitului echivalent efectului curenților turbionari;

M_{te} - inductivitatea mutuală dintre înfășurarea de excitație și cea echivalentă curenților turbionari;

i_t - curentul din înfășurarea echivalentă t .

Parametrii înfășurării echivalente t , pot fi determinați prin calcul [180,198] cu relațiile:

$$M_{te} = W_e W_t \Lambda_1 \sqrt{1 - \sigma_1} \quad (5.15 a)$$

$$L'_{ee} = L_{eA_0} k_\mu = W_e^2 \Lambda_1 \quad (5.15 b)$$

$$R_t = \frac{L_t}{T_t} \quad (5.15 c)$$

$$L_t = W_t^2 \Lambda_1 \quad (5.15 d)$$

în care:

W_t, W_e - numărul de spire a înfășurării echivalente t , respectiv a înfășurării de excitație;

σ_1 - coeficient de dispersie;

Λ_1 - permeanța circuitului magnetic.

Totodată constanta de timp T_t poate fi obținută din formula [198]:

$$T_t = k_t \frac{l_m}{\rho \delta_e} \left(\frac{b}{a} + \frac{a}{b} \right) \quad (5.16)$$

./.

în care s-a notat cu:

- a, b, l_m - dimensiunile secțiunii transversale a jugului statoric și lungimea medie a liniei de câmp în jug (înălțimea polului fiind relativ mică în raport cu lungimea jugului, se consideră că poli ar fi lamelați);
- ρ - rezistivitatea oțelului;
- δ_e - întrefier de calcul echivalent, stabilit în raport de t.e.m. a circuitului magnetic nesaturat și inducția medie în jug pentru acea valoare a t.e.m. cu care se efectuează calculul;
- k_t - constantă de proporționalitate.

Totodată curenții turbionari provoacă o amortizare și a câmpului polilor auxiliari, curentul din rotor modificându-se mai repede decât poate să urmărească câmpul acestor poli, ceea ce conduce în primul rînd la o înrăutățire a comutației. Dacă se reprezintă sub formă de fazori armonicile fundamentale ale t.e.m. reactive u_{os1} și t.e.m. datorată câmpului polilor auxiliari u_{op1} (fig.5.2), se constată o micșorare a t.e.m. u_{op1} în raport de u_{os1} nefiind în opoziție de fază. [20]

De fapt aceeași influență o prezintă și variațiile rapide de curent, care sînt impuse în procesul tranzitoriu de funcționare a instalațiilor prevăzute cu S.A. [179]

Dacă alimentarea excitației se face prin intermediul unui mutator static, (deci cu curent pulsatoriu), atunci în rețeaua scurtcircuitată se mai induce suplimentar o t.e.m. de transformare u_{oT1} . (78, pag.242) Din combinarea armonicilor fundamentale a fluxului pulsatoriu principal și a fluxului pulsatoriu al polilor auxiliari, rezultă o tensiune reziduală u_{oR1} , care trebuie menținută la o valoare cît mai mică posibilă. Ca remediu se recomandă folosirea de inductanțe suplimentare și compensarea cît mai completă a amortizării circuitelor magnetice respective. O anulare completă a amortizării circuitului dacă în această situație ar crește t.e.m. u_{oT1} . [20] este indicată.

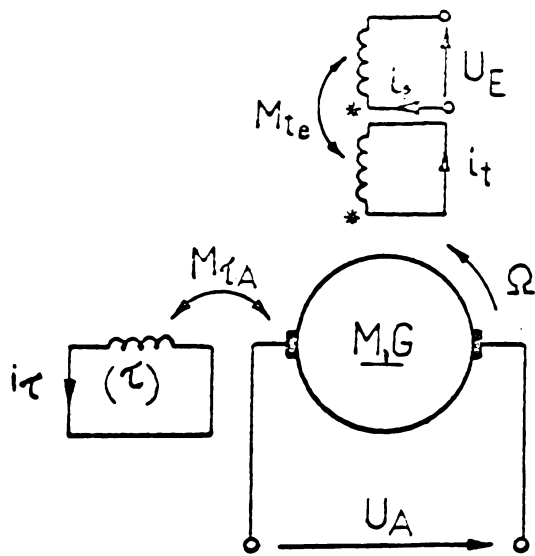
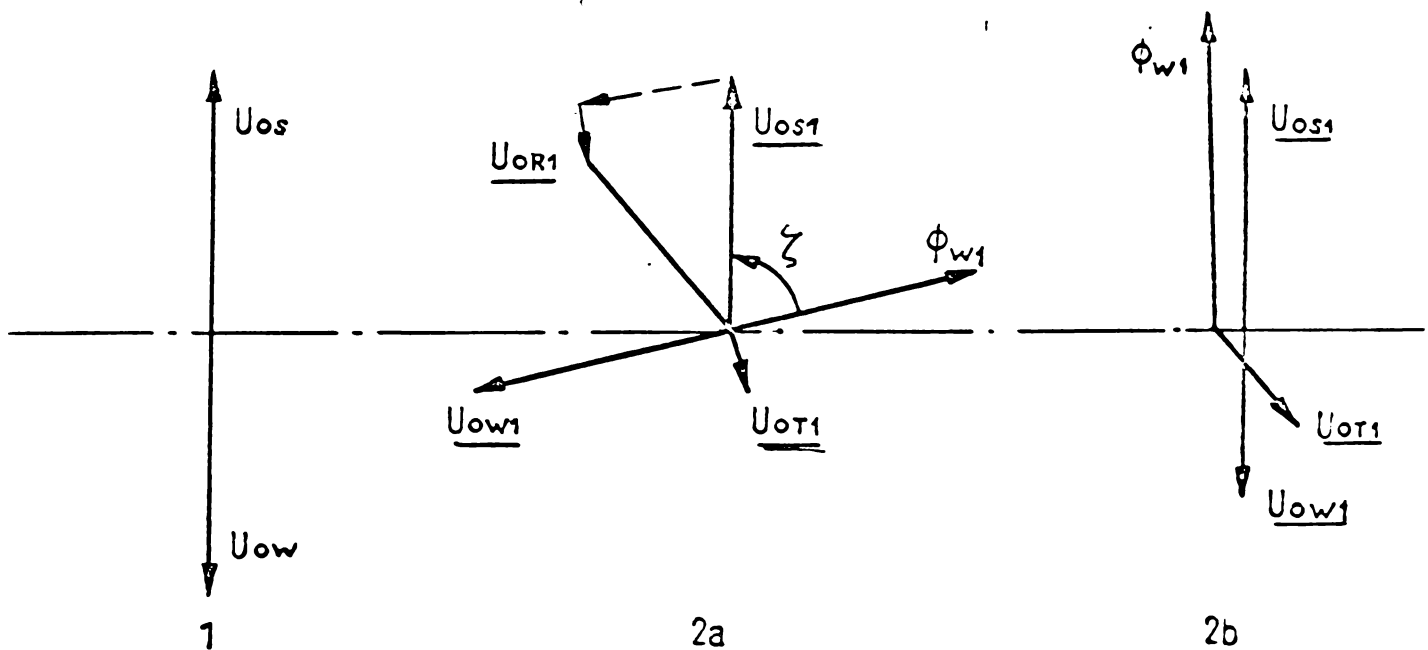


Fig. 5.1



Alimentare

1 curent continuu

2 curent continuu pulsatoriu cu amortizare

$$U_{OR} + U_{Os} + U_{Ow} = 0$$

a) necompensata

b) compensata partial

$$U_{OR1} = U_{Os1} + U_{Ow1} + U_{Ot1}$$

$$U_{OR1} = U_{Os1} + U_{Ow1} + U_{Ot1} = U_{Ot1}$$

$$\zeta \approx -\frac{\pi}{2}$$

$$\zeta \approx 0$$

In practica

$$U_{OR} = a \text{ (mic)}$$

$$U_{OR1} > a$$

$$U_{OR} = \sqrt{a^2 + U_{Ot1}^2}$$

$$U_{OR1} = U_{Ot1}$$

Fig. 5.2

Efectul curenților turbionari asupra câmpului polilor auxiliari, se poate evidenția cu suficientă aproximație considerînd o înfășurare suplimentară echivalentă τ cuplată magnetic cu înfășurarea rotorului și în principal cu cea a polilor auxiliari.

În această ipoteză se pot stabili în conformitate cu schema echivalentă din fig. 5.1 pentru circuitul rotoric următoarele ecuații:

$$\begin{cases} u_e - L_{AA} \frac{di_A}{dt} - L_{pA_0} \frac{d}{dt} (k_{\mu p} i_A) - M_{A\tau} \frac{di_{\tau}}{dt} = R_A i_A \pm U_A & (5.2b) \\ - L_{\tau} \frac{di_{\tau}}{dt} - M_{\tau A} \frac{di_A}{dt} = R_{\tau} i_{\tau} & (5.2') \end{cases}$$

unde:

L_{τ} și R_{τ} - inductivitatea proprie și rezistența circuitului echivalent;

$M_{A\tau} = M_{\tau A}$ - inductivitatea mutuală între înfășurările rotorului (inclusiv a polilor auxiliari) și cea echivalentă curenților turbionari;

i_{τ} - curentul din înfășurarea echivalentă.

Parametrii înfășurării τ pot fi determinați pornind de la relațiile similare cu (5.15) și (5.16) și făcînd adaptările corespunzătoare cu relațiile [180]:

$$\sqrt{\frac{M_{\tau A}}{L_{\tau} L'_{AA}}} = \sqrt{1 - \sigma_2} \quad (5.17 a)$$

$$L_{\tau} = w_{\tau}^2 \Lambda_2 \quad (5.17 b)$$

$$R_{\tau} = \frac{L_{\tau}}{T_{\tau}} \quad (5.17 c)$$

$$L'_{AA} = L_{AA} + L_{pA_0} k_{\mu p} \quad (5.17 d)$$

unde:

σ_2 - coeficient de dispersie;

w_{τ} - numărul de spire al înfășurării echivalente τ ;

./.

T_{τ} - constanta de timp a înfășurării echivalente (care se poate obține folosind o formulă similară din relația 5.16, adaptată însă la circuitul rotoric);

Λ_2 - permeanța circuitului magnetic corespunzător

Este de remarcat, că utilizarea metodelor de mai sus pot conduce la o oarecare supraapreciere a efectelor curenților turbionari, ceea ce sub raportul vitezei de răspuns constituie însă un avantaj. [198]

5.2.3. Ecuațiile de funcționare ale mașinii de c.c. în formă operațională.

Sistemul complet al ecuațiilor mașinii de c.c. (5.1 b, 5.1', 5.2 b, 5.2', 5.3 d, 5.4 c, 5.5 a, 5.6, 5.7 a și 5.8) permite studiul mai exact al comportării mașinii de c.c. în orice regim de funcționare.

Datorită neliniarităților pe care le prezintă mașina de c.c. rezolvarea ecuațiilor funcționale ale acesteia prin metode analitice este însă deosebit de dificilă. Numai în anumite cazuri când se acceptă o liniarizare în jurul unui punct de funcționare staționară sau se impun unele simplificări și condiții restrictive, sistemul de ecuații ale unei mașini de c.c. poate fi reprezentat printr-o schemă bloc care să conducă apoi la o soluționare convenabilă a acesteia prin utilizarea unui calculator electronic. [79]

Astfel, dacă se consideră toate inductivitățile și rezistențele constante (inclusiv rezistența de contact între perie și lamelă R_p), factorii k_{μ} și $k_{\mu p}$ de asemenea, constanți și se neglijează $L_{e\sigma}$ ($L_{e\sigma} = 0$), mașina de c.c. fiind în situația cu rotorul blocat la un anumit regim de funcționare dat (notînd cu "p" operatorul simbolic de derivare în raport cu timpul, $p = \frac{d}{dt}$) ecuațiile 5.1 b, 5.1', 5.2 b și 5.2' pot fi scrise sub forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} p L_{eA_0} k_{\mu} i_e + p M_{te} i_t + R_e i_e = u_E \quad (5.1 c) \\ p L_t i_t + p M_{te} i_e + R_t i_t = 0 \quad (5.1'') \\ - p L_{AA} i_A - p L_{pA_0} k_{\mu p} i_A - p M_{A\tau} i_{\tau} = R_A i_A \pm U_A \quad (5.2 c) \\ p L_{\tau} i_{\tau} + p M_{\tau A} i_A + R_{\tau} i_{\tau} = 0 \quad (5.2'') \end{array} \right.$$

./.

sau grupînd termenii:

$$\left\{ \begin{array}{l} (R_e + pL_{eA_0} k_{\mu}) i_e + p M_{te} i_t = u_E \quad (5.1 d) \\ (R_t + p L_t) i_t + p M_{te} i_e = 0 \quad (5.1''') \\ - (R_A + p L'_{AA}) i_A - p M_{A\tau} i_{\tau} = \pm U_A \quad (5.2 d) \\ (R_{\tau} + p L_{\tau}) i_{\tau} + p M_{\tau A} i_A = 0 \quad (5.2''') \end{array} \right.$$

Dacă se consideră apoi că rotorul mașinii de c.c. este lăsat să se rotească liber (la $\Omega = ct$), circuitul de excitație fiind în regim staționar ($I_e = ct$), în acest caz ecuațiile de funcționare ale mașinii de c.c. devin:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_e I_e = U_E \quad (5.1 e) \\ u_e - (R_A + p L'_{AA}) i_A - p M_{A\tau} i_{\tau} = \pm U_A \quad (5.2 e) \\ (R_{\tau} + p L_{\tau}) i_{\tau} + p M_{\tau A} i_A = 0 \quad (5.2''') \\ u_e = \pm c_M I_e \Omega = \pm k_e \Omega \quad (5.3 f) \\ m = c_M I_e i_A = k_e i_A \quad (5.4 e) \\ m_R = m \pm m_0 \pm p J_{tm} \Omega \quad (5.5 b) \end{array} \right.$$

în care:

$$k_e = c_M I_e \quad (5.18)$$

$$m_0 = m_{Fe} \pm m_m \simeq F \Omega \quad (5.19)$$

$$m_{Fe} = m_H + m_T \quad (5.20)$$

$$J'_{\Sigma} = J'_{it} + J'_{iv} + J'_{id} + J'_{im} \quad (5.21)$$

iar:

$$P.I = \frac{J_{mi} + J'_e}{J_{mi}} = \frac{J_{tm}}{J_{mi}} \quad (5.22)$$

unde:

J_{mi} - reprezintă momentul inerțial al M.E. de încercat

- $J'_{it}, J'_{iv}, J'_{id}, J_{im}$ - momentele inertiiale (raportate la arborele motorului) ale traductorului de cuplu, volantului, dispozitivului de blocare mecanică (inclusiv a cuplajului mecanic, respectiv al mașinii de c.c.);
- J_{tM} - momentul inercial total al ansamblului M.E. de încercat - mașină de c.c. adică al tuturor părților mobile legate de arborele de ieșire, redus la arborele M.E.) [219]
- $F\Omega$ - reprezintă cuplul de frecări mecanice vâscoase (presupuse proporționale cu viteza, F fiind un coeficient constant de proporționalitate).

În ceea ce privește pierderile în fier în primă aproximație se pot considera proporționale cu Ω și incluse în cuplul $F\Omega$.

Rezolvînd sistemul de ecuații 5.1 d și 5.1" se obțin pentru curenții i_e și i_t expresiile:

$$i_e = \frac{U_E (R_t + pL_t)}{(L_t L'_{ee} - M_{te}^2) p^2 + (R_e L_t + R_t L'_{ee}) p + R_t R_e} \quad (5.23)$$

și

$$i_t = \frac{-p U_E M_{te}}{(L_t L'_{ee} - M_{te}^2) p^2 + (R_e L_t + R_t L'_{ee}) p + R_t R_e} \quad (5.24)$$

și notînd cu T_e constanta de timp a circuitului de excitație:

$$T_e = \frac{L_{eA_0} k_{\mu}}{R_e} = \frac{L'_{ee}}{R_e} \quad (5.25 a)$$

și

$$\sigma_1 T_t = T'_t \quad (5.25 b)$$

Avînd în vedere relațiile 5.15 a,b,c,d și 5.25 a,b rezultă:

$$i_e = \frac{U_E}{R_e} \frac{1}{T_e T'_t} \frac{1 + pT_t}{(p + \alpha_1)(p + \beta_1)} = \frac{U_E}{R_e} \frac{1 + pT_t}{1 + p(T_e + T_t) + p^2 T'_t T_e} \quad (5.26)$$

unde:

α_1 și β_1 - sînt valorile absolute ale rădăcinilor ecuației caracteristice

$$G_t(p) = 1 + p(T_e + T_t) + p^2 T_t' T_e \quad (5.27)$$

(care în cazul mașinii de c.c. sînt reale și negative dacă $G_t(p) = 0$).

De asemenea rezolvînd în mod analog sistemul de ecuații 5.2 d și 5.2''' se obțin pentru curenții i_A și i_τ expresiile:

$$i_A = \frac{\bar{u}_A (R_\tau + pL_\tau)}{(L_\tau L'_{AA} - M_{\tau A}^2)p^2 + (R_A L_\tau + R_\tau L'_{AA})p + R_\tau R_A} \quad (5.28)$$

$$i_\tau = \frac{\pm p u_A M_{\tau A}}{(L_\tau L'_{AA} - M_{\tau A}^2)p^2 + (R_A L_\tau + R_\tau L'_{AA})p + R_\tau R_A} \quad (5.29)$$

Notînd cu T_A constanta electromagnetică a mașinii de c.c.:

$$T_A = \frac{L'_{AA}}{R_A} \quad (5.30 a)$$

și cu

$$T_\tau' = \sigma_2 T_\tau \quad (5.30 b)$$

și avînd în vedere relațiile 5.17 a, b, c și 5.30 a, b, curentul din rotor va fi:

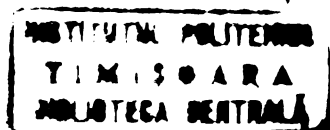
$$i_A = \frac{\bar{u}_A}{R_A} \frac{1}{T_A T_\tau'} \frac{1+pT_\tau}{(p+\alpha_2)(p+\beta_2)} = \frac{\bar{u}_A}{R_A} \frac{1+pT_\tau}{1+p(T_A+T_\tau)+p^2 T_\tau' T_A} \quad (5.31)$$

unde α_2 și β_2 sînt valorile absolute ale rădăcinilor ecuației caracteristice de forma:

$$G_\tau(p) = 1 + p(T_A + T_\tau) + p^2 T_\tau' T_A \quad (5.32)$$

(dacă: $G_\tau(p) = 0$)

./.



Pentru ușurința calculului notînd convențional cu:

$$H_t(p) = 1 + pT_t \quad (5.33)$$

și

$$H_\tau(p) = 1 + pT_\tau \quad (5.34)$$

rezultă în final pentru curentul de excitație i_e , respectiv curentul rotoric i_A relațiile:

$$i_e = \frac{U_E}{R_e} \frac{H_t(p)}{G_t(p)} \quad (5.35)$$

$$i_A = \frac{U_A}{R_A} \frac{H_\tau(p)}{G_\tau(p)} ; (\Omega = 0) \quad (5.36)$$

5.3. Stabilirea funcției de transfer a sistemului mașină de c.c. - mutator static comandat.

5.3.1. Considerații generale.

Conform uzanței din teoria reglajului automat, caracterizarea unui sistem din punct de vedere al calităților sale dinamice se face cu ajutorul funcției de transfer (F.d.T) care permite stabilirea legăturii dintre mărimile de intrare și de ieșire ale unui amplificator în orice regim de funcționare [80, 82]. Totodată în majoritatea cazurilor, F.d.T. se definește în ipoteza că fenomenele din sistemul studiat se pot descrie prin ecuații diferențiale liniare, cu coeficienți constanți, făcîndu-se abstracție de neliniaritățile amplificatorului și de influențe exterioare permanente sau accidentale.

Considerînd ca legătura dintre mărimea de intrare x_i și cea de ieșire x_e a sistemului studiat poate fi descrisă prin ecuația diferențială (cu $n > m$):

$$\begin{aligned} a_0 \frac{d^n x_e}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x_e}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dx_e}{dt} + a_n x_e = \\ = b_0 \frac{d^m x_i}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} x_i}{dt^{m-1}} + \dots + b_{m-1} \frac{dx_i}{dt} + b_m x_i \end{aligned} \quad (5.37)$$

F.d.T. se poate pune sub o formă generală, independentă de regimul de funcționare. [165]

./.

Introducînd operatorul p , ecuația 5.37 se poate exprima prin ecuația simbolică echivalentă:

$$\begin{aligned} (a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n) x_e = \\ (b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m) x_i \end{aligned} \quad (5.38)$$

Din relația 5.38 se deduce că:

$$Y(p) = \frac{x_e}{x_i} = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n} \quad (5.39)$$

Raportul din relația 5.39 s-a convenit să fie denumit funcție de transfer.

Dacă se are în vedere definiția F.d.T. ca fiind egală cu raportul transformatei Laplace ale mărimilor de ieșire și a celor de intrare, cu condiții inițiale nule se obține $p = s$, (cu precizarea că p este un operator și nu o mărime complexă ca variabila s) astfel:

$$Y(s) = \frac{\mathcal{L}(x_e)}{\mathcal{L}(x_i)} \quad (5.40)$$

unde:

$$\mathcal{L}(x) = \int_0^{\infty} e^{-st} x(t) dt \quad (5.41)$$

Din F.d.T. se poate explicita factorul de amplificarea (denumit și factor de transfer).

Dacă numitorul F.d.T. are o rădăcină de ordinul r în origine, iar numărătorul o rădăcină de ordinul q :

adică

$$a_{n-r+1} = a_{n-r+2} = \dots = a_n = 0 \quad (5.42)$$

și

$$b_{m-q+1} = b_{m-q+2} = \dots = b_m = 0 \quad (5.43)$$

se poate scrie expresia:

./.

$$\begin{aligned}
 Y(s) &= \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-q} s^q}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-r} s^r} = \\
 &= K s^{q-r} \frac{\frac{b_0}{b_{m-q}} s^{m-q} + \frac{b_1}{b_{m-q}} s^{m-q+1} + \dots + 1}{\frac{a_0}{a_{n-r}} s^{n-r} + \frac{a_1}{a_{n-r}} s^{n-r+1} + \dots + 1} \quad (5.44)
 \end{aligned}$$

în care raportul:

$$K = \frac{b_{m-q}}{a_{n-r}} \quad (5.45)$$

reprezintă factorul de amplificare sau de transfer.

5.3.2. Funcția de transfer a mașinii de c.c.

Ecuatiile matriceale ale mașinii de c.c. (folosind variabila complexă s a transformatei Laplace) în conformitate cu considerațiile făcute anterior, pot fi scrise sub forma:

$$\begin{bmatrix} U_E(s) \\ \pm U_A(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e \frac{G_t(s)}{H_t(s)} & 0 \\ \pm C_M \Omega & R_A \frac{G_r(s)}{H_r(s)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_e(s) \\ i_A(s) \end{bmatrix} \quad (5.46)$$

în care $G_t(s)$, $G_r(s)$, $H_t(s)$ și $H_r(s)$ reprezintă ecuațiile 5.27 și 5.32, 5.33 și 5.34 scrise cu variabila s . De remarcat că zero din matricea coeficient indică absența unui cuplaj mutual între înfășurarea de excitație și cea din rotor.

Avînd în vedere funcționarea mașinii de c.c., cu succesiunea fenomenelor în cazul concret considerat, se pot scrie în continuare expresiile sub formă matriceală a curentului de excitație, a curentului rotoric, respectiv a cuplului electromagnetic. [182,232]

5.3.2.1. Expresia curentului de excitație $i_e(s)$

va fi:

$$i_e(s) = \frac{\begin{vmatrix} U_E(s) & 0 \\ U_A(s) & R_A \frac{G_t(s)}{H_t(s)} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} R_e \frac{G_t(s)}{H_t(s)} & 0 \\ \pm C_M \Omega & R_A \frac{G_t(s)}{H_t(s)} \end{vmatrix}} = \frac{U_E(s)}{R_e} \cdot \frac{H_t(s)}{G_t(s)} \quad (5.47)$$

dar F.d.T. va fi (considerînd ca mărime de ieșire curentul de excitație):

$$Y_e(s) = \frac{i_e(s)}{U_E(s)} = \frac{H_t(s)}{R_e G_t(s)} = \frac{1}{R_e} \frac{1+sT_t}{1+s(T_e+T_t)+s^2 T_e T_t} \quad (5.48)$$

Deoarece la funcționare în regim staționar

$$H_t(s) = 1 \text{ și } G_t(s) = 1$$

rezultă pentru curentul de excitație:

$$I_e = \frac{U_E}{R_e} \cong \text{ot} \quad (5.49)$$

5.3.2.2. Expresia curentului rotor și a cuplului electromagnetic.

La funcționarea în regim de motor, curentul rotor va fi:

$$i_A(s) = \frac{\begin{vmatrix} R_e \frac{G_t(s)}{H_t(s)} & U_E(s) \\ \pm C_M \Omega & \pm U_A(s) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} R_e \frac{G_t(s)}{H_t(s)} & 0 \\ \pm C_M \Omega & R_A \frac{G_t(s)}{H_t(s)} \end{vmatrix}} = \pm \frac{H_t(s) U_A(s)}{G_t(s) R_A} + \frac{H_t(s) H_t(s) C_M U_E(s) \Omega}{G_t(s) G_t(s) R_e R_A} \quad (5.50)$$

Deoarece curentul din circuitul de excitație este menținut constant ($I_e = \text{ot}$), (adică $H_t(s)=1$; $G_t(s)=1$), în acest caz rezultă pentru curentul rotor expresia:

$$i_A(s) = \pm \frac{H_t(s) U_A(s)}{G_t(s) R_A} + \frac{H_t(s) C_M U_E(s) \Omega}{G_t(s) R_e R_A} \quad (5.51)$$

./.

Cuplul electromagnetic (înlocuind în expresia 5.4.e valoarea curentului dată de relația 5.51) va fi:

$$m(s) = \pm \frac{H_{\tau}(s) C_M I_e U_A(s)}{G_{\tau}(s) R_A} \mp \frac{H_{\tau}(s) U_E(s) C_M^2 I_e \Omega}{G_{\tau}(s) R_A} \quad (5.52)$$

Dacă mașina de c.c. lucrează în regim de motor, cu rotorul blocat ($\Omega = 0$) expresia cuplului devine:

$$m(s) = \frac{\pm H_{\tau}(s) C_M I_e u_A(s)}{G_{\tau}(s) R_A} = \frac{\pm H_{\tau}(s) k_e u_A(s)}{G_{\tau}(s) R_A} = \frac{\pm H_{\tau}(s) K_M u_A(s)}{G_{\tau}(s)} \quad (5.53)$$

unde s-a notat cu:

$$K_M = \frac{k_e}{R_A}, \quad (5.54)$$

în care:

K_M - reprezintă coeficientul de amplificare tensiune-cuplu.

F.d.T. în acest caz va fi, (pentru cuplu ca mărime de ieșire și tensiunea ca mărime de intrare):

$$Y_m(s) = \frac{m(s)}{u_A(s)} = \frac{H_{\tau}(s)}{G_{\tau}(s)} K_M \quad (5.55)$$

La funcționarea în regim staționar, (deoarece $H_{\tau}(s) = 1$: $G_{\tau}(s) = 1$) rezultă:

$$M = K_M U_A \quad (5.53 a)$$

Această expresie reprezintă în fond ecuația unei drepte.

La funcționarea în regim de generator expresia 5.52 devine:

./.

$$m(s) = \frac{\pm H_{\tau}(s) k_e u_A(s)}{G_{\tau}(s) R_A} \pm \frac{H_{\tau}(s) k_e^2 \Omega}{R_A G_{\tau}(s)} \quad (5.56 \text{ c})$$

sau (ținând cont de relația 5.54):

$$m(s) = \frac{\pm H_{\tau}(s) K_M u_A(s)}{G_{\tau}(s)} \pm \frac{H_{\tau}(s) F' \Omega}{G_{\tau}(s)} \quad (5.56 \text{ d})$$

în care s-a notat cu:

$$F' = \frac{k_e^2}{R_A} \quad (5.57)$$

coeficientul de frecare vîscoasă artificială introdusă funcțional de sistemul mașină de c.c. - mutator.

În ipoteza că $u_A(s) = 0$ atunci $m(s)$ va fi:

$$m(s) = F' \frac{H_{\tau}(s) \Omega}{G_{\tau}(s)} \quad (5.58)$$

Cuplul în regim staționar în cele două situații de funcționare a) ca generator:

$$M_G(\Omega \neq 0) = F' \Omega - K_M u_A = F' \Omega + K_M (U_{d0} \cos \beta - \Delta u_x + \Delta u_r + \Delta u_a) \quad (5.59)$$

în care tensiunea u_A a fost înlocuită cu valoarea sa dată de relația 4.18 b) ca motor:

$$M_m(\Omega \neq 0) = k_M u_A - F' \Omega = K_M (U_{d0} \cos \alpha - \Delta u_x - \Delta u_r - \Delta u_a) \quad (5.60)$$

unde tensiunea u_A este conform expresiei sale din relația 4.12.

Dacă se neglijează pierderile: Δu_x , Δu_r , Δu_a , relațiile 5.59 și 5.60 pot fi scrise sub formă simplificată:

$$M_G = F' \Omega + K_M U_{d0} \cos \beta \quad (5.59 \text{ a})$$

și

$$M_m = K_M U_{d0} \cos \alpha - F' \Omega \quad (5.60 \text{ a})$$

De remarcat că ambele regimuri de funcționare la încărcări mici manifestă tendință de instabilitate. [28]

5.3.3. Funcția de transfer a sistemului mașină de c.c. - mutator, din cadrul instalației de încercare (I-M.E.).

Pentru stabilirea F.d.T. a sistemului mașină de c.c. - mutator, se au în vedere considerațiile făcute anterior la punctele 5.2.3 și 5.3.2.

Astfel expresia cuplului din relația 5.5 b poate fi scrisă sub forma:

$$m_R = m \pm F \Omega \pm s J_{TM} \Omega = m \pm F (1 + s T_m) \Omega \quad (5.5 c)$$

în care:

$$T_m = \frac{J_{TM}}{F} - \text{reprezintă constanta electromecanică de timp a mașinii de c.c.} \quad (5.61)$$

Dacă în relația 5.56 d se înlocuiește Ω cu expresia acesteia obținută din relația 5.5. c, cuplul în acest caz devine:

$$m(s) = \frac{\pm H_I(s) K_M^u A(s)}{G_I(s)} \pm \frac{H_I(s) F'}{G_I(s)} \left[\frac{m_R(s)}{F(1+sT_m)} - \frac{m(s)}{F(1+sT_m)} \right] \quad (5.56 e)$$

Scotînd în factor pe $m(s)$ rezultă:

$$m(s) \left[1 \mp \frac{H_I(s) \beta_f}{G_I(s) (1+sT_m)} \right] = \frac{H_I(s)}{G_I(s)} \left(\pm K_M^u A(s) \mp \frac{\beta_f m_R(s)}{1+sT_m} \right) \quad (5.56 f)$$

în care

$$\beta_f = \frac{F'}{F} \quad (5.62)$$

Astfel, cuplul va avea în final expresia:

$$m(s) = \frac{\frac{H_I(s)}{G_I(s)} \left(\pm K_M^u A(s) \mp \frac{\beta_f m_R(s)}{1+sT_m} \right)}{1 \pm \beta_f \frac{H_I(s)}{G_I(s) (1+sT_m)}} = \frac{H_I(s) \left[\pm K_M^u A(s) (1+sT_m) \mp \beta_f m_R(s) \right]}{\pm \beta_f H_I(s) + G_I(s) (1+sT_m)} \quad (5.56 g)$$

./.

F.d.T. a sistemului în raport cu tensiunea u_A (de comandă) va fi în acest caz:

$$Y_m(s) = \left[\frac{m(s)}{u_A(s)} \right]_{m_R(s)=0} = \frac{\pm H_\tau(s) K_M (1+sT_m)}{\pm \beta_f H_\tau(s) + G_\tau(s) (1+sT_m)} \quad (5.63)$$

sau scrisă sub formă explicită:

$$Y_m(s) = \left[\frac{m(s)}{U_A(s)} \right]_{m_R(s)=0} = \frac{\pm K_M (1+sT_\tau) (1+sT_m)}{\pm (1+sT_\tau) \beta_f + (1+sT_m) [1+s(T_{Ak}+T_\tau)] + s^2 T_{Ak} T_\tau} \quad (5.63a)$$

în care:

$$T_{Ak} = \frac{L_{AA} + L_k}{R_A + R_k} \quad (5.64)$$

iar:

L_k și R_k - reprezintă inductivitatea, respectiv rezistența aparținând impedanței de sarcină $Z_k(s)$, în cazul de față a mutatorului static comandat.

Scrisă sub altă formă, F.d.T. este:

$$Y_m(s) = \frac{\pm K_M [1+s(T_\tau + T_m) + s^2 T_\tau T_m]}{1 + \beta_f + s [T_{Ak} + T_m + T_\tau (1 + \beta_f)] + s^2 (T_{Ak} T_m + T_\tau T_m + T_{Ak} T_\tau) + s^3 T_{Ak} T_\tau T_m} \quad (5.63b)$$

Tinând cont de expresia F.d.T. (5.63 a), formula pentru cuplu devine:

$$\begin{aligned} m(s) &= Y_m(s) \left[\pm u_A(s) \mp \frac{\beta_f m_R(s)}{K_M (1+sT_m)} \right] = \\ &= Y_m(s) \left[\pm u_A(s) \mp \frac{K_M^* m_R(s)}{1+sT_m} \right] \end{aligned} \quad (5.56h)$$

în care trebuie reținut caracterul de perturbație a cuplului static rezistent $m_R(s)$ și unde s-a notat cu:

$$K_M^* = \frac{\beta_f}{K_M} \quad (5.65)$$

./.

În acest caz relația 5.56 poate fi scrisă și sub forma:

$$m(s) = \pm Y_{n(s)} U_A(s) \mp Y_z(s) m_R(s) \quad (5.56 \text{ i})$$

în care:

$$Y_z(s) = \left[\frac{m(s)}{m_R(s)} \right]_{U_A=0} = Y_m(s) \frac{K'_M}{1 + sT_m} \quad (5.66)$$

iar :

factorul $\frac{1}{1+sT_m}$ reprezintă un element inertial aperiodic.

Studiind F.d.T. $Y_m(s)$, se pot trage unele concluzii asupra formei curbei de variație a cuplului la arborele M.E. de încercat, la un semnal treaptă la intrare.

De remarcat că o primă apreciere a stabilității se poate efectua analizând rădăcinile reale ale ecuației caracteristice $x_i(s)$ din cadrul expresiei care reprezintă F.d.T. a sistemului în circuit deschis. Astfel:

$$Y_d(s) = \frac{x_e(s)}{x_f(s)} = \frac{K_d [1 + s(T_f + T_m) + s^2 T_f T_m]}{(1 + sT_\Sigma) \{ (1 + sT_f) \beta_f + (1 + sT_m) [1 + s(T_{Ak} + T_f) + s^2 T_{Ak} T_f] \}} \quad (5.67)$$

în care:

K_d - coeficient de amplificare global al circuitului deschis;

T_Σ - constantă de timp reprezentând suma constantelor de timp parazite (introduse de elementele fizice din cadrul circuitului de reacție a sistemului).

Efectuând calculele ecuației caracteristice $x_i(s)$

se obține:

$$x_i(s) = s^3 (T_\Sigma T_m T_{Ak} + T_\Sigma T_m T_f) + s^2 [T_m (T_{Ak} + T_f) + T_\Sigma (T_{Ak} + T_m) + T_\Sigma T_f (1 + \beta_f)] + s [T_{Ak} + T_m + (T_f + T_\Sigma) (1 + \beta_f)] + \beta_f + 1 = 0 \quad (5.68)$$

în care s-a considerat $T_{Ak} T_f \approx 0$, T_f fiind foarte mic.

Se observă că ecuația (5.68) este de forma:

$$a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3 = 0 \quad (5.69)$$

Introducînd valorile numerice ale constantelor calculate conform anexei I, ecuația 5.69 are forma:

$$57,01910^{-6}s^3 + 8203,9010^{-6}s^2 + 42208010^{-6}s + 11,9=0 \quad (5.70)$$

Coeficienții ecuației 5.70 sînt:

$$a_0 = T_{\Sigma}T_mT_{Ak} + T_{\Sigma}T_mT_{\tau} = 57,01910^{-6} \quad (5.71)$$

$$a_1 = T_m(T_{Ak}+T_{\tau}) + T_{\Sigma}(T_{Ak}+T_m) + T_{\Sigma}T_{\tau}(1+\beta_f) = 8203,9010^{-6} \quad (5.72)$$

$$a_2 = T_{Ak}+T_m + (T_{\tau} + T_{\Sigma})(1+\beta_f) = 42208010^{-6} \quad (5.73)$$

$$a_3 = 1 + \beta_f = 11,9 \quad (5.74)$$

Ecuația 5.70 poate fi scrisă însă sub o formă clasică cunoscută:

$$s^3 + As^2 + Bs + 1 = 0 \quad (5.70a)$$

sau în valori numerice:

$$s^3 + 143,90s^2 + 7400s + 208000 = 0 \quad (5.70b)$$

Se poate verifica cu ușurință că este îndeplinită condiția de stabilitate ($AB > 1$). Aplicînd criteriul Routh-Hurwitz, [166] se obține produsul caracteristic:

$$AB = 1,064861010^6 > 1 \quad (5.75)$$

deci procesul tranzitoriu va avea o alură favorabilă.

Așa după cum se arată și în literatura de specialitate, [166,210] o importanță deosebită în studiul stabilității unui S.A. o reprezintă cunoașterea poziției rădăcinilor ecuației caracteristice sau a locului geometric al rădăcinilor respective. Cunoscînd poziția în planul complex "s" a rădăcinilor ecuației caracteristice, sescoate în evidență comportarea dinamică a sistemului pentru orice valoare a parametrului variabil considerat. Acest fapt conduce în același timp la sinteza rețelelor de corecție necesare în scopul obținerii dinamicii dorite.

5.4. Concluzii.

Analiza funcționării sistemului mașină de c.c. - mutator în condiții cât mai exacte se poate efectua pornind de la ecuațiile de funcționare ale mașinii de c.c. în regim dinamic, cu luarea în considerare a efectelor datorate saturației circuitului magnetic, fenomenului de reacție a indusului cum și efectelor datorită curenților turbionari (care apar în special în cazul funcționării unei mașini de c.c. cuplată electric cu un mutator static comandat).

În acest capitol s-au stabilit ecuațiile de funcționare a sistemului în cele trei situații distincte:

- a) motor de c.c. (cu rotor blocat) - redresor comandat;
- b) generator de c.c. (cu rotorul liber) - invertor comandat;
- c) comutare automată de la un regim de funcționare la altul.

Pentru a evidenția efectele saturației cât și a curenților turbionari asupra câmpului polilor auxiliari, s-a introdus un factor de saturație $k_{\mu p}$, respectiv o înfășurare echivalentă suplimentară cuplată magnetic cu înfășurarea rotorică și în principal cu cea a polilor auxiliari.

Totodată s-a stabilit F.d.T. a sistemului mașină de c.c. - mutator cu posibilitate de a calcula în același timp rădăcinile ecuației caracteristice, în scopul studierii comportării în regim dinamic a S.A. atât pe cale analitică (folosindu-se criteriile de stabilitate date în literatură), cât și cu ajutorul calculatorului numeric, astfel încât rezultatele respective să poată fi analizate comparativ cu cele obținute pe cale experimentală. Se constată în primul rând că S.A. adoptat este un sistem stabil, existența unui cuplu static constant în momentul inițial de pornire constituind un efect favorabil stabilității S.A. la apariția unui semnal la intrare, în formă de treaptă.

Deși se pleacă de la o serie de relații cunoscute din literatura de specialitate, se apreciază că prezentul capitol are un caracter original, întrucât se referă la studiul unui sistem caracteristic instalației de încercare (I-M.E.), care la rândul ei reprezintă o lucrare originală, brevetată. [99],[105]

C A P I T O L U L VI

STUDIUL DINAMICII SI STABILITATII SISTEMULUI DE REGLARE AUTOMATA ADOPTAT CU AJUTORUL CALCULATORULUI NUMERIC

6.1. Considerații generale.

După cum este cunoscut, studiul unei scheme de reglare automată se poate efectua cu ușurință dacă fiecare element component se reprezintă printr-un bloc caracterizat printr-o F.d.T. și apoi se structurează aceste blocuri între ele, conform schemei reale de circulație a semnalelor, într-o schemă structurală. În afara simplificării calculelor, schemele structurale pot sugera influențele diferitelor părți componente ale acestora, efectul unor perturbații etc. [19, 50, 69, 174, 180, 232, 237]

Comportarea dinamică a unui S.A. (stabilă sau instabilă), depinde de semnul rădăcinilor ecuației caracteristice, adică polii F.d.T. Pentru ca S.A. să fie stabil este necesar și suficient ca toți polii F.d.T. să fie situați în semiplanul stîng al planului complex "s" [19, 166, 174, 209]. În consecință nestabilitatea S.A. se va datora faptului că partea reală a rădăcinilor complexe este pozitivă, limita de stabilitate obținându-se atunci cînd partea reală a perechii de rădăcini complexe este egală cu zero. Cu aceleași considerații se poate conchide că S.A. cu timp mort sînt stabile dacă polii F.d.T., adică rădăcinile ecuației caracteristice:

$$1 + Y_m(s) e^{-T_m s} = 0 \quad (6.1)$$

sînt localizați în semiplanul stîng al planului complex "s" [19, 20, 166, 174, 209].

În consecință pentru proiectarea și realizarea unui S.A. este necesar să se cunoască nu numai stabilitatea acestuia, ci și cum anumite mărimi fizice ale S.A., influențează atît comportarea dinamică a S.A., precum și modalitatea de modificare și determinare a acestor mărimi, astfel încît sistemului să i se asigure o funcționare optimală, cu indicii de calitate propuși atît în procesul tranzitoriu cît și cel sta-

ționar. Dat fiind avantajele pe care le prezintă încercările experimentale, rezultatele obținute pot fi folosite la studiul stabilității, de exemplu răspunsul la frecvență. Acest deziderat este satisfăcut în parte sau în totalitate de o serie de criterii (mai des folosite) și anume: Routh-Hurwitz, Nyquist, Cremer-Leonard-Mihailov. [19,32] O metodă modernă și eficientă însă în studiul S.A. o constituie utilizarea calculatoarelor electronice. [32, 33,123,209]

6.2. Studiul funcției de transfer a sistemului.

Cu aceste considerații studiul dinamicii și a stabilității S.A. adoptat în cadrul instalației de încercare (I-M.E.), se poate ^{face}ținând seama de schema structurală echivalentă a acestuia, (reprezentată în fig.6.1), în care conform uzanței, pentru fiecare bloc în parte s-a scris F.d.T. corespunzătoare. [50,119]

Deoarece obiectul de reglat are două regimuri de funcționare distincte, pe blocul respectiv s-au trecut F.d.T. respective, iar în tabelul 6.1. s-au dat valorile calculate ale coeficienților de amplificare și constantelor de timp (conform anexei I) a S.A. din cadrul I-M.E. realizate.

Totodată în vederea studiului stabilității S.A. și acordării optimale a regulatorului s-a considerat că sistemul mașină de c.c. - mutator, este un sistem cu structură variabilă și funcționează în regim de generator, cu recuperarea energiei în rețeaua de c.a.

Având în vedere considerațiile făcute, ecuația caracteristică $x_1(s)$ din cadrul expresiei 5.63, (ținând cont și de constanta de timp T'_τ care în ecuația 5.68 a fost neglijată) se prezintă sub forma:

$$s^3 T_m T_{Ak} T'_\tau + s^2 (T_m T_{Ak} + T_m T_\tau + T_{Ak} T'_\tau) + s (\beta_f T_\tau + T_m + T_{Ak} + T_\tau) + \beta_f + 1 = 0 \quad (6.2)$$

în care coeficienții a_0, a_1, a_2 și a_3 au valorile:

$$a_0 = T_m T_{Ak} T'_\tau = 1,594310^{-6} \quad (6.3)$$

$$a_1 = T_m T_{Ak} + T_m T_\tau + T_{Ak} T'_\tau = 4877,9610^{-6} \quad (6.4)$$

$$a_2 = T_\tau (1 + \beta) + T_m + T_{Ak} = 6434310^{-6} \quad (6.5)$$

$$a_3 = 1 + \beta_f = 11,9 \quad (6.6)$$

∴

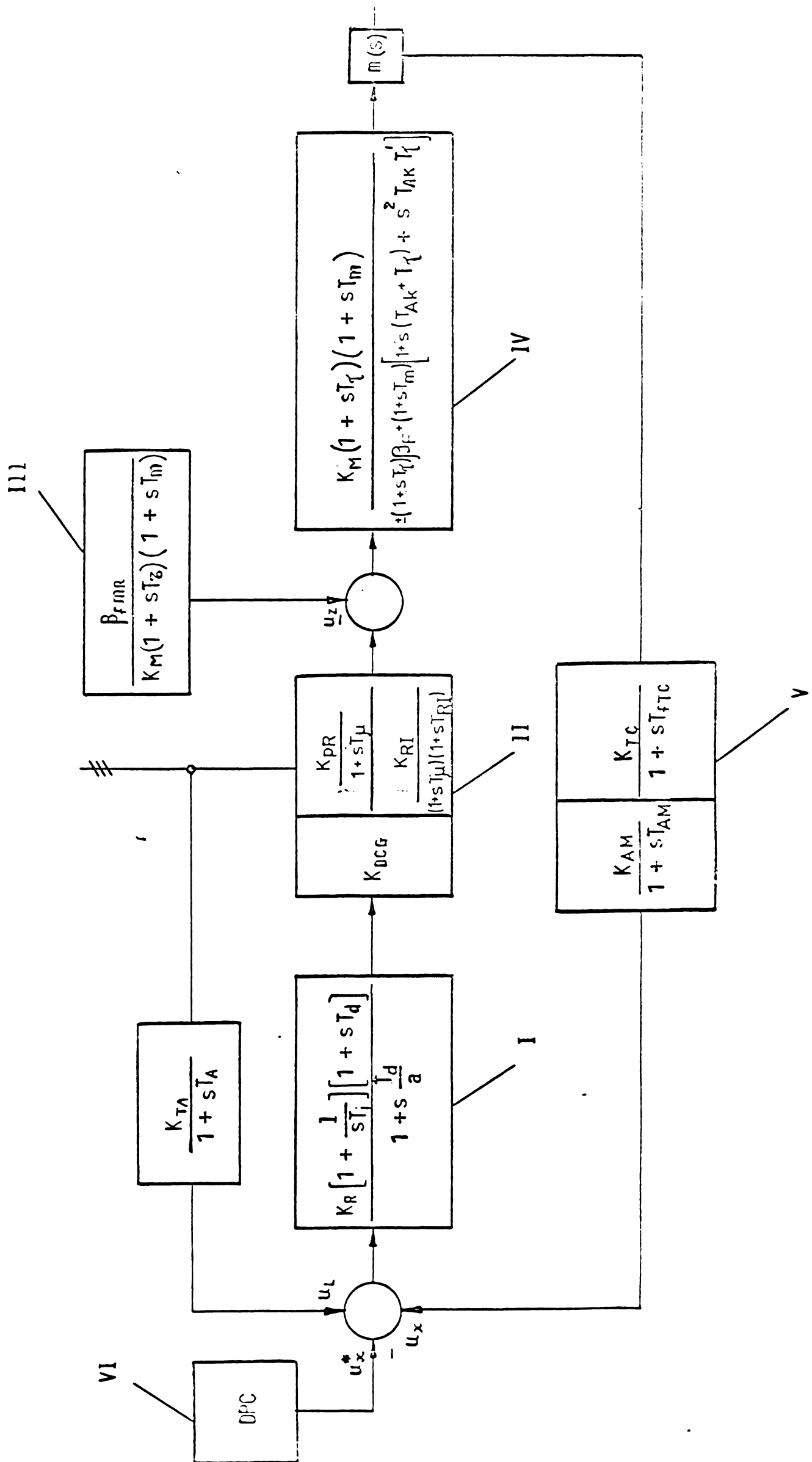


Fig. 6.1

	Denumirea blocului functional	Funcția de transfer F.d.T	Constante de timp (m s)	Coeficienti de amplificare
1	OBJECT REGLAT : Masina de curent continuu (M.C.C) a) Motor (cu rotor blocat) b) Generator (cu frinare recuperativa)	$Y_m(s) = \frac{K_M(1 + T_g)}{1 + \beta_f + s(T_{AK} + T_g) + s^2 T_{AK} T_g}$ $Y_m(s) = \frac{K_M(1 + sT_g)(1 + T_m)}{(1 + sT_g)\beta_f + (1 + sT_m)[1 + s(T_{\mu K} + T_g) + s^2 T_{AK} T_g]}$	$T_g = 1,83$ $T_{AK} = 18,36$ $T_g = 0,36$ $T_m = 242$ $T_g = 1,83$ $T_{AK} = 18,36$ $T_g = 0,36$	$K_M = 16 \left[\frac{V}{\Omega \text{rad}} \right]$
2	ELEMENT DE EXECUTIE : Mutator static comandat (M.S.C) a) Redresor comandat b) Invertor c) Dispozitiv de comanda pe grila (D.C.G)	$Y_m(s) = \frac{K_{PR}}{1 + sT_{\mu}}$ $Y_m(s) = \frac{K_{PI}/(1 + sT_{\mu})}{1 + sT_{PI}}$ $Y_{DCC}(s) = K_{DCC}$	$T_{\mu} = 1,67$ $T_{\mu} = 1,67$ $T_{PI} = 10$	$K_{PR} = 324 \left[\frac{V}{\text{rad}} \right]$ $K_{PI} = 167 \left[\frac{V}{\text{rad}} \right]$ $K_{DCC} = 0,52 \left[\frac{\text{rad}}{V} \right]$
3	BLOC DE REGLARE : a) Regulator de cuplu b) Traductor de cuplu c) Amplificator de masura	$Y_r(s) = \frac{K(1 + \frac{1}{sT_i})(1 + sT_d)}{1 + s\frac{T_d}{\theta}}$ $Y_{TC}(s) = \frac{K_{TC}}{1 + sT_{TC}}$ $Y_T(s) = \frac{K_{AM}}{1 + sT_m}$	$T_i = 21$ $T_d = 15$ $T_{TC} = 6$ $T_T = 2$	$K_K = 0,023 \left[\frac{\text{sv}}{V} \right]$ $K_{AM} = 0,5 \left[\frac{V}{\theta V} \right]$
4	PERTURBANTIA	$Y_z(s) = Y_m(s) \frac{K'_M}{1 + sT_m}$	$T_m = 242$	$K'_M = 0,71 \left[\frac{\text{rad}}{V} \right]$

Inlocuind coeficienții respectivi din ecuația 6.2. cu valorile lor numerice și împărțind cu a_0 se obține:

$$s^3 + 3059,6249s^2 + 40358,15s + 7464090,8 = 0 \quad (6.7)$$

Calculând rădăcinile ecuației de gradul 3, și făcând substituția:

$$s = 100z \quad (6.8)$$

rezultă o ecuație de gradul 3 în "z":

$$z^3 + 30,596249z^2 + 4,035815z + 7,4640908 = 0 \quad (6.9)$$

Făcând în continuare substituția:

$$z = y - \frac{30,596249}{3} \quad (6.10)$$

rezultă ecuația redusă de forma:

$$y^3 - 308,00765y + 2087,90 = 0 \quad (6.9 a)$$

Calculând mai departe rădăcinile ecuației 6.9 a, respectiv 6.9 se obțin următoarele valori numerice, pentru rădăcinile ecuației 6.7:

$$s_1 = -3047 \quad (6.11)$$

$$s_2 = 6,2749 - 49,19j \quad (6.12)$$

$$s_3 = 6,2749 + 49,19j \quad (6.13)$$

Ca atare F.d.T. în circuit deschis, introducând valorile numerice de mai sus este de forma:

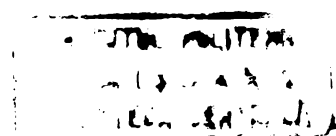
$$Y_d(s) = \frac{30,8 (s+0,0041)(s+544,6623)}{(1+sT_{\Sigma})(s-3047)(s+6,2749-j49,19)(s+6,2749+j49,19)} \quad (6.14)$$

în care:

$$K_d = K_{DcG} K_{pM} K_M K_{AM} K_{Tc} \approx 30,8 \quad (6.15)$$

Coeficienții $\alpha_2 = -0,0041$; $\beta_2 = -544,6623$ reprezintă rădăcinile ecuației de la numărătorul F.d.T. din expresia 5.67.

./.



F.d.T. conform relației 6.14, în circuit deschis, fără regulator, pentru un anumit regim de funcționare dat (ținând seama de schema echivalentă din fig. 6.1 și de valorile numerice din tabelul 6.1) poate fi scrisă în final sub forma:

$$Y_m(s) = \frac{5,13955610^8 (s+4,322) (s+544,6623)}{(s+598,8025)(s+100)(s+3047,180)(s+627+j491)(s+627-j491)} \quad (6.16)$$

Pentru F.d.T. din relația 6.16 folosind programul RASFRE [3] s-au trasat cu ajutorul calculatorului numeric, caracteristicile de frecvență.

Acest program servește la determinarea răspunsului la frecvența a F.d.T. raționale de ordin $n \leq 10$.

Răspunsul la frecvență al unui S.A. deschis se obține prin înlocuirea simbolului s din F.d.T. prin $j\omega$, (metodă cunoscută din tehnica curenților alternativi sinusoidali în regim cvasistaționar).

Prin urmare:

$$Y(j\omega) = M(\omega) e^{j\varphi(\omega)} = R(\omega) + jX(\omega) \quad (6.17)$$

unde:

$R(\omega)$ și $X(\omega)$ au valori reale care se pot reprezenta grafic prin caracteristicile modul-frecvență $M(\omega)$ și fază-frecvență $\varphi(\omega)$.

Răspunsul la frecvență se poate da deci sub forma unor caracteristici de frecvență în care:

$$|Y(j\omega)| = M(\omega) \text{ și } \arg Y(j\omega) = \varphi(\omega) \quad (6.18)$$

sau:

$$|Y(j\omega)| = |R(\omega)^2 + X(\omega)^2|^{1/2} \quad (6.19)$$

și

$$\arg Y(j\omega) = \arctan \frac{X}{R} \quad (6.20)$$

Totodată răspunsul la frecvență se poate da și sub forma unei diagrame Nyquist, constând din trasarea curbei care are ca abscisă $R(\omega)$ și ordonată $X(\omega)$.

Din analiza caracteristicii de frecvență a sistemului necompensat reprezentată în fig.6.2 se observă că datorită polilor complecși există un maxim de rezonanță, ce corespunde aproximativ la $\omega_r = 48$. Scăderea bruscă a amplitudinii atrage după sine o variație bruscă a fazei, la care se adaugă defazajul introdus de polul de integrare, depășindu-se astfel 180° .

6.3. Acordarea optimă a regulatorului de cuplu.

În vederea obținerii unei compensări optime a sistemului mașină de c.c. - mutator, s-a adoptat un regulator P.I.D. (proporțional - integral-diferențial) cu F.d.T. de forma:

$$Y_R(s) = K_R \left(1 + \frac{1}{sT_i} \right) \left(\frac{1+sT_d}{1+s\frac{a}{d}} \right) = K_R \frac{(1+sT_i)(1+sT_d)}{sT_i(1+s\frac{a}{d})} =$$

$$= \frac{K_R a (s + \frac{1}{T_i})(s + \frac{1}{T_d})}{s(s + \frac{a}{T_d})} \quad (6.21)$$

în care s-a considerat:

$$\frac{1}{T_i} = \omega_r = 48 \quad (6.22)$$

și

$$\frac{1}{T_d} = 66,667 \quad (6.23)$$

ceea ce corespunde pentru constanta de integrare $T_i = 0,021$ s, iar pentru constanta de derivare $T_d = 0,015$ s, (K_R fiind factorul de amplificare al regulatorului P.I.D).

Coeficientul din cadrul expresiei 6.21 este determinat de tipul regulatorului folosit, acesta de obicei avînd valoarea 10.

Introducînd valorile corespunzătoare F.d.T. pentru regulatorul ales expresia 6.21 va deveni:

$$Y_R(s) = \frac{K_R 10 (s+48)(s+66,667)}{s(s+66,67)} \quad (6.24)$$

./.

Cu aceste valori s-au ridicat apoi caracteristicile de frecvență ale sistemului compensat și diagrama Nyquist, reprezentate în fig. 6.3, respectiv 6.4.

Din analiza acestor caracteristici se observă că s-a obținut o margine de fază ϕ_m adecvată:

$$\phi_m = \frac{\pi}{3} = \pi - \frac{2\pi}{3} \quad (6.25)$$

necesară pentru aproximările efectuate la stabilirea schemei echivalente a sistemului real.

Pentru definitivarea coeficientului de amplificare al regulatorului s-a folosit metoda locul rădăcinilor, (prin determinarea dispunerii polilor și zerourilor F.d.T.), utilizându-se în acest scop programul de calcul L.O.C.R.D. [4]

În figura 6.5 s-a reprezentat trasarea locului rădăcinilor, folosind datele obținute de la calculator, redată în tabelul 6.2 în zona din apropierea axei imaginare. S-a ales un coeficient de amplificare $K_r = 0,95$ ce corespunde unui factor de amortizare $\xi \approx \frac{\pi}{360}$; $\phi_m = \frac{\pi}{6}$ determinat de ramurile pornind din poli complecși. [199] F.d.T. a regulatorului, în acest caz va fi:

$$Y_r(s) = \frac{9,5(s+4,8)(s+66,667)}{s(s+666,67)} \quad (6.26)$$

6.4. Stabilirea schemei pentru modelare pe calculatorul ICL.

Pe calculatorul numeric I.C.L. 1902 A s-a modelat S.A. (folosind instrucțiunile de modelare conform programului MK₁ - Analogue Computer Simulation) în vederea verificării performanțelor dinamice ale acestuia.

În fig.6.6 s-a redat schema de modelare, trecându-se de la blocurile ce reprezintă diversele elemente fizice la blocurile corespunzând limbajului programului MK₁. În tabelul 6.3 este redată listarea răspunsului sistemului modelat în ipoteza că acesta are o structură variabilă, iar în fig. 6.7 este reprezentată curba de răspuns a sistemului $M=f(t)$, din cadrul instalației de încercare, în situația existenței la arborele M.E. de încercat în momentul pornirii a unui cuplu sta-

CARACTERISTICELE DE FRECVENȚĂ
 DEMONSTRĂ PSOLUȚĂCI - SISTEM "RECOMPENSĂ"

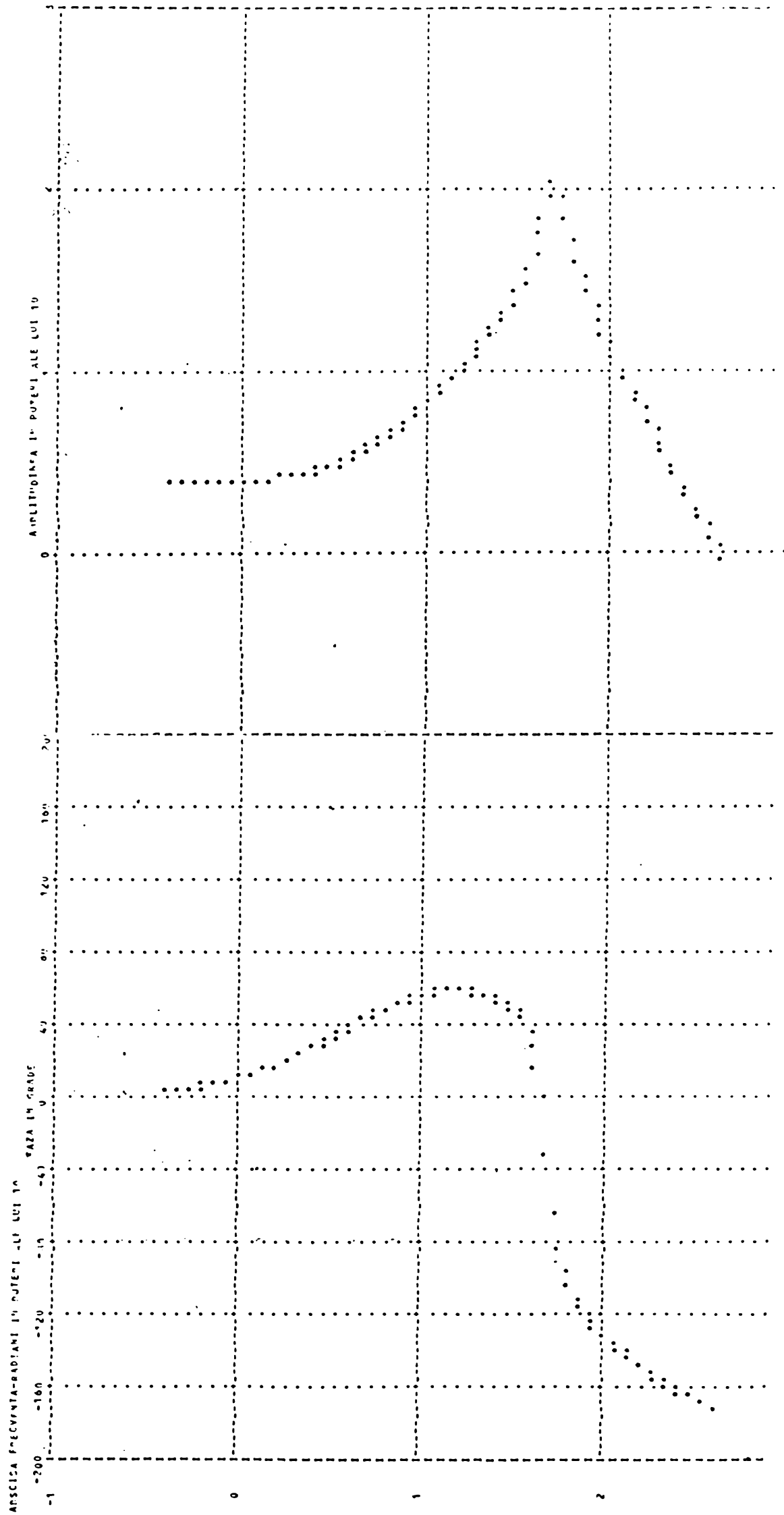


Fig. 6.2

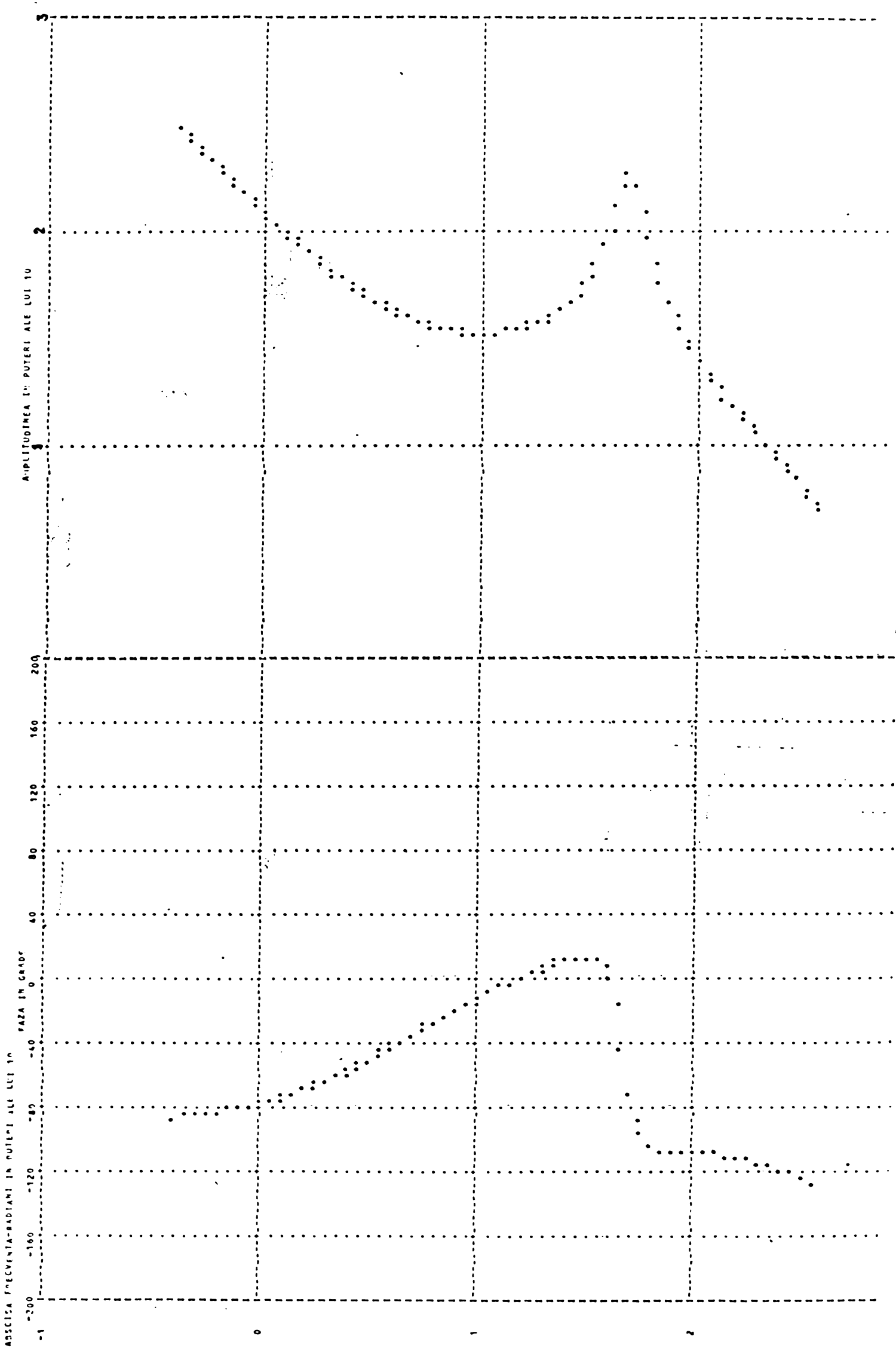


Fig. 6.3

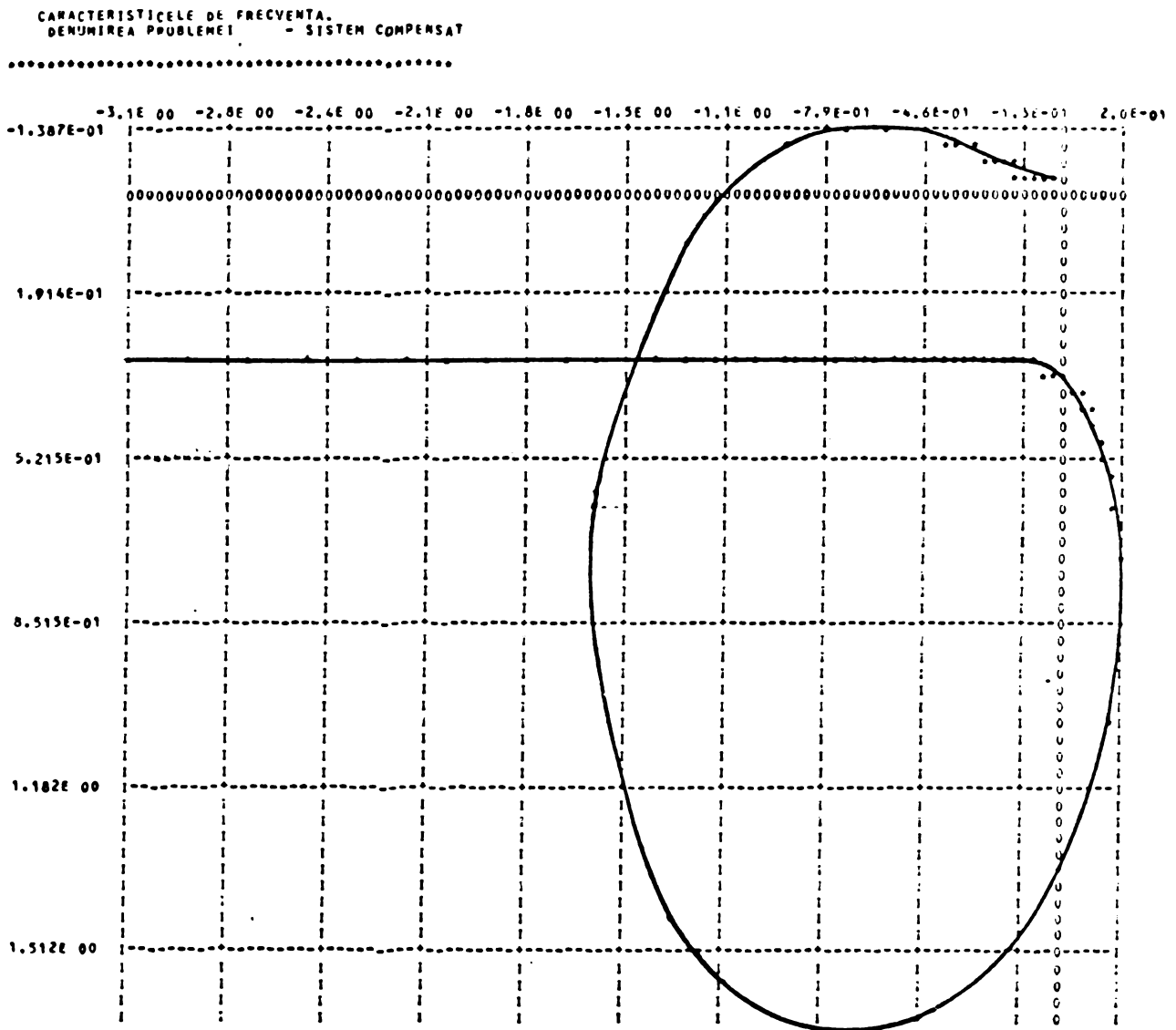


Fig. 6.4

Nota : Ramura 3-4 care pleaca din polii
complexi este cea mai apropiata
de axa imaginara (ca unghi)

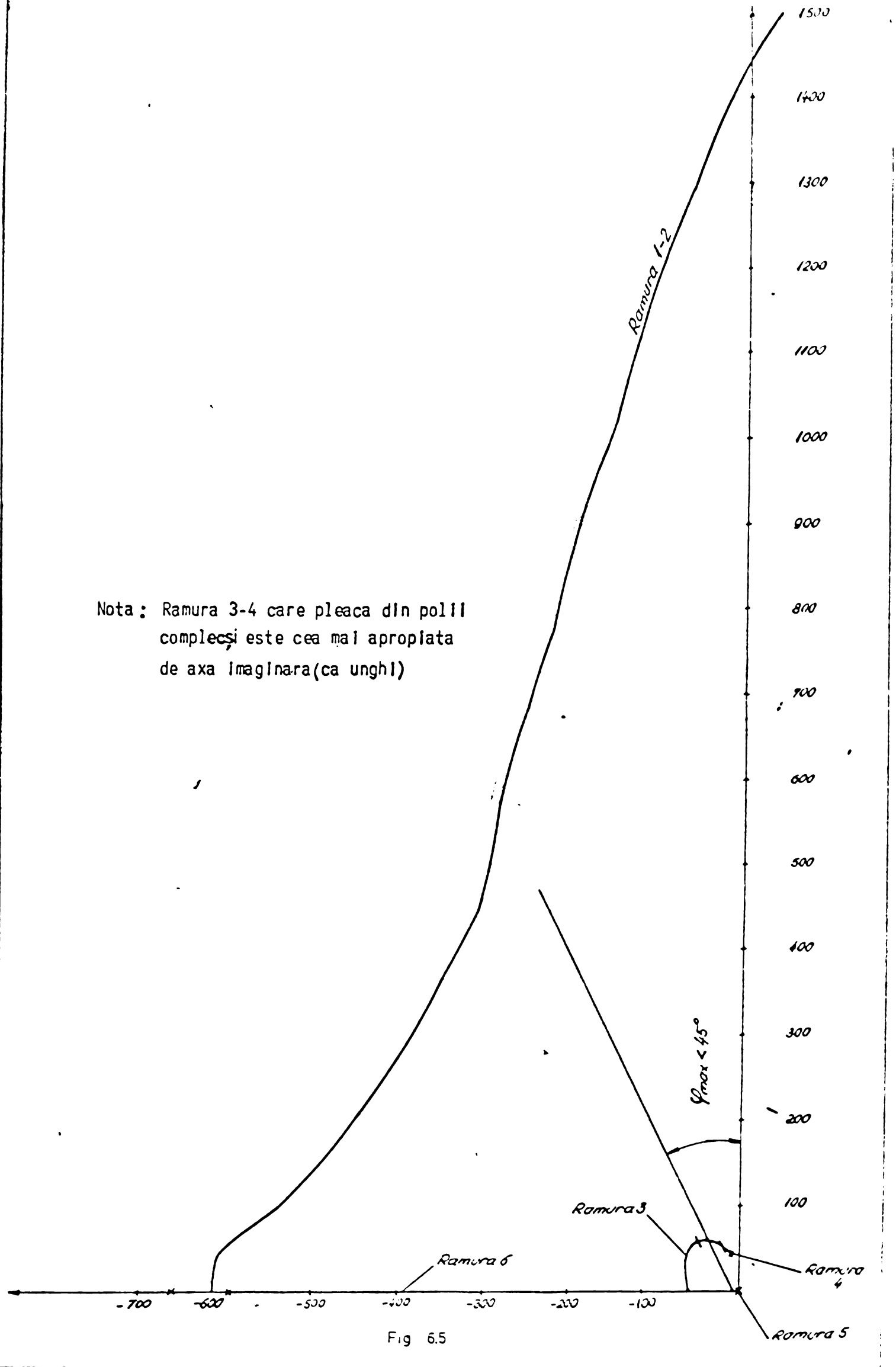


Fig 6.5

Amplificarea	Ramura 1	Ramura 2	Ramura 3	Ramura 4	Ramura 5	Ramura 6	Ramura 7
	2	3	4	5	6	7	8
- ∞	spre + ∞		- 48	- 66,67	- 4,132	- 544,7	- ∞
8,916 x 10 ⁹	21,34 + j 1531	21,34 - j 1531	- 51,57	- 63,43	- 4,047	- 543,6	- 3805
7,43 x 10 ⁹	- 24,33 + j 1415	- 24,33 - j 1415	- 52,38	- 62,49	- 4,031	- 543,4	- 3714
6,192 x 10 ⁹	- 65,66 + j 1303	- 65,66 - j 1303	- 54,13	- 61,02	- 4,011	- 543,1	- 3,631
5,160 x 10 ⁹	- 102,9 + j 1201	- 102,9 - j 1201	- 57,62 + j 1,87	- 57,62 + j 1,87	- 3,988	- 542,8	- 3557
4,300 x 10 ⁹	- 136,3 + j 1103	- 136,3 - j 1103	- 57,67 + j 4,705	- 57,67 - j 4,705	- 3,951	- 542,4	- 3491
3,583 x 10 ⁹	- 166,2 + j 1009	- 166,2 - j 1009	- 57,74 + j 6,681	- 57,74 - j 6,681	- 3,928	- 541,9	- 3431
2,986 x 10 ⁹	- 192,7 + j 920,9	- 192,7 - j 920,9	- 57,81 + j 8,486	- 57,81 - j 8,486	- 3,890	- 541,3	- 3379
2,448 x 10 ⁹	- 216,3 + j 837,5	- 216,3 - j 837,5	- 57,90 + j 10,26	- 57,90 - j 10,26	- 3,845	- 540,6	- 3332
2,046 x 10 ⁹	- 237 + j 758,5	- 237 - j 758,5	- 58, + j 12,09	- 58 - j 12,09	- 3,793	- 539,7	- 3297
1,728 x 10 ⁹	- 255,3 + j 683,4	- 255,3 - j 683,4	- 58,11 + j 14,01	- 58,11 - j 14,01	- 3,732	- 538,5	- 3256
1,44 x 10 ⁹	- 271,5 + j 611,9	- 271,5 - j 611,9	- 58,23 + j 16,06	- 58,23 - j 16,06	- 3,662	- 537,1	- 3225
1,2 x 10 ⁹	- 285,7 + j 543,4	- 285,7 - j 543,4	- 58,36 + j 18,30	- 58,36 - j 18,30	- 3,581	- 535,2	- 3198
1 x 10 ⁹	- 298,4 + j 477,3	- 298,4 - j 477,3	- 58,49 + j 20,76	- 58,49 - j 20,76	- 3,489	- 532,6	- 3175
1,97 x 10 ⁸	- 566,8 + j 87,03	- 566,8 - j 87,03	- 40,89 + j 56,5	- 40,89 - j 56,5	- 2,167	- 133,2	- 3174
1,642 x 10 ⁸	- 579,4 + j 80,72	- 579,4 - j 80,72	- 35,48 + j 57,78	- 35,48 - j 57,78	- 1,983	- 123,5	- 3070
1,368 x 10 ⁸	- 589,2 + j 74,10	- 589,2 - j 74,10	- 30,67 + j 58,09	- 30,67 - j 58,09	- 1,800	- 117,3	- 3066
1,140 x 10 ⁸	- 597,1 + j 67,44	- 597,1 - j 67,44	- 26,56 + j 57,82	- 26,56 - j 57,82	- 1,621	- 113,1	- 3063
9,502 x 10 ⁷	- 603,4 + j 60,89	- 603,4 - j 60,89	- 23,1 + j 57,22	- 23,1 - j 57,82	- 1,449	- 110,2	- 3060
7,91 x 10 ⁷	- 608,6 + j 54,5	- 608,6 - j 54,5	- 20,22 + j 56,47	- 20,22 - j 56,47	- 1,235	- 108,0	- 3058
6,599 x 10 ⁷	- 612,8 + j 48,3	- 612,8 - j 48,3	- 17,83 + j 55,67	- 17,83 - j 55,67	- 1,132	- 106,4	- 3056
5,499 x 10 ⁷	- 616,2 + j 42,26	- 616,2 - j 42,26	- 15,85 + j 54,87	- 15,85 - j 54,87	- 0,9908	- 105,1	- 3055
4,582 x 10 ⁷	- 619 + j 36,32	- 619 - j 36,32	- 14,21 + j 54,12	- 14,21 - j 54,12	- 0,8619	- 104,2	- 3054
3,819 x 10 ⁷	- 621,4 + j 30,38	- 621,4 - j 30,38	- 12,85 + j 53,44	- 12,85 - j 53,44	- 0,7455	- 103,4	- 3053
3,182 x 10 ⁷	- 623,3 + j 24,24	- 623,3 - j 24,24	- 11,73 + j 52,82	- 11,73 - j 52,82	- 0,6417	- 102,8	- 3052
2,652 x 10 ⁷	- 624,9 + j 17,47	- 624,9 - j 17,47	- 10,80 + j 52,27	- 10,80 - j 52,27	- 0,5498	- 102,3	- 3051
2,210 x 10 ⁷	- 626,2 + j 8,222	- 626,2 - j 8,222	- 10,03 + j 51,8	- 10,03 - j 51,8	- 0,4692	- 101,9	- 3050
1,842 x 10 ⁷	- 615,8	- 638,8	- 9,384 + j 51,39	- 9,384 - j 51,39	- 0,391	- 101,5	- 3050
1,535 x 10 ⁷	- 510,9	- 645,5	- 8,851 + j 51,03	- 8,851 - j 51,03	- 0,384	- 101,3	- 3049
1,279 x 10 ⁷	- 608	- 650	- 8,409 + j 50,73	- 8,409 - j 50,73	- 0,2851	- 101,	- 3049
1,055 x 10 ⁷	- 505,0	- 653,2	- 8,041 + j 50,47	- 8,041 - j 50,47	- 0,2414	- 100,9	- 3049
8,881 x 10 ⁶	- 504,5	- 655,7	- 7,735 + j 50,25	- 7,735 - j 50,25	- 0,2033	- 100,7	- 3048
7,401 x 10 ⁶	- 503,4	- 657,7	- 7,48 + j 50,05	- 7,48 - j 50,05	- 0,1709	- 100,5	- 3048
6,117 x 10 ⁶	- 502,5	- 659,3	- 7,271 + j 49,91	- 7,271 - j 49,91	- 0,1435	- 100,5	- 3048
5,14 x 10 ⁶	- 501,8	- 660,5	- 7,095 + j 49,73	- 7,095 - j 49,73	- 0,1203	- 100,4	- 3042
0	- 500,8	- 662,7	- 6,92 + j 49,1	- 6,92 - j 49,1	0	- 100	- 3047

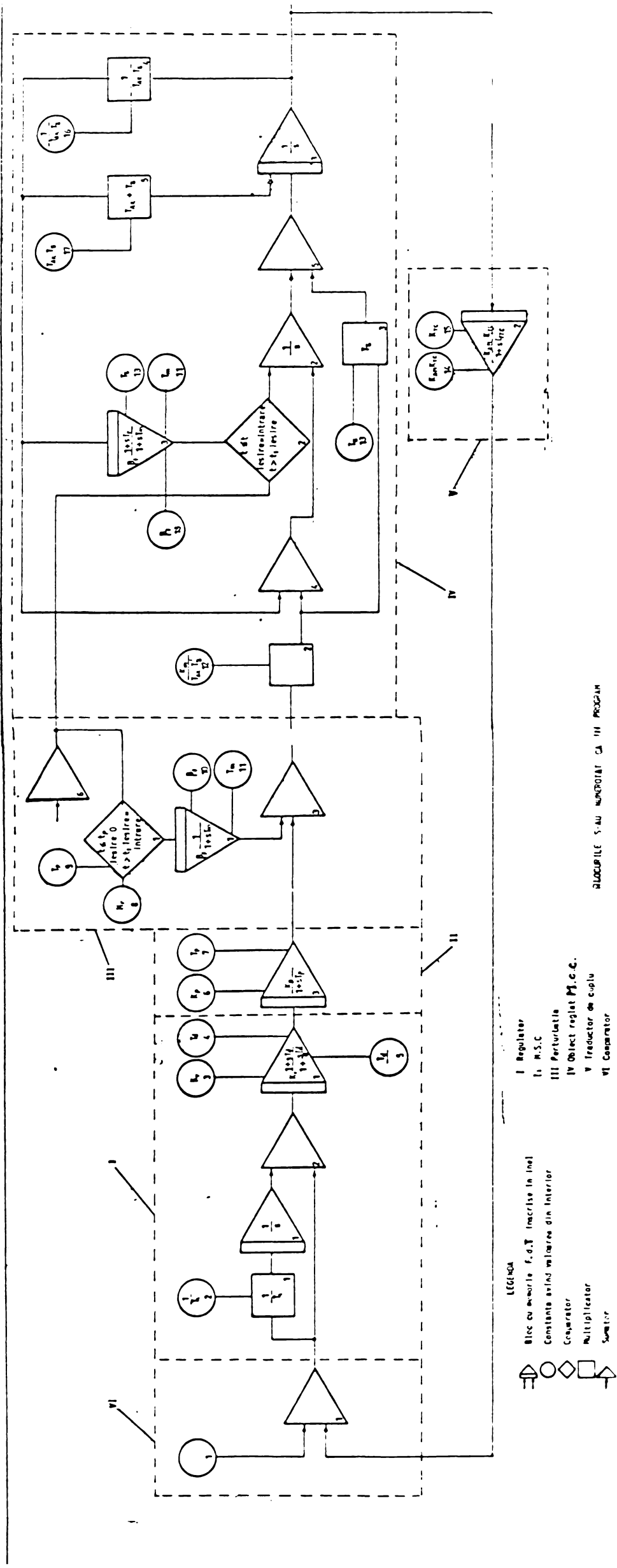


Fig. 6.6

tic rezistent constant.[5] Astfel la $t=0$ (punctul A din fig. 6.7) sistemul mașină de c.c. mutator intră în funcțiune și obiectul reglat (mașina de c.c.) se comportă ca motor iar la $t = t_r = .1s$, (punctul B din fig.6.7) cînd practic procesul tranzitoriu s-a stins, se aplică o perturbație ce este determinată de pornirea M.E. de încercat. In acest moment structura S.A. se modifică obiectul reglat devine generator, iar mutatorul - invertor comandat.

Analizînd răspunsul sistemului modelat se constată că durata procesului tranzitoriu este sub 1 s iar costanța reglării este mai mică de 1,5 % la apariția unei variații a perturbației.

In tabelul 6.4 este redată listarea răspunsului modelului iar în fig.6.8 curba de răspuns corespunzătoare în varianta că rotorul mașinii de c.c. este lăsat liber (neblocat) și la care se observă apariția unui salt important (punctul c din fig. 6.8) în momentul pornirii M.E. de încercat. In fig. 6.9 sînt redat comparativ curbele de răspuns $M=f(t)$, în cele două situații distincte: $\beta_f=11,45$ (rotor blocat) și $\beta_f=229$ (rotorul lăsat liber). Deasemeni, sînt reprezentate caracteristicile de ieșire a regulatorului (curba 1) și variația perturbației (curba 2).

In continuare, în tabelul 6.5 este redată listarea răspunsului sistemului modelat în care s-a neglijat constanta de timp T_τ ($T_\tau=0$), iar în tabelul 6.6 listarea răspunsului sistemului în ipoteza că $T_\tau=0$ iar $T_m=22,2ms$ (conform anexei I).

In figurile 6.10 și 6.11 sînt reprezentate curbele de răspuns corespunzătoare și în care se observă salturile din ce în ce mai pronunțate (punctele C) la aplicarea perturbației (în punctele B).

6.5. Concluzii.

Făcînd o apreciere comparativă între curbele de răspuns ridicate experimental și curbele de răspuns obținute prin modelarea S.A. dat, se constată existența unei bune concordanțe, cu toate că în calcul s-au făcut o serie de aproximații. Astfel timpul mort, cu efect profund de instabilitate a

fost aproximat cu o constantă de timp de întârziere (aproximări Padée), iar sistemul a fost considerat liniar etc. De asemenea, o parte din parametrii sistemului mașină de c.c.-mutator au fost stabiliți prin alegerea acestora din cataloage.

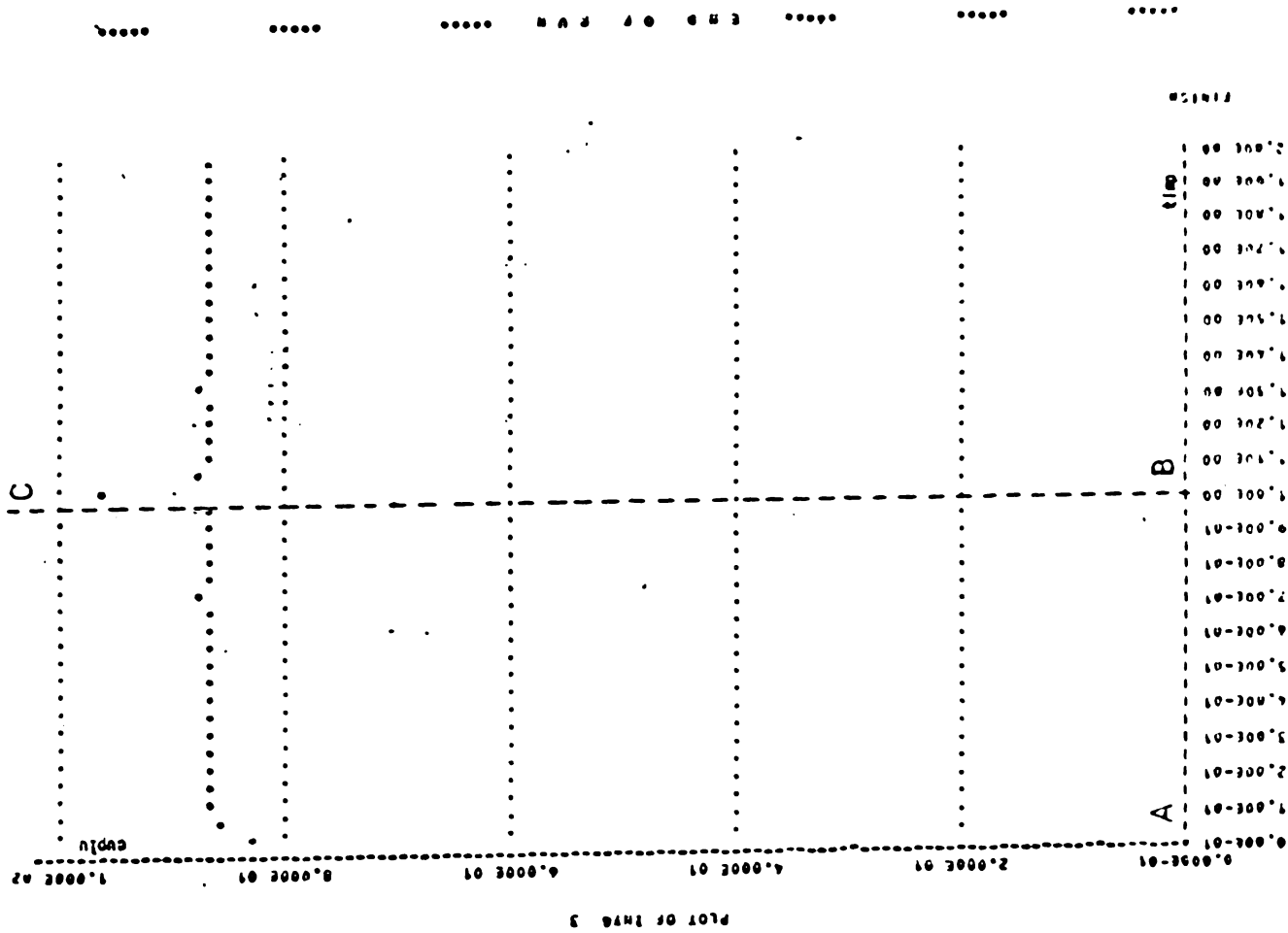
În ceea ce privește efectul curenților turbionari, evidențiat în calcule prin introducerea unei constante de timp de amortizare T_{ζ} , acesta a fost apreciat având în vedere caracteristicile mașinii de c.c. folosite în cadrul instalației de încercare (I-M.E.).

Din compararea curbelor de răspuns a S.A. obținute experimental și cele obținute prin modelare, se constată că S.A. conceput și realizat răspunde cerințelor impuse apriori pentru funcționarea optimă a instalației de încercare în scopul menținerii unui cuplu static rezistent constant (în special în perioada de pornire). Constanta reglării a S.A. este mai mică de 1,5 %, fapt ce constituie un rezultat caracteristic numai S.A. cu indici de calitate optimi.

Totodată din studiul comparativ al curbelor de răspuns obținute prin modelarea S.A., se constată existența unor salturi din ce în ce mai pronunțate dacă se neglijează constanta de timp de amortizare T_{ζ} și în absența cuplului static rezistent.

INTG 3

SECS	INTG 3	MCOY 1	TCOM 1
0.00E-01	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
0.00E-02	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
1.00E-01	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
1.50E-01	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
2.00E-01	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
2.50E-01	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
3.00E-01	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
3.50E-01	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
4.00E-01	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
4.50E-01	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
5.00E-01	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
5.50E-01	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
6.00E-01	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
6.50E-01	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
7.00E-01	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
7.50E-01	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
8.00E-01	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
8.50E-01	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
9.00E-01	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
9.50E-01	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
1.00E 00	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
1.05E 00	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
1.10E 00	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
1.15E 00	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
1.20E 00	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
1.25E 00	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
1.30E 00	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
1.35E 00	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
1.40E 00	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
1.45E 00	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
1.50E 00	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
1.55E 00	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
1.60E 00	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
1.65E 00	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
1.70E 00	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
1.75E 00	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
1.80E 00	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
1.85E 00	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
1.90E 00	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
1.95E 00	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01
2.00E 00	0.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-01



Label (u) 6.4

Fig 6.8

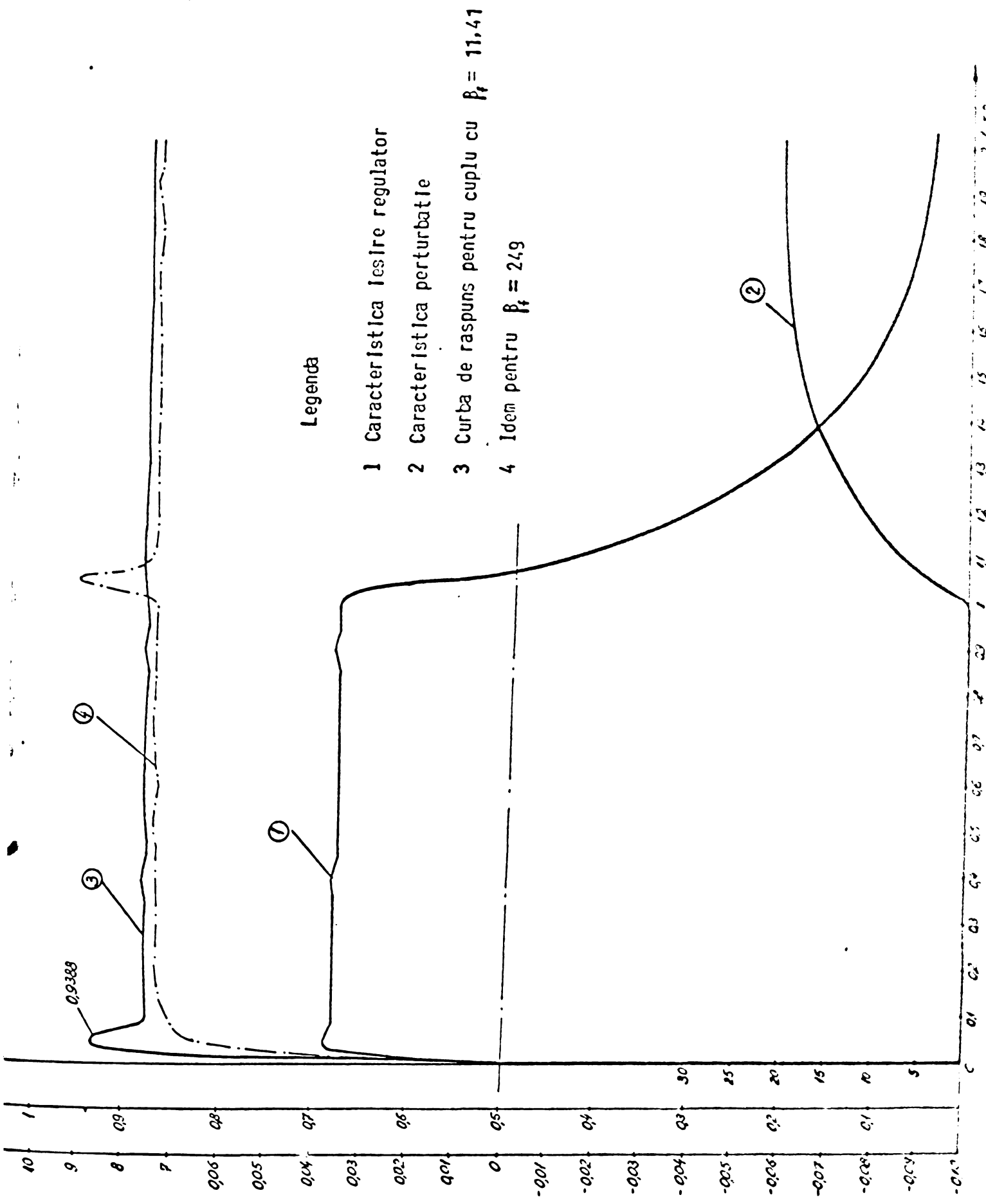


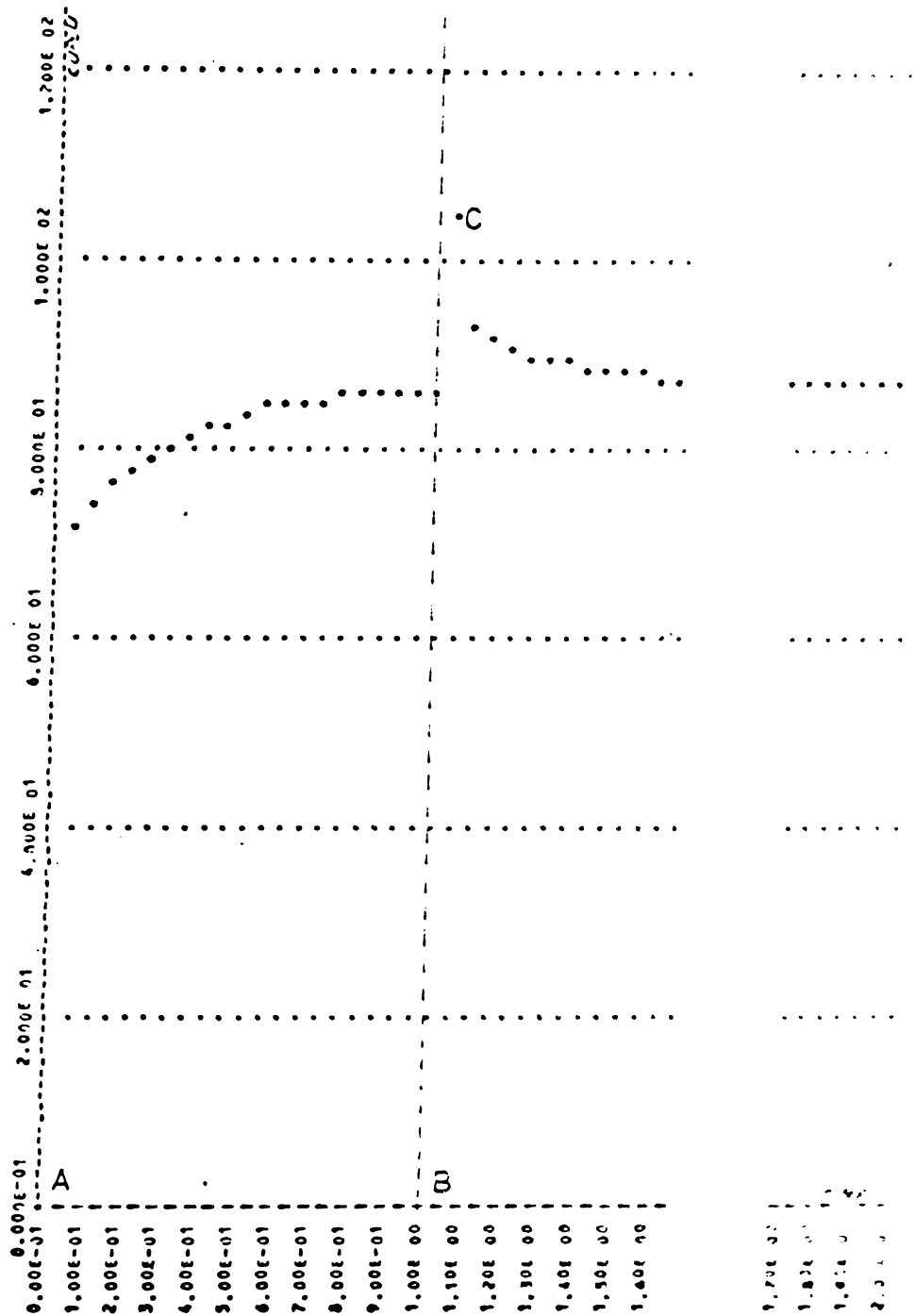
Fig 6.9

INTG 2

COMM CUPLU IESINE REG. PERTURBATIOE

SECS	INTG 2	MCOM 1	TCON 1
0.00E-01	0.000E-01	0.000E-01	0.000E-01
0.00E-02	7.220E-01	9.313E-02	0.000E-01
0.00E-01	7.335E-01	1.387E-01	0.000E-01
0.00E-01	7.671E-01	1.790E-01	0.000E-01
0.00E-01	7.759E-01	2.127E-01	0.000E-01
0.00E-01	7.879E-01	2.417E-01	0.000E-01
0.00E-01	8.011E-01	2.644E-01	0.000E-01
0.00E-01	8.121E-01	2.857E-01	0.000E-01
0.00E-01	8.217E-01	3.034E-01	0.000E-01
0.00E-01	8.291E-01	3.187E-01	0.000E-01
0.00E-01	8.347E-01	3.312E-01	0.000E-01
0.00E-01	8.424E-01	3.447E-01	0.000E-01
0.00E-01	8.440E-01	3.504E-01	0.000E-01
0.00E-01	8.475E-01	3.579E-01	0.000E-01
0.00E-01	8.512E-01	3.657E-01	0.000E-01
0.00E-01	8.540E-01	3.707E-01	0.000E-01
0.00E-01	8.562E-01	3.753E-01	0.000E-01
0.00E-01	8.674E-01	3.837E-01	0.000E-01
0.00E-01	8.593E-01	3.807E-01	0.000E-01
0.00E-01	8.614E-01	3.859E-01	0.000E-01
0.00E-00	8.642E-01	3.907E-01	0.000E-01
0.05E-00	1.048E-02	1.007E-02	3.926E-00
0.10E-00	9.232E-01	-8.773E-03	7.118E-00
0.15E-00	9.132E-01	-7.631E-02	9.715E-00
0.20E-00	9.048E-01	-3.707E-02	1.183E-01
0.25E-00	8.992E-01	-4.749E-02	1.355E-01
0.30E-00	8.929E-01	-5.589E-02	1.494E-01
0.35E-00	8.895E-01	-6.274E-02	1.608E-01
0.40E-00	8.850E-01	-6.839E-02	1.700E-01
0.45E-00	8.811E-01	-7.284E-02	1.775E-01
0.50E-00	8.777E-01	-7.553E-02	1.837E-01
0.55E-00	8.750E-01	-7.697E-02	1.886E-01
0.60E-00	8.743E-01	-8.194E-02	1.927E-01
0.65E-00	8.754E-01	-8.354E-02	1.960E-01
0.70E-00	8.740E-01	-8.554E-02	1.986E-01
0.75E-00	8.732E-01	-8.885E-02	2.008E-01
0.80E-00	8.725E-01	-8.797E-02	2.026E-01
0.85E-00	8.720E-01	-8.871E-02	2.040E-01
0.90E-00	8.714E-01	-9.117E-02	2.052E-01
0.95E-00	8.712E-01	-9.004E-02	2.062E-01
1.00E-00	8.710E-01	-9.134E-02	2.069E-01

PLOT OF INTG 2



Tabelul 6.8

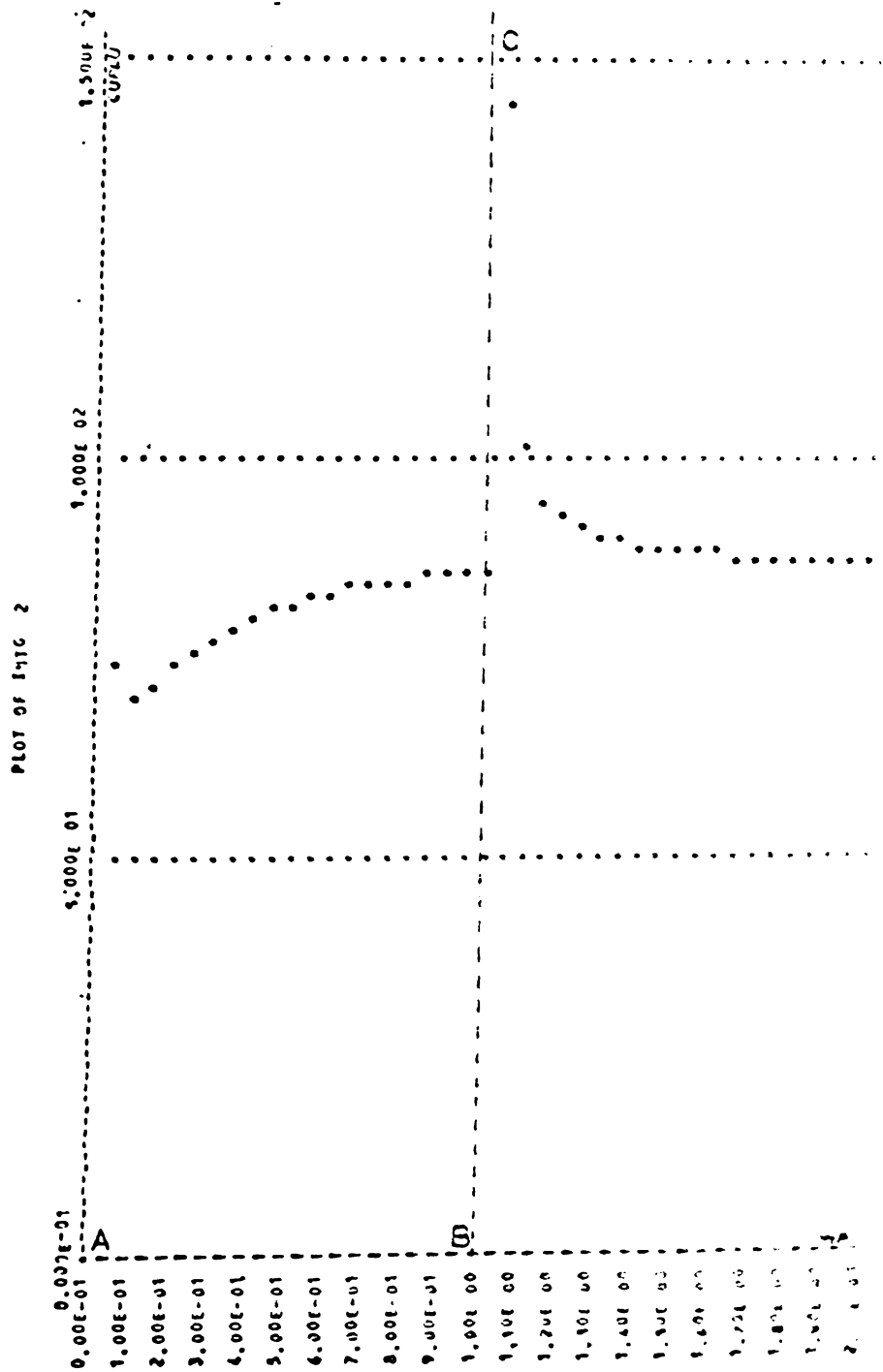
Fig. 6.10

OUTPUTS TO BE PLOTTED

INTG 2

CONM CONLU RESINE REG. PERTURBATION

ICS	INTG 2	MCON 1	TCON 1
0E-01	0.0000E+01	0.0000E-01	0.0000E-01
0E-02	7.374E 01	8.730E-02	0.0000E-01
0E-01	6.999E 01	1.325E-01	0.0000E-01
0E-01	7.176E 01	1.707E-01	0.0000E-01
0E-01	7.495E 01	2.027E-01	0.0000E-01
0E-01	7.572E 01	2.299E-01	0.0000E-01
0E-01	7.735E 01	2.536E-01	0.0000E-01
0E-01	7.862E 01	2.737E-01	0.0000E-01
0E-01	7.993E 01	2.917E-01	0.0000E-01
0E-01	8.095E 01	3.073E-01	0.0000E-01
0E-01	8.166E 01	3.207E-01	0.0000E-01
0E-01	8.238E 01	3.314E-01	0.0000E-01
0E-01	8.313E 01	3.414E-01	0.0000E-01
0E-01	8.388E 01	3.499E-01	0.0000E-01
0E-01	8.411E 01	3.573E-01	0.0000E-01
0E-01	8.444E 01	3.637E-01	0.0000E-01
0E-01	8.478E 01	3.688E-01	0.0000E-01
0E-01	8.509E 01	3.737E-01	0.0000E-01
0E-01	8.536E 01	3.774E-01	0.0000E-01
0E-01	8.571E 01	3.813E-01	0.0000E-01
0E 00	8.576E 01	3.837E-01	0.0000E-01
0E 00	1.446E 02	1.984E-02	3.926E 00
0E 00	1.014E 02	-7.354E-03	7.118E 00
0E 00	9.413E 01	-2.304E-02	9.715E 00
0E 00	9.274E 01	-3.051E-02	1.183E 01
0E 00	9.118E 01	-4.701E-02	1.355E 01
0E 00	9.036E 01	-5.537E-02	1.494E 01
0E 00	8.974E 01	-6.247E-02	1.608E 01
0E 00	8.922E 01	-6.805E-02	1.700E 01
0E 00	8.892E 01	-7.254E-02	1.775E 01
0E 00	8.845E 01	-7.635E-02	1.837E 01
0E 00	8.816E 01	-7.947E-02	1.886E 01
0E 00	8.795E 01	-8.184E-02	1.927E 01
0E 00	8.777E 01	-8.387E-02	1.960E 01
0E 00	8.761E 01	-8.547E-02	1.986E 01
0E 00	8.749E 01	-8.689E-02	2.008E 01
0E 00	8.776E 01	-8.799E-02	2.026E 01
0E 00	8.731E 01	-8.874E-02	2.040E 01
0E 00	8.778E 01	-8.949E-02	2.052E 01
0E 00	8.719E 01	-9.004E-02	2.062E 01
0E 00	8.714E 01	-9.034E-02	2.069E 01



Tabelul 6.6

Fig. 6.11

C A P I T O L U L VII

APLICATII INDUSTRIALE SI REZULTATE EXPERIMENTALE

7.1. Instalația industrială realizată.

7.1.1. Funcționarea sistemului mașină de c.c. mutator, în cadrul instalației de încercare (I-M.E.).

Schema electrică de automatizare a instalației de încercare I-M.E. (redată în fig.7.1) a fost concepută având la bază principiul de funcționare și schema bloc prezentate anterior în §4.2. și în conformitate cu lucrările elaborate de autor. [99,104,105]

În cadrul schemei respective mașina de c.c. m_2 cuplată mecanic cu M.E. de încercare m_1 , este o M.E. (cu o putere $P=27$ kW) existentă în dotarea laboratorului de încercări al Întreprinderii de Mașini Electrice București și având caracteristicile principale redată în anexa I.

Mutatorul u_1 (conectat în circuitul rotoric al mașinei de c.c.) este alcătuit dintr-un transformator m_3 cu conexiune triunghi-stea (putere 50 kVA, 380/240 V, 50 Hz) și un montaj în punte trifazată cu șase tiristoare tip A.F.G. T 170 F/700 (T_1-T_6). Protecția la supracurenți se realizează prin siguranțe ultrarapide c_1-c_6 montate pe fiecare braț al punții. Protecția la supracurenți de lungă durată se realizează cu relele termice din cadrul întreruptorului de c.a. a_1 montat în primarul transformatorului m_3 [128]. Pentru protecție la scurtcircuit în cazul dispariției tensiunii rețelei în circuitul comun al mașinii de c.c.-mutator este montat un întreruptor ultrarapid de c.c. (a_2).

Nu s-a prevăzut un dispozitiv de protecție la scurtcircuit prin blocarea impulsurilor de comandă a tiristoarelor la un eventual supracurent, deoarece la funcționarea în regim de inverter, acesta este întreținut de tensiunea rotorică redresată și menținut de ultimele două tiristoare care conduc în momentul apariției supracurentului respectiv [25,248].

Nu numai dispariția tensiunii de alimentare, dar chiar o scădere accidentală a acesteia sau o eventuală dispariție a impulsurilor de comandă pe un tiristor, (sau chiar un soco sarcină) pot conduce la apariții de fenomene de basculare a mutatorului dintr-un regim de funcționare în altul. [133] După basculare, curentul care apare în circuit în acest caz este mai mare decât c.c. în regim de scurtcircuit al mutatorului, datorită creșterii tensiunii care alimentează scurtcircuitul prin înserierea tensiunii u_{di} a redresorului, cu tensiunea M.F. ce funcționează în regim de generator.

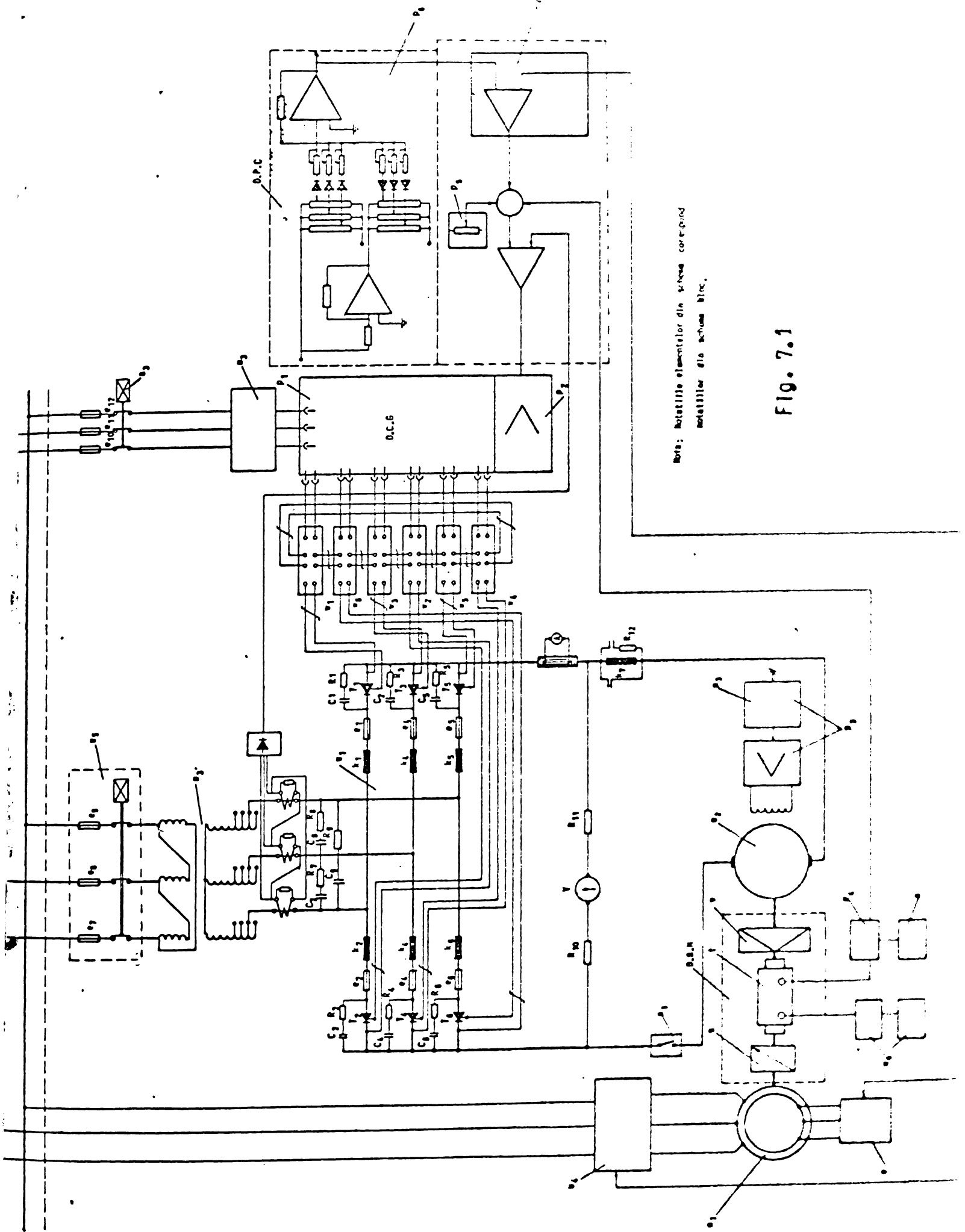
În consecință funcționarea corectă a unui mutator este posibilă numai în condițiile asigurării unei fiabilități a sistemului, condiționată de o execuție și un control extrem de atent al echipamentelor respective. [200]

Asigurarea protecției la supratensiuni se face prin circuite de protecție R.C. ($R_1C_1-R_6C_6$) montate în paralel pe fiecare tiristor, pentru amortizarea supratensiunilor care apar în rețea sau la conectarea transformatorului, s-au conectat deasemeni grupuri R.C. ($R_7C_7-R_9C_9$) [74,125].

Totodată, pentru a evita deschiderea nedorită a tiristoarelor, în regim de inverter comandat, în serie cu fiecare tiristor sînt montate niște bobine de comutație (k_1-k_6). Bobina de filtrare k_7 din circuitul comun al sistemului are ca scop asigurarea unui anumit procent dat din curent nominal redresat pentru componenta alternativă a curentului generat de tensiunea mutatorului și care se poate afla fie în regim de redresor, fie de inverter. [127]

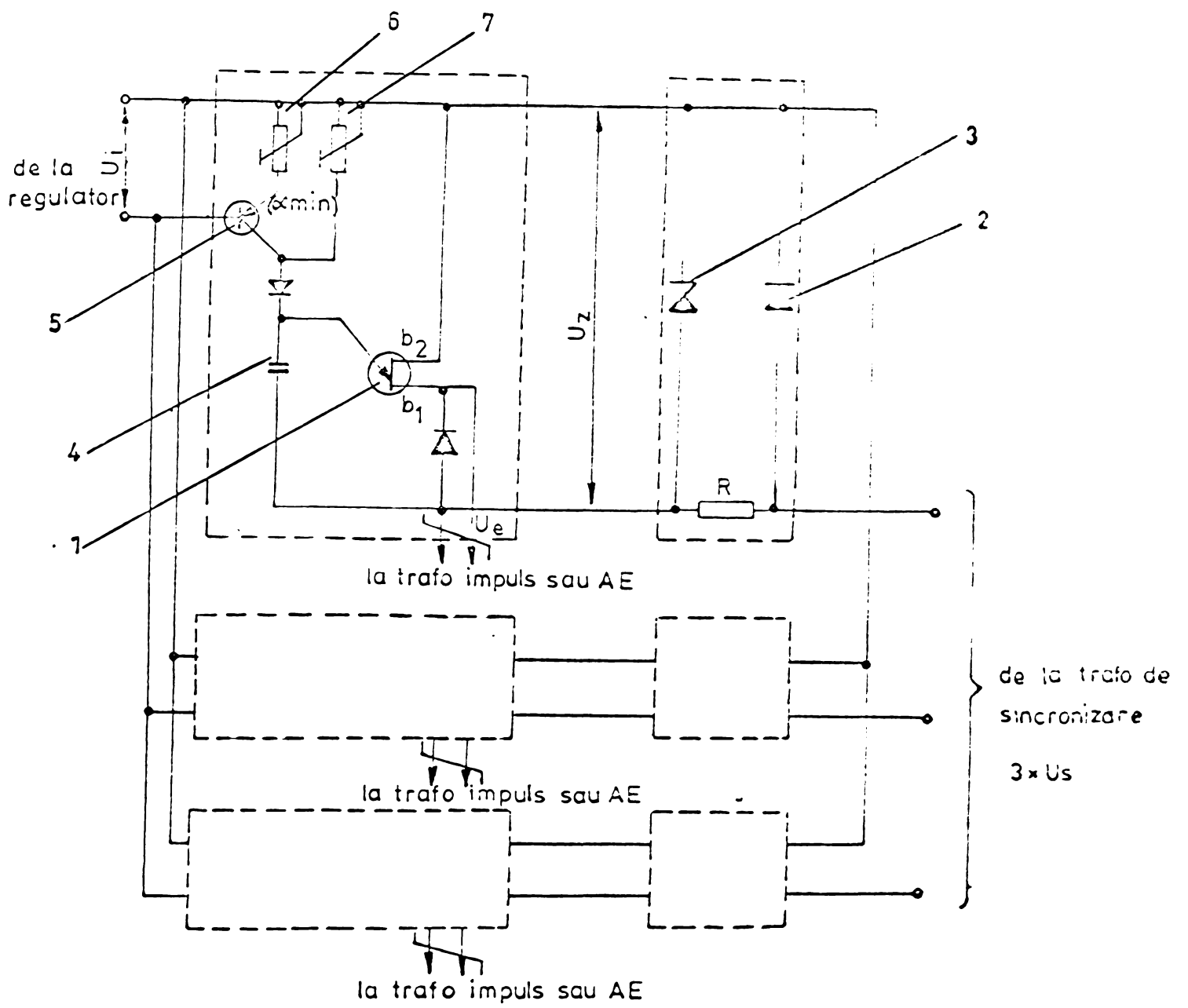
Alimentarea circuitului de excitație este efectuată prin intermediul unui amplificator monofazat în montaj autosaturat tip AMSU 4-b, prevăzut cu reacție de curent și avînd la ieșire două contactoare tip TCA-40, conectate astfel încît să permită inversarea curentului de excitație respectiv după nevoie. [99]

În ceea ce privește dispozitivul de comandă pe grilă (conform schemei din fig.7.2) funcționarea acestuia se bazează pe faptul că tranzistorul unijoncțiune (TUJ) 1, are proprietatea de a se deschide brusc la un prag de tensiune bine precizat între emitor și baza 1 și se blochează cînd



Nota: Modelile elementelor din schema corespund modelilor din schema bloc.

Fig. 7.1



a) schema

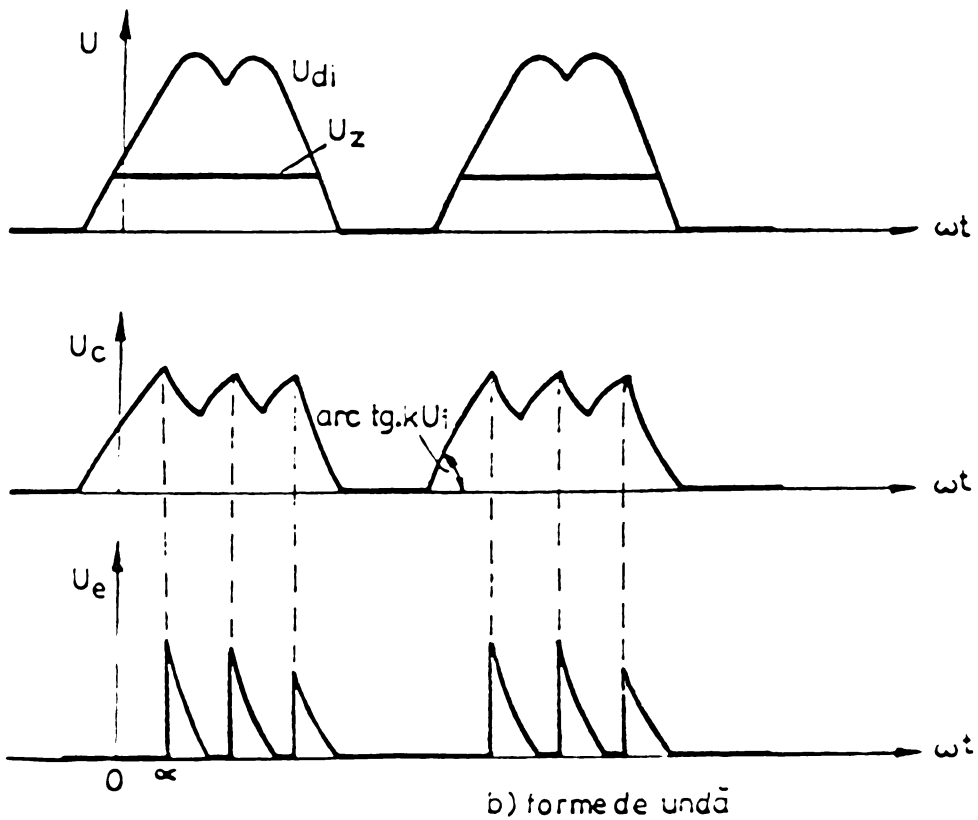


Fig. 7.2

tensiunea între acești electrozi a scăzut sub o anumită valoare. Alimentarea schemei se realizează prin intermediul diodelor redresoare și Zener 2 și 3 de la transformatorul de sincronizare, care asigură intervale de tensiune nulă cu periodicitatea tensiunii rețelei. La fiecare aplicare a tensiunii continue, condensatorul 4 se încarcă practic liniar prin curentul de colector al tranzistorului 5, determinat de curentul injectat în bază prin tensiunea aplicată de la regulator [248.] Când tensiunea pe condensator a depășit pragul TUJ acesta se deschide brusc și condensatorul se descarcă prin intermediul transformatorului de impuls, generînd un impuls cu front pronunțat ($2 \text{ V}/\mu\text{S}$) însă de scurtă durată (cca $15 \mu\text{s}$). Cu cît tensiunea de la generator este mai mare cu atît condensatorul se încarcă mai repede și unghiul α este mai redus. Prin rezistența reglabilă 6 se poate ajusta curentul de încărcare maxim și unghiul α minim. Pentru a asigura existența impulsului în regimul limită de invertor chiar la o eventuală blocare a tranzistorului 5, este prevăzută rezistența reglabilă 7 prin care se încarcă lent condensatorul 4. Unghiul corespunzător impulsului auxiliar se poate ajusta prin rezistența 7. După generarea primului impuls, condensatorul 4 se descarcă pînă la atingerea pragului de blocare a TUJ după care se reîncarcă în modul descris mai sus. Se creiază astfel un tren de impulsuri, echivalent în mod practic cu un singur impuls mai lat, dar mult mai ușor de transmis cu un front bun printr-un transformator de impuls. Frecvența impulsurilor scade pe măsura ce unghiul α crește, (deoarece panta de integrare scade). Impulsurile de ieșire fiind de amplitudine și durată redusă s-au folosit pentru comanda tiristoarelor niște amplificatoare de impuls corespunzătoare [65, 75, 100, 248].

... Datorită regimului de conducție discontinuă, circuitul subordonat de reglare, respectiv limitare a curentului poate deveni lent la sarcini foarte reduse. În aceste condiții circuitul de reglare a cuplului, cu regulator tip PID, acordat pentru sarcinile nominale, poate deveni oscilant. În această situație, s-a prevăzut efectuarea unei comutări automate a regulatorului în regim P.I. cu factor de amplificare mai redus [32, 33]. Totodată regulatorul permite o limitare a curentului continuu. Prin această limitare se asigură prote-

jarea instalației de încercare I-M.E. (de exemplu a M.E. de încercat și a sistemului mașină de c.c.-mutator, inclusiv a dispozitivului de blocare mecanică) împotriva unor suprasolicitări de natură mecanică, termică (încălzirea mașinii de c.c.), electrică (și di/dt pentru comutația mașinii de c.c.) și limitarea unghiului la 150° electrice la funcționarea în regim de invertor.

În ceea ce privesc armonicile de curent ce apar la funcționarea mutatorului acestea nu pot fi utilizate la transportul de energie, reprezentând un fenomen nedorit, fapt care conduce implicit la micșorarea factorului de putere, fiind cu atât mai redus cu cât întârzierea la deschiderea tiristoarelor este mai mare. [237] Deasemeni mutatorul acționează ca generator de armonici ce trec în rețea și pot provoca pierderi sau chiar apariția de rezonanțe. [167]

Dependența puterii reactive de tensiunea continuă, la un c.c. menținut constant la diferite unghiuri de comandă este dată de un arc de cerc (fig.7.3), care este valabilă și ca funcție a puterii reactive a mutatorului. Se observă, în special că la comenzi mici, necesarul de putere reactivă a unui mutator devine apreciabil, (ca exemplu la pornirea mașinii de c.c. alimentate prin mutator). De asemenea, șocurile de sarcină reactivă ce apar brusc pot avea ca urmare căderi importante ale tensiunii rețelei. [85,250]

7.1.2. Funcționarea dispozitivului special de blocare mecanică și măsură.

În vederea asigurării încercării M.E. destinate acționării I-R.T. la diverși factori de inerție (FI) conform normelor în vigoare, [159] volantul cu inerție variabilă (inclusiv carcasa metalică de protecție) este montat direct pe arborele comun dintre M.E. de încercat și mașina de c.c.. Acesta este constituit din mai multe discuri metalice etalonate riguros din 0,1 în 0,1 kgm^2 (bineînțeles se are în vedere existența unei corelări și cu momentele inerțiale proprii mașinii de c.c. folosite ca generator de sarcină). Acest fel de volant poate fi înlocuit, mai ales la instalațiile mari, cu un volant cu masă inerțială variabilă, constituit dintr-un regulator mecanic centrifugal. [182]

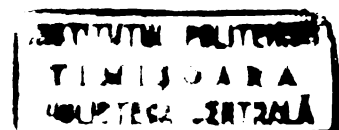
Dispozitivul de blocare mecanică, ce are ca scop blocarea rotorului, într-un singur sens, reprezintă o cuplă gen "freilauf" s, conform STAS 6589-62 dimensionată corespunzător unui cuplu static rezistent maxim care se poate crea la încercarea M.E. în cadrul instalației de încercare I-M.E. [68,243].

Dacă ne referim la traductorul de cuplu t (de tip Hottinger T 1/100 - clasă de precizie 0,2 și sensibilitate 1,5 mV/V) acesta este format dintr-o punte de patru mărci tensiometrice montate pe un arbore din oțel calibrat, cu modul de elasticitate cunoscut. Capetele arborelui sînt prevăzute cu două semicuple care permit cuplarea mecanică a traductorului t cu cupla gen "freilauf" s și cu volantul v. Montajul este astfel făcut încît să permită măsurarea cuplului atît înainte cît și după pornirea M.E. de încercat, traductorul îndeplinind de fapt un rol dublu: de reglare cît și de măsură (eventual și de reprezentare grafică a acestuia). [22, 58, 66,137,141,195]

Cuplajul este rigid, însă permite 3 grade de libertate traductorului tensiometric, (eforturile axiale nefiind sesizate de traductor). O punte de măsură p_4 (fig.7.4) asigură atît alimentarea traductorului de cuplu cît și măsurarea dezechilibrului din brațele punții tensiometrice la apariția efortului de tensiune în arborele respectiv 47. Semnalul de dezechilibru, care este proporțional cu valoarea cuplului transmis arborelui, este aplicat la intrarea unui filtru trece jos g_1 în scopul de a elimina frecvența purtătoare a tensiunii de alimentare a punții tensiometrice 22. Pentru vizualizarea sau reprezentarea grafică a cuplului se prevede un osciloscop sau un oscilograf notat în schemă cu "O". La alegerea traductorului de cuplu (plecînd și de la ideea că acesta nu este un element izolat de celelalte elemente ale S.A.) s-au avut în vedere următoarele considerente: [182,203]

- domeniul de măsură dorit;
- precizia cerută (traductorul trebuind să aibă o sensibilitate cel puțin egală cu eroarea maximă admisă în regim permanent);
- energia susceptibilă de a fi preluată de traductor de la elementul motor.

./.



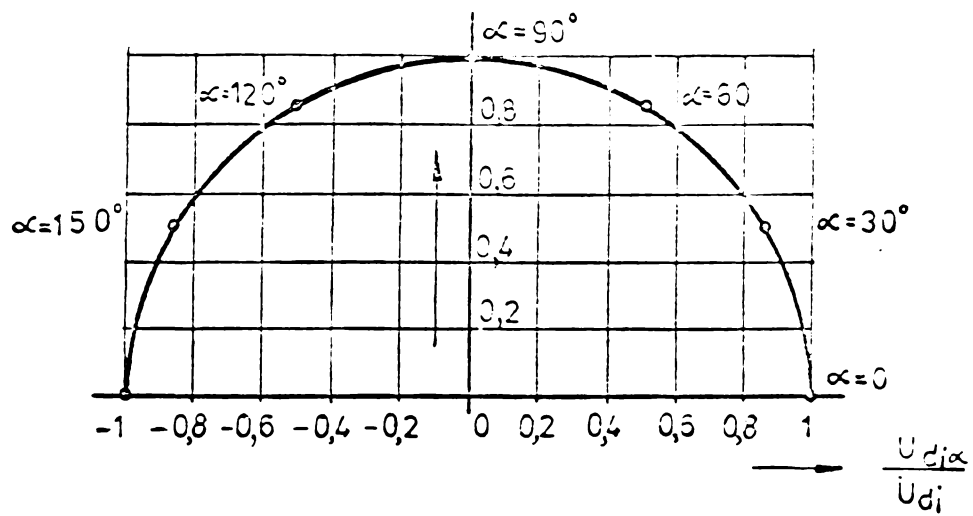
Nu s-a optat pentru reglarea curentului prin intermediul unui traductor de c.c. (sau c.a.), care de fapt este mai comodă, avînd în vedere considerentele făcute în cap.4 punctul 4.2.2. la funcționarea sistemului mașină de c.c.-mutator.

În ipoteza încercării de M.E. asincrone cu frînă înglobată se poate renunța la dispozitivul de blocare mecanică tip "freilauf" folosind în schimb frîna cu care este dotată M.E. respectivă sau eventual o frînare în c.c., în măsura în care aceasta nu afectează acuratețea măsurărilor în cadrul încercărilor ce se efectuează. [121]

7.1.3. Funcționarea dispozitivului de programare și comandă (DPC).

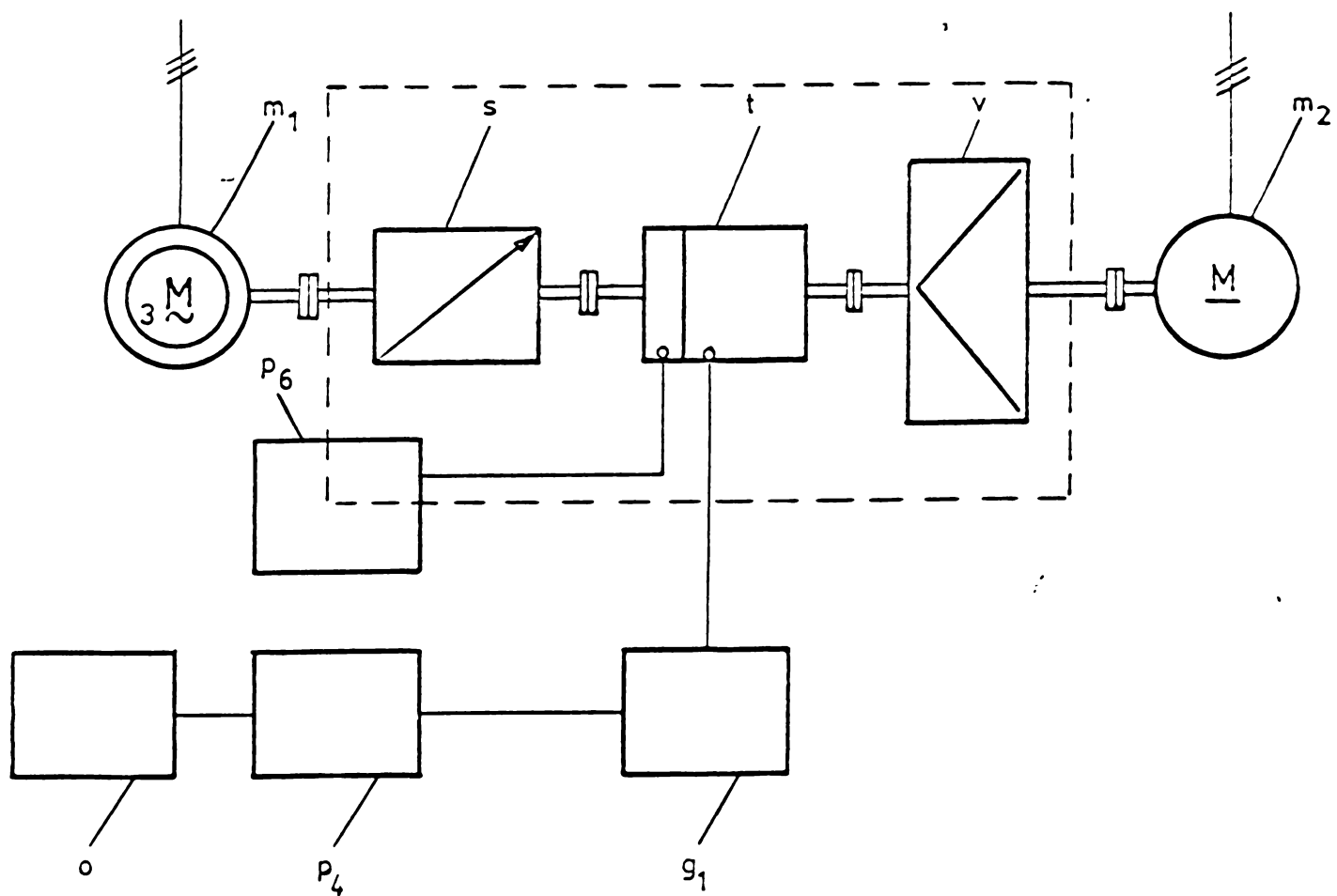
În scopul realizării diferitelor regimuri de funcționare în conformitate cu STAS 1893-72, la diferite frecvențe de conectare h și D.A. s-a conceput un programator tranzistorizat [92], schema bloc a acestuia fiind redată în fig.7.5. Programatorul este alimentat de la o sursă stabilizată u ce cuprinde un circuit basculant u_1 , un circuit monostabil u_R , șase rele temporizatoare d_1-d_5 , un releu temporizator d_1 și cinci amplificatoare de putere p_1-p_5 . Conectarea schemei de acționare la rețea se efectuează printr-un întrerupător tripolar. Instalația de încercare I-M.E. mai este prevăzută cu două butoane pentru pornire cu sens de rotație stînga sau dreapta, un buton de oprire, un comutator pentru impunerea frecvenței de conectare h dorite și unul pentru stabilirea D.A. Un alt comutator asigură funcționarea programatorului în cazul unei încercări a M.E. asincrone în scurtcircuit.

Stabilirea regimului de funcționare dorit, se face prin selectarea anumitor valori ale condensatoarelor din grupurile de capacități din cadrul releelor temporizate d_1 și d. La ieșirea circuitului bistabil u_1 , apare un semnal care este introdus în d_1 și întîrziat cu durata pauzei t_R . De la ieșirea releului temporizat d_1 semnalul este întîrziat de releul d cu durata t_N . Ca atare la ieșirea releului d apare un semnal după un timp $t_c = t_R + t_N$. Prin reacție acest semnal este readus la intrarea circuitului bistabil u_1 , ceea ce face ca aceasta să rebasculeze pe poziția inițială și ieșirea sa va avea potențialul zero. Tot semnalul de la ieșirea releului d, este introdus



regim de Invertor regim de redresor

Fig.7.3



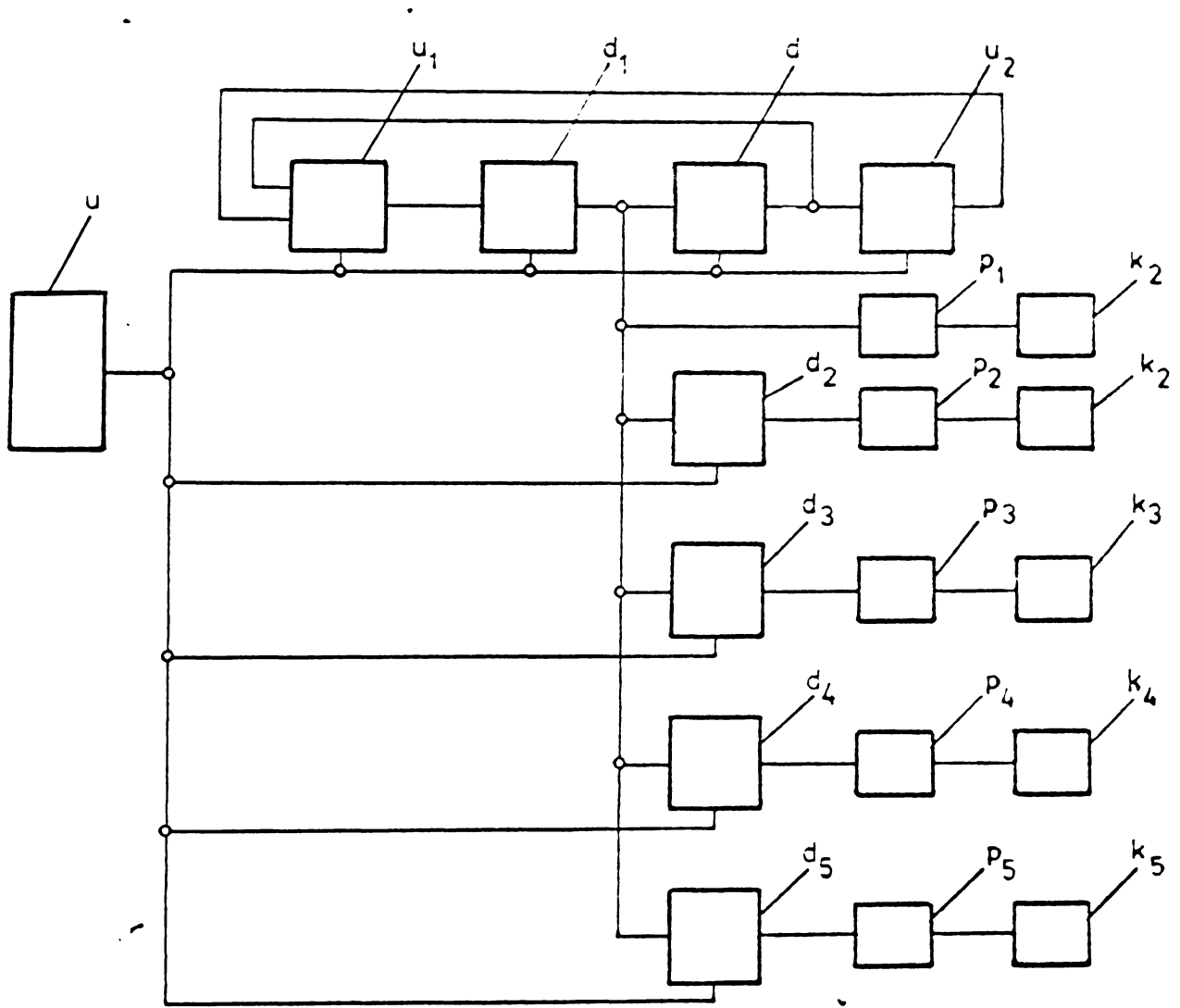


Fig. 7.5

și în circuitul monostabil u_2 , a cărui ieșire este readusă la intrarea circuitului bistabil u_1 , echivalând cu apăsarea pe un buton de pornire și în felul acesta ciclul continuă pînă la apăsarea pe butonul de oprire. Deci la ieșirea releului temporizator d_1 apar semnale de durată t_N la intervale t_R . Aceste semnale sînt amplificate printr-un amplificator de putere P_1 punînd sub tensiune bobina k_1 care va închide contactele normal deschise respective. Cît timp această bobină este alimentată se vor închide contactele întreruptorului de alimentare și M.E. va fi alimentată de la rețea. Același semnal de la ieșire d_1 este introdus în releele temporizatoare d_2, d_5 care vor da semnale ce vor determina scurtcircuitarea pe rînd a treptelor rezistenței rotorice în cazul încercării unei M.E. asincrone cu inele. Cînd semnalul de la ieșirea d_1 este de potențial zero, bobina k_1 este scoasă de sub tensiune și pe calea arătată anterior M.E. de încercat va fi deconectată de la rețea.

Funcționarea ciclică a programatorului continuă atît timp cît va trebui să se mențină regimul de funcționare impus, iar pentru obținerea unui alt regim de funcționare programatorul se readuce în situația inițială, apăsînd pe butonul de oprire prevăzut în acest scop. În felul acesta este scoasă de sub tensiune schema de comandă și totodată se dă la intrarea circuitului bistabil u_1 un semnal de rebasculare în poziția inițială. Pentru înregistrarea numărului de conectări h , programatorul este prevăzut cu un dispozitiv înregistrator care indică numărul de cicluri respectiv. [186]

În ceea ce privește schema de A.E. a M.E. de încercat, aceasta se adoptă în concordanță cu schemele de A.E. utilizate curent în cadrul I-R.T. (inclusiv schemele ce prevăd folosirea de convertizoare statice de frecvență sau acționări de M.E. asincrone cu inele în cascadă subsincronă cu tiristoare (cascada Sherbius statică - sau în cascada Krämer cu redresor etc.) [43, 44, 85, 126, 146, 150, 176, 177, 185, 194, 239]

Instalația de încercare I-M.E. este astfel concepută [92, 98, 99] încît să asigure respectarea strictă a tehnologiei de încercare cu efectuarea operațiunilor în următoarea succesiune:

./:

- conectarea D.C.G. și alimentarea de la sursa de c.c. a circuitului de excitație a mașinii de c.c.;
- conectarea părții de forță (și deci a sistemului mașină de c.c.-mutator) însoțită de reglarea curentului de sarcină (rotorul mașinii de c.c. fiind blocat), în vederea obținerii unui cuplu static rezistent la valoarea prestabilită;
- pornirea M.E. de încercat m_1 și încărcarea acesteia concomitent cu obținerea unui transfer de energie de la sistem (mașină de c.c.-mutator) către rețea.

Numai cu respectarea strictă a succesiunii de operații amintită se obține o funcționare optimă a instalației în regim recuperativ, energia de c.c. dată de sistem fiind astfel modulată în energie de c.a. la frecvența rețelei de alimentare.

7.2. Rezultatele experimentale obținute cu instalația de încercare.

Instalația de încercare tip I-M.E. realizată pentru încercarea M.E. destinate acționării I-R.T. din fabricația curentă a Intreprinderii de Mașini Electrice București, este în funcțiune la platforma de încercări a întreprinderii [87, 92, 95, 98]. Cu această s-au efectuat o serie întreagă de experimentări și s-au omologat M.E. respective. În fig.7.6, este redat aspectul exterior al instalației I-M.E. care a fost concepută din punct de vedere constructiv, sub forma unui pupitru de comandă, cu dimensiunile de gabarit: 2000 x 1000 x 1200 mm. La instalația de încercare se poate atașa un osciloscop portativ, care să permită vizualizarea formei de undă a tensiunii sau curentului redresat, concomitent cu măsurarea acestora cu un voltmetru cu zero la mijloc, respectiv cu un ampermetru magneto-electric.

În fig.7.7. este prezentat aspectul interior al pupitrului instalației de încercare, care are în componența sa principalele subansamble: transformatorul de forță, mutatorul static comandat echipat cu tiristoare, dispozitivul de comandă pe grilă, inclusiv aparatajul de comandă și protecție corespunzător.

În fig.7.8 a este redată forma de undă a tensiunii redresate în regim staționar, sistemul funcționând în regim de

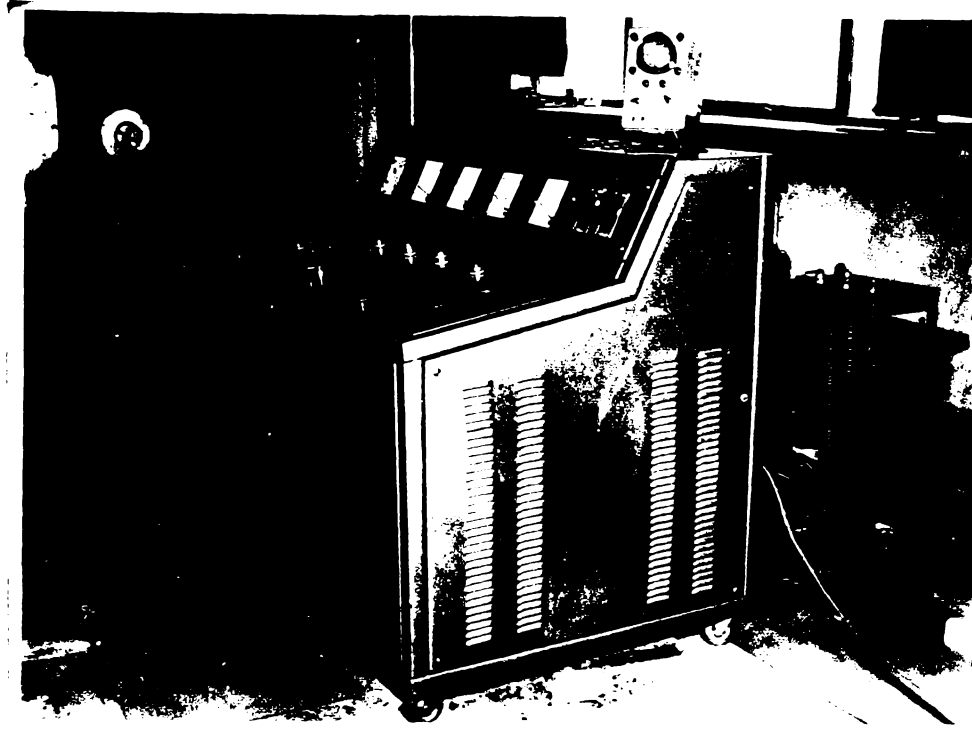


Fig.7.6

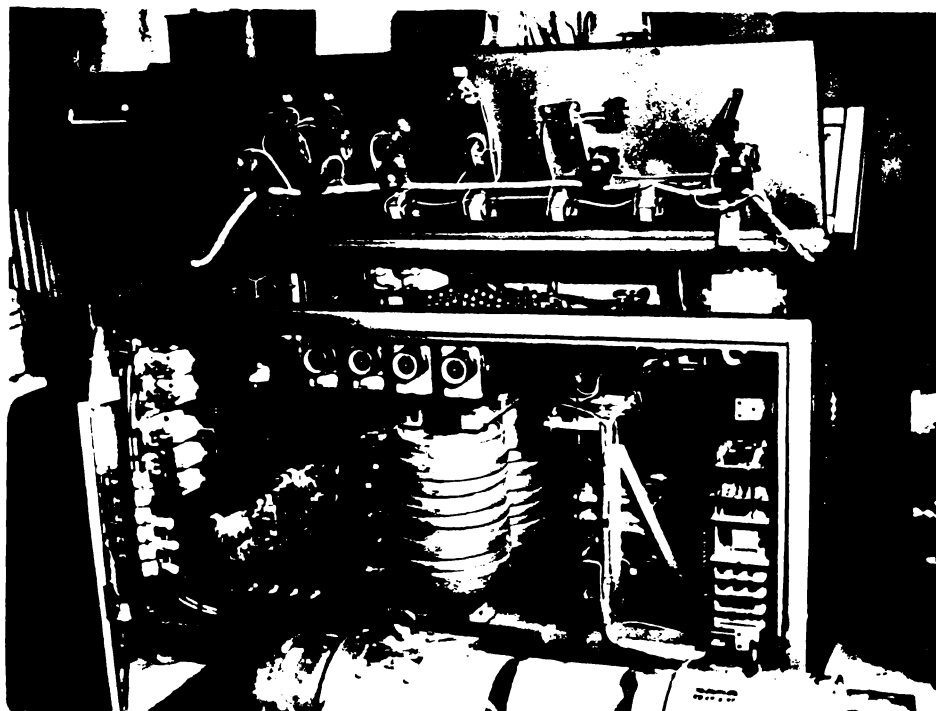


Fig.7.7

motor de c.c.-redresor comandat, la un curent în circuitul rotoric al mașinii de c.c. de 100 A. În fig. 7.8 b este reprezentată deasemeni forma de undă a tensiunii, la același curent în circuitul rotoric, sistemul mașină de c.c.-mutator funcționând în regim de generator de c.c.-invertor comandat. În ambele situații fenomenele au fost vizualizate la osciloscopul amintit mai sus.

Totodată, din analiza oscilogramelor tensiunii și curentului redresat (inclusiv a curentului de excitație) la funcționarea sistemului mașină de c.c.-mutator din cadrul instalației de încercare, în absența dispozitivului de blocare mecanică a rotorului mașină de c.c., se constată existența în momentul pornirii ($t = 0$) a unui pronunțat salt a curentului din circuitul rotoric (curba 1, fig.7.9), însoțită de o variație a curentului de excitație (curba 2, fig.7.9) și a tensiunii la bornele mașinii de c.c. (curba 3 fig.7.9). Bineînțeles acest fapt conduce implicit la o variație bruscă a cuplului la arborele M.E. de încercat, fenomen confirmat de altfel de considerațiile teoretice (cap.5) și de calcul (cap.6) efectuate.

În fig.7.10 este redată aceeași oscilogramă însă pentru alte valori ale mărimilor oscilografiate. În fig.7.11 a,b sînt reprezentate oscilogramele (deasemeni pentru aceleași mașini) pe întreaga durată a procesului tranzitoriu de funcționare a sistemului mașină de c.c.-mutator (adică în situația comutării automate a sistemului de la un regim la altul), însă fără a se folosi dispozitivul de blocare mecanică gen "freilauf".

În fig.7.12 sînt reprezentate oscilogramele curentului rotoric și a curentului de excitație, folosindu-se de această dată frîna mecanică de blocare. Din analiza acestor oscilograme se observă imediat că practic este insesizabil momentul intervenției perturbației (cuplul dat de M.E. de încercat), obținîndu-se astfel un cuplu static riguros constant, fapt ce confirmă considerațiile de calcul din cap.6, cum și curbele de răspuns obținute pe calculatorul numeric.

7.3. Rezultatele experimentale obținute cu mașinile electrice încercate.

În vederea cunoașterii încălzirii M.E. de încercat s-au efectuat în cadrul I.C.P.E. București și I.M.E.B. o se-

rie de încercări experimentale comparative (la un factor de inerție $FI = 4$ la serviciile tip S_1 și S_3 pentru diferite D.A.) la M.E. indicate în tabelul 7.1. La aceste M.E. s-au verificat în principal temperaturile maxime admisibile corespunzătoare clasei de izolație în care au fost construite [87]. Astfel de exemplu în fig.7.13 este reprezentată transmisia căldurii în lungul pachetului statoric la o mașină tip ASI (7,5 kW), iar în fig.7.14 transmisia căldurii în lungul înfășurării statorice, pentru diferite servicii de funcționare și durate relative de funcționare^{x)}. [132,133]

S-a constatat că M.E. destinate acționării I-R.T. care au fost încercate, dacă funcționează în R.I.P., prezintă o creștere sensibilă a încălzirii înfășurării rotorice și o scădere a încălzirii înfășurării statorice, de unde se poate trage concluzia că printr-o folosire rațională a materialelor electroizolante, atât înfășurările statorice, cât și cele rotorice, pot fi realizate din materiale de clase de izolație diferite [87, 92,227]. În fig. 7.15 și 7.16 sînt redată comparativ curbele P_{cu1} și $P_{cu2} = f(P_u)$ pentru o M.E. de 5 kW, 380 V, 750 rot/min. și pentru una mai mare de 45 kW, 380 V, 750 rot/min. din fabricația I.M.E.B.

În acest caz se constată deasemeni o creștere procentuală a încălzirii rotorului la trecerea din R.I.C.R. la regimul intermitent propriu-zis, și care este mai mare decît cea a statorului.

Astfel că la M.E. destinate acționării I-R.T. care în acest din urmă regim au rotorul mai cald (cazul M.E. din seria M_2 - din fabricație I.M.E.B.) rezultă că este suficient ca verificarea în R.I-C.R să se facă ținînd seama numai de încălzirea rotorului acestora.

Pentru M.E. cu caracteristicile M 42-8, 5 kW, 380 V, 750 rot/min. și M.31-6, 3 kW, 380 V, 1000 rot/min. s-au efectuat încercări la o frecvență de conectare $h=120$ c/h, D.A.=40%, $t_c=10$ min. și la cuplu static rezistent constant. Încălzirile

x) În toate aceste cazuri cifrele impare de pe abscise indică situarea termocuplelor în partea opusă ventilatorului, iar cifrele pare situarea în partea din spre ventilator.

(EXTRAS)

Tabelul 7.1

Nr. crt.	Firma	Tip	DA (%)	Pute-rea (kW)	Viteza de rotație (r/min)	$\frac{M_{max.}}{M_n}$	GD ² (kgfm ²)	Gaba-rit	Greu-tate (kgf)
1.	A.E.G.	AjK 160 L ₆ R ₁	100	7,5	945	2,5	0,607	160 L	140
			60	8,5	935	2,2			
			40	9	925	2,1			
			25	9,5	920	2			
			15	10	915	1,9			
2.	SIEMENS	AK 38/6R	100	22	970	3,6	2,8	-	340
			60	30	960	2,7			
			40	34	955	2,4			
			25	36	950	2,2			
			15	38	945	2,1			
		ILT ₂ 176 6 AA	100	22	965	4,4	3,7	255 M	400
			60	25	960	3,9			
			25	35	950	2,7			
			40	30	955	3,2			
			15	42	940	2,2			
		ILT ₂ 204	100	45	975	4	8,8	280 S	-
			60	53	970	3,4			
			40	63	965	2,9			
			25	72	965	2,5			
			15	85	960	2,1			
M 16	100	5,2	-	3,5	0,56	160 L	155		
	60	6	-	3,1					
	40	7	-	2,6					
	20	8,5	-	2,2					
	60'	6,6	-	2,8					
M 18	100	7,5	965	4	0,88	180 L	215		
	60	9,5	-	3,2					
	40	11	-	2,7					
	20	13	-	2,2					
	60'	10,5	-	2,8					
3.	SIEMENS ASEA	M 22	100	22	-	4,2	1,28	225 M	400
			60	25	-	3,7			
			40	30	-	3,1			
			20	37	-	2,5			
			60'	28	-	3,3			
		M 27	100	52	990	5,7	21,2	315 S	1000
			60	64	-	4,6			
			40	75	-	4			
			20	92	-	3,2			
			60'	70	-	4,2			
4.	IME Buc.	M ₂ -41-6	40	5	930	3,4	0,45	170	105
		M ₂ -42-6	40	7,5	940	3,4	0,6	170	150
		M ₂ -62-6	40	23	970	3	2,94	225	335
		M ₂ -72-6	40	45	975	3,65	6,23	250	500

s-au determinat prin metoda variației rezistenței (prin extrapolarea curbelor de răcire), rezultatul încercărilor fiind prezentate în tabelele 7.2, 7.3 și 7.4. Încercarea de la pct.3 tab.7.4 s-a efectuat la un cuplu static dependent de viteză. Diferența mare de încălzire obținută în cele două situații distincte confirmă că menținerea constantă a cuplului în special pe durata de pornire are o importanță esențială mai ales la funcționarea în regim intermitent și cu conectări repetate (R.I.-C.R.).

Pentru cunoașterea și compararea rezultatelor cu cele obținute pe instalația de încercare, s-au efectuat o serie de măsurători pe macarale care prezintă în funcționare un cuplu static rezistent în formă de treaptă. Astfel s-au oscilografiat parametrii la pornire (tensiune, curent etc.) la diferite M.F. de construcție străină montate pe grinzi tip I.M. Timișoara, INCERC etc., oscilogramele respective fiind redată în fig.7.17 și 7.18.

De asemenea s-au efectuat numeroase măsurători pe macarale tip Richier (cu sarcină maximă 4 tone) în diferite regimuri de lucru: ridicare-coborîre, translație, orientare (rotire), oscilogramele reprezentative fiind redată în fig.7.19, 7.20, respectiv 7.21.

Tabelul 7.2

Nr. crt.	Regim de funcționare	Puterea utilă (kW)	$t_p - t_s$ (s)	Încălzire stator °C	Încălzire rotor °C
1.	$t_c = 10 \text{ min.}$	5	0,5	67,2	72,7
2.	120 c/h	5	0,9	59,5	75,6

Tabelul 7.3

Nr. crt.	Frecvența de conectare h (c/h)	t_c (s)	P_2 (W)	$\frac{P_2}{P_{2n}}$	P_u (W)	$\frac{P_u}{P_{un}}$
1.	120	11,1	448	0,942	4950	0,99
2.	240	5,1	418	0,879	4800	0,96
3.	360	3,1	381	0,800	4600	0,92
4.	480	2,1	336	0,705	4400	0,88
5.	600	1,5	280	0,588	4000	0,80

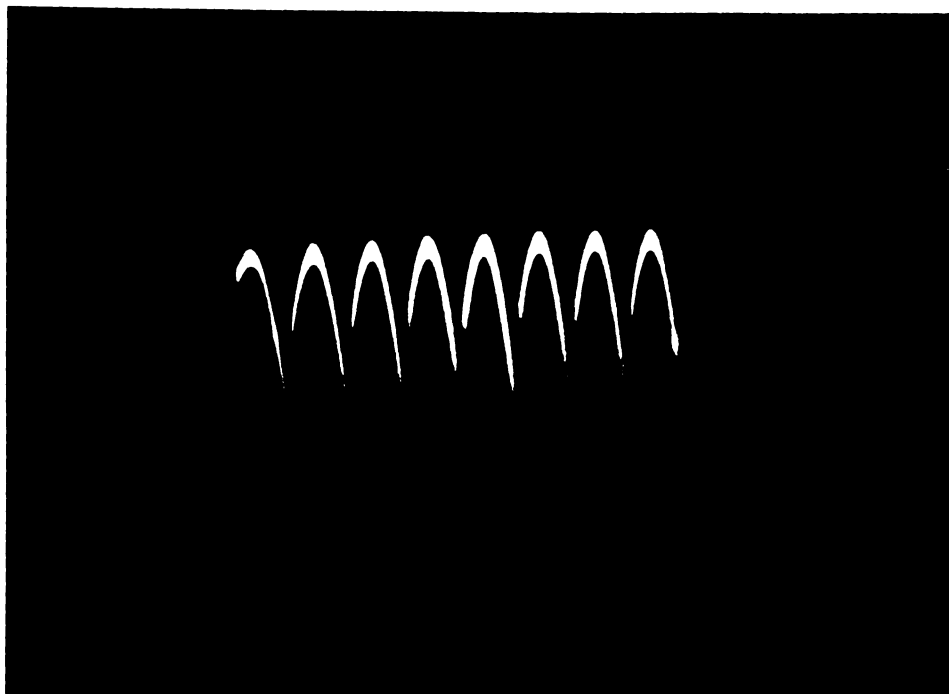


Fig. 7. 8 c

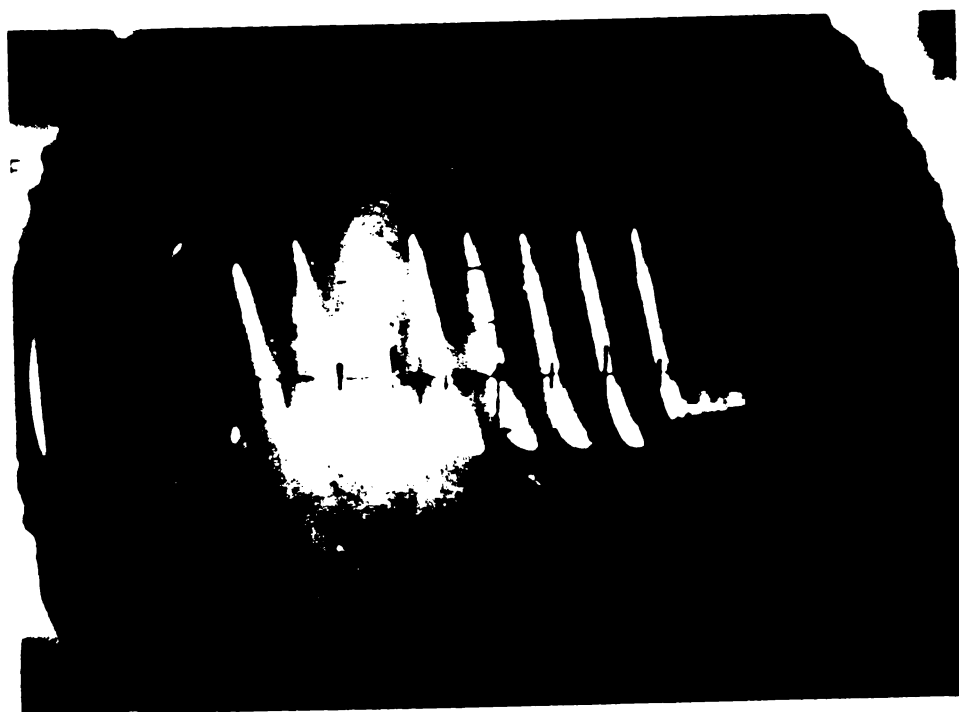


Fig. 7. 8 b

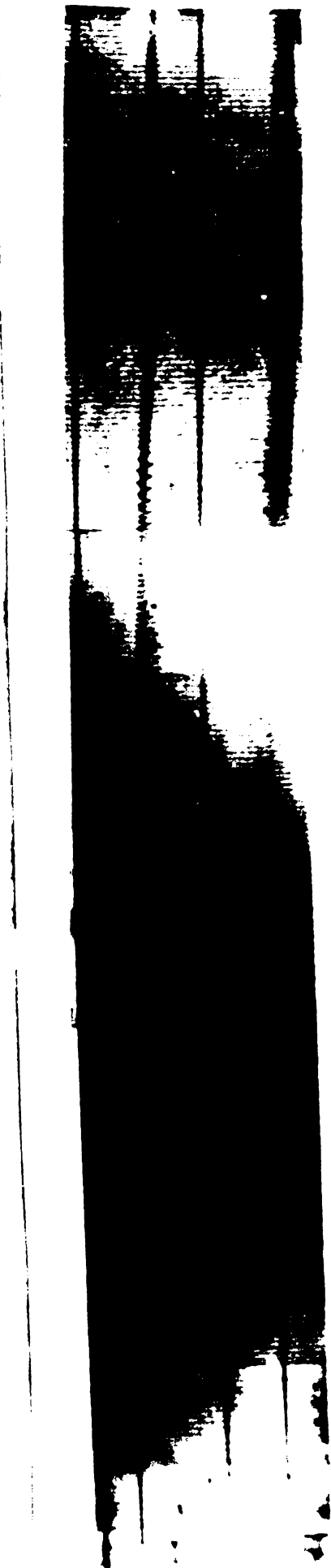


Fig.7.9

Fig.7.9

- 1 $I_d = 70 \text{ A}$
- 2. $I_e = 2,2 \text{ A}$
- 3. $U_d = 120 \text{ V}$

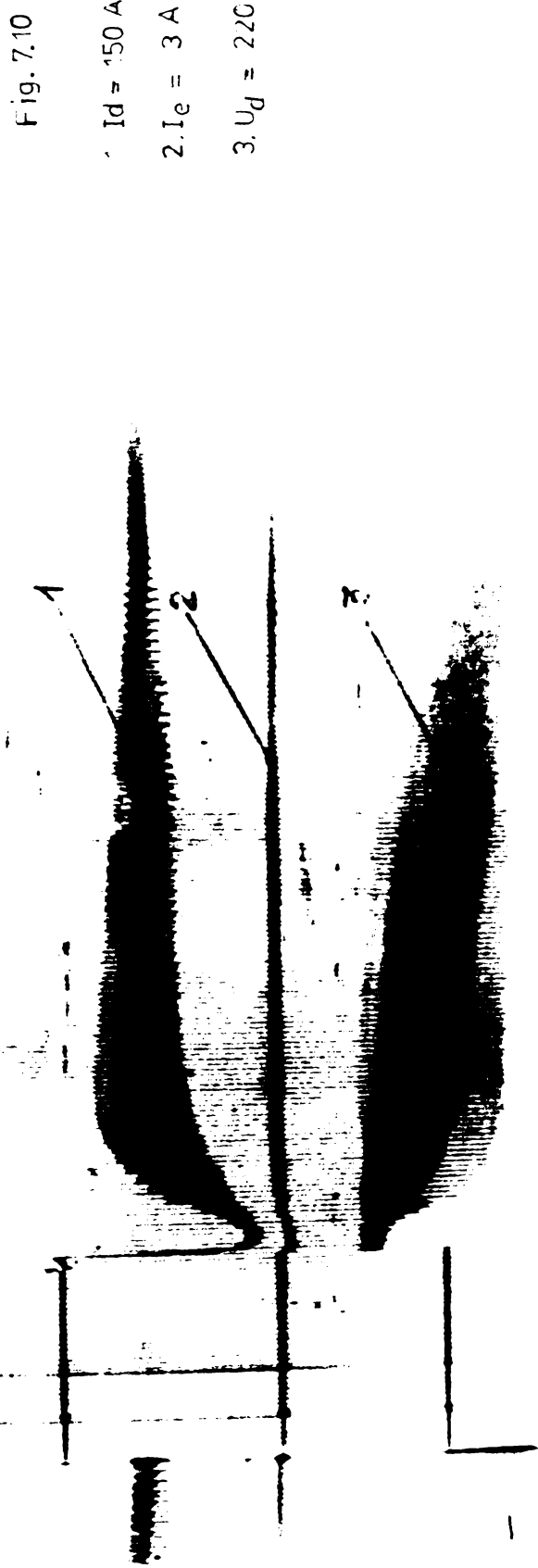


Fig. 7.10

- 1 $I_d = 150 \text{ A}$
- 2. $I_e = 3 \text{ A}$
- 3. $U_d = 220 \text{ V}$

Fig.7.10



Fig. 7.11

Fig. 7.11

1. $I_d = 100 \text{ A}$ 3. $U_d = 150 \text{ V}$

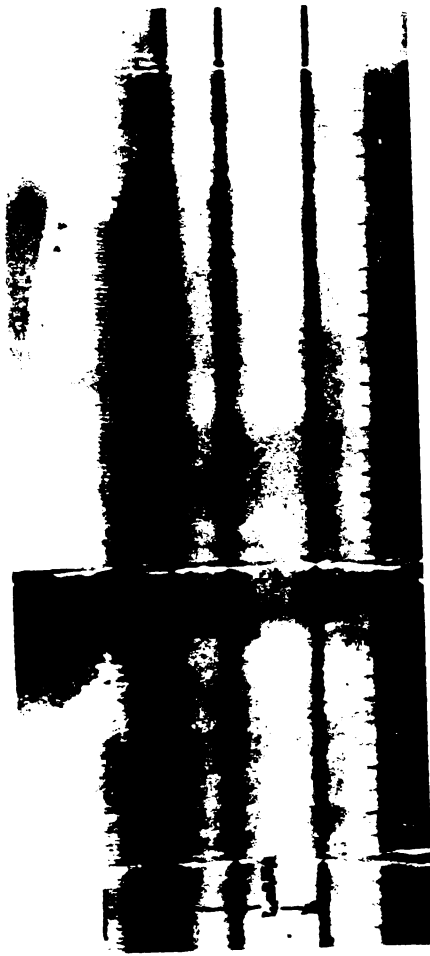


Fig. 7.12

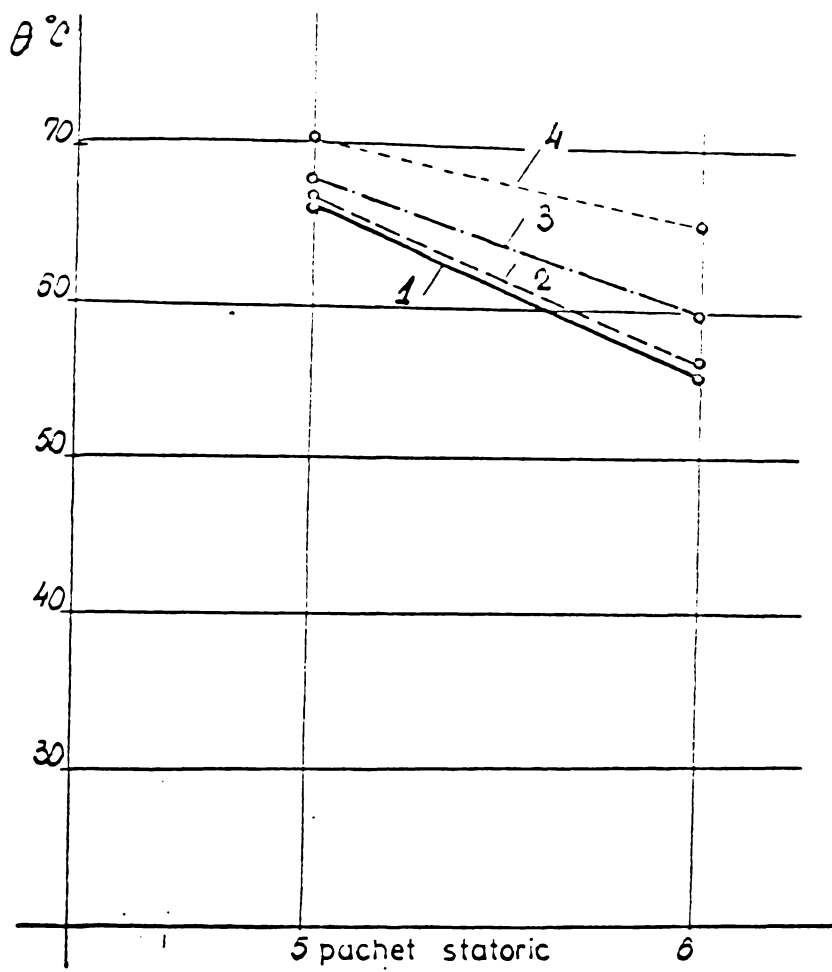


Fig. 7.13

- 1 Serviciu $S_1DA - 100\%$
- 2 Serviciu $S_3DA - 60\%$
- 3 Serviciu $S_3DA - 40\%$
- 4 Serviciu $S_3DA - 25\%$

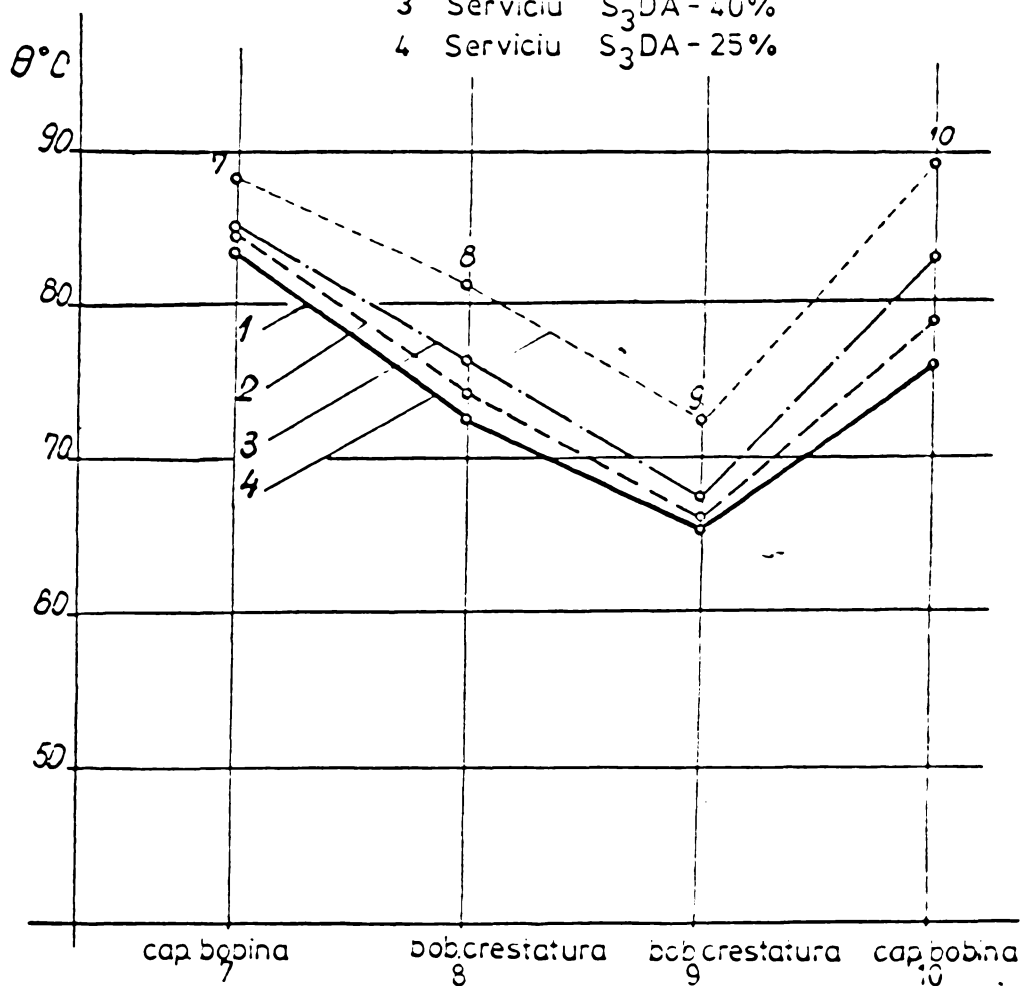


Fig. 7.14

- 1 Serviciu $S_1DA - 100\%$
- 2 Serviciu $S_3DA - 60\%$
- 3 Serviciu $S_3DA - 40\%$
- 4 Serviciu $S_3DA - 25\%$

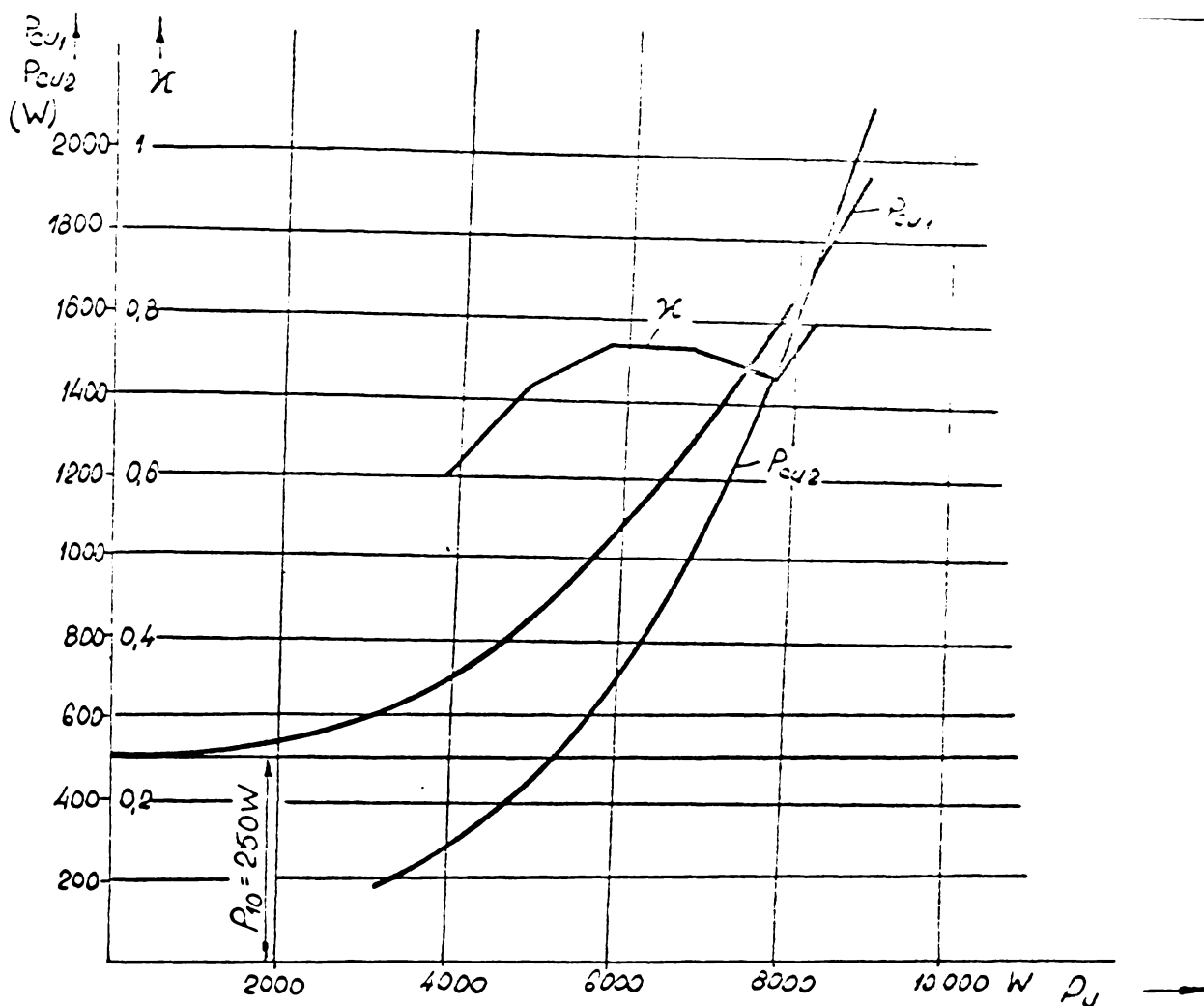


Fig. 7.15

M₂ 42-8; 5 kw, 750 rot/min, 380V

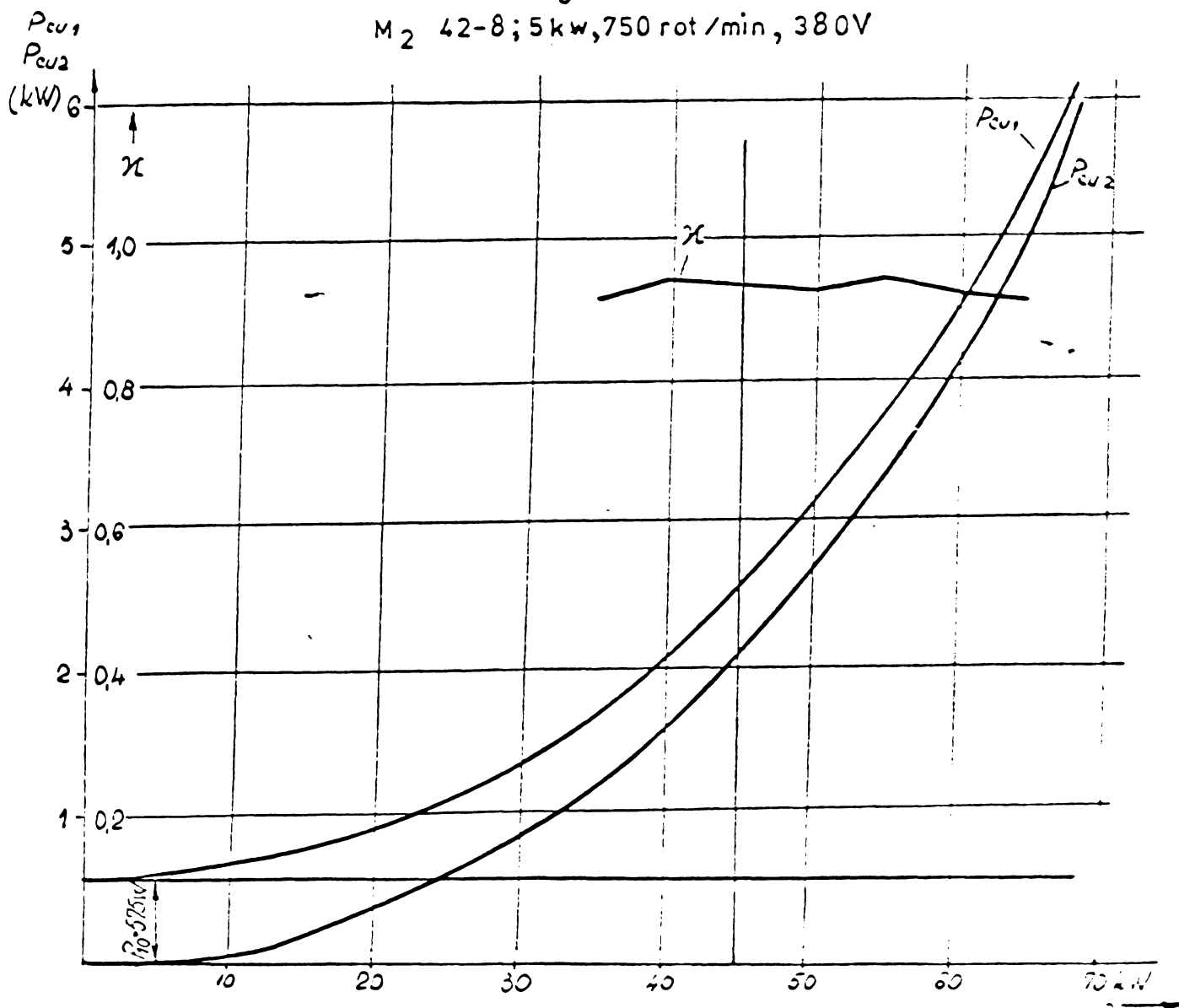


Fig. 7.16

M₂ 91-8; 45 kw, 750 rot/min, 380V

$$\eta = \frac{P_1 - P_{10}}{P_2}$$



Fig.7.17

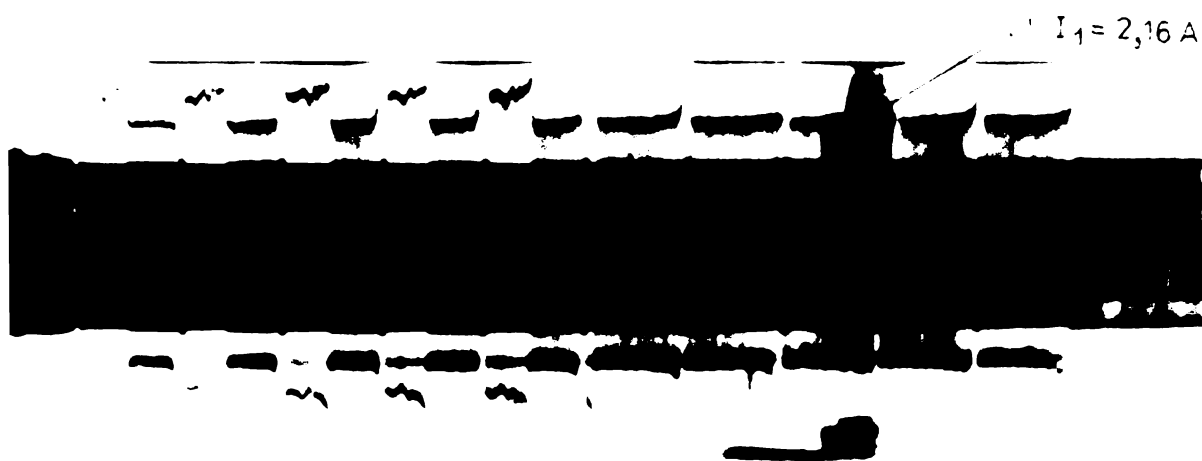


Fig.7.18



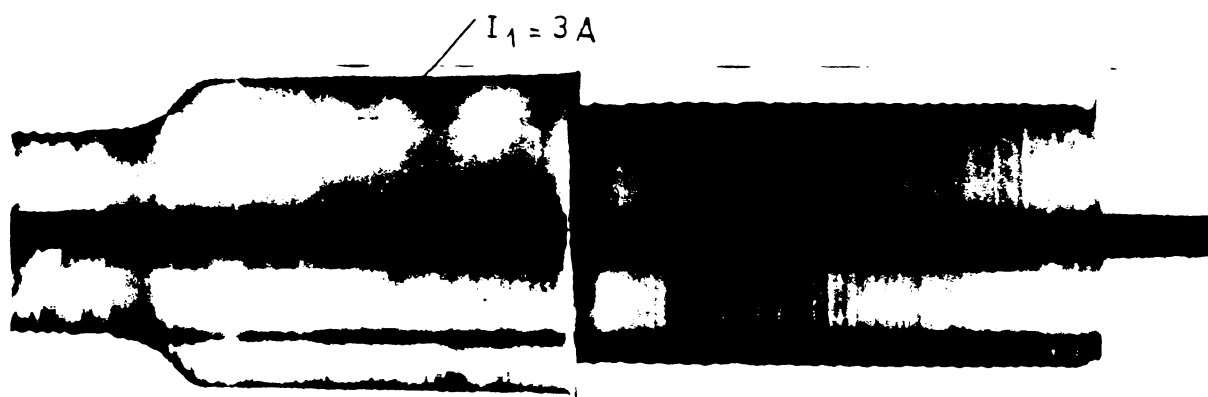


Fig. 7.19

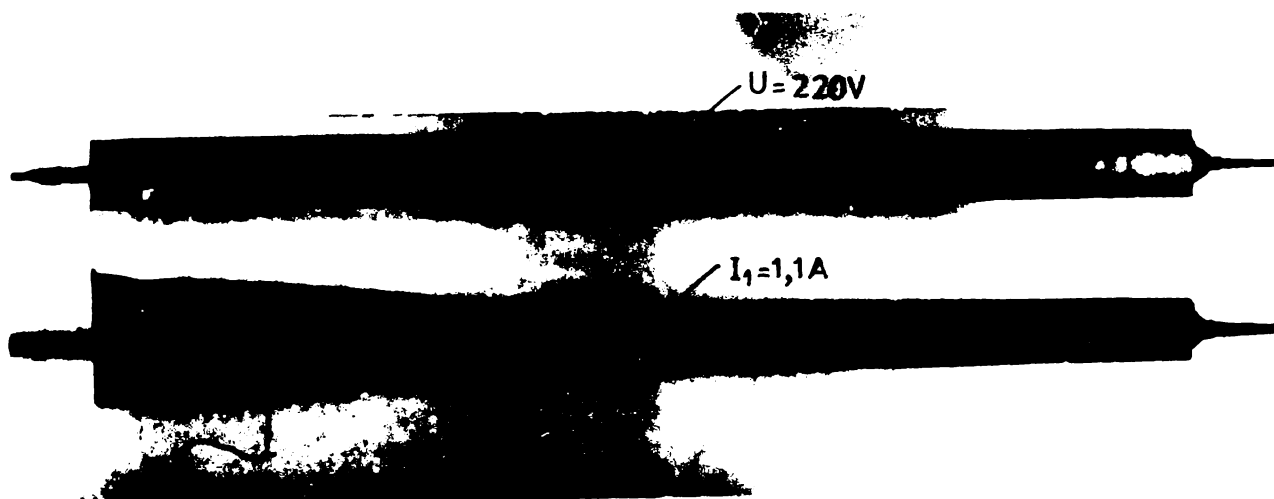


Fig 7.20

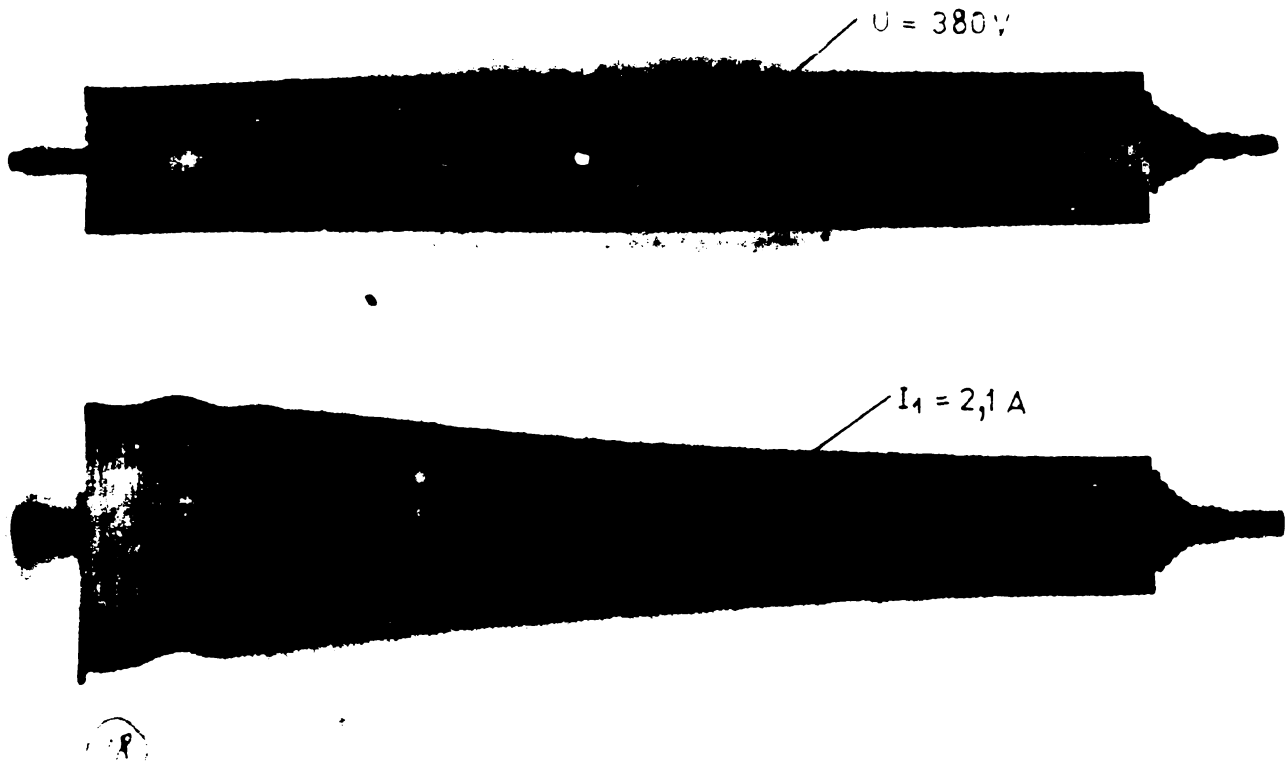


Fig.7.21a

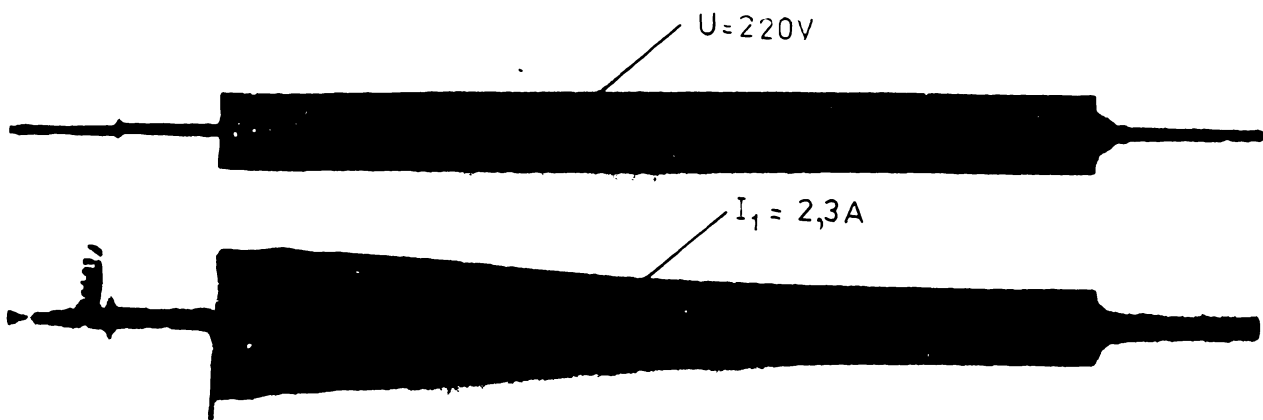


Fig.7.21b

Tabelul 7.4

Nr. crt.	Regim de funcționare	Putere utilă (kW)	$t_p - t_s$ (s)	Încălzire stator °C	Încălzire rotor °C	Observații
1.	$t_c = 10$ min. 120 c/h	3	1,85	47,4	62,7	Cuplu static rezistent constant
2.	$t_c = 10$ min. 120 c/h	3	1,85	45,7	69	Cuplu static rezistent constant
3.	$t_c = 10$ min. 120 c/h	3	1,85	43,8	59,5	Cuplu static rezistent dependent de viteză

7.4. Alte posibilități de aplicare a instalației de încercare propusă în lucrare.

7.4.1. Utilizarea instalației I-M.E. la ridicarea caracteristicii mecanice cu înregistrare continuă și cu posibilitate de recuperare a energiei în sistem.

Instalația de încercare I-M.E. permite adaptarea unui variator-temporizator tranzistorizat care în scopul ridicării caracteristicii mecanice a M.F. asincrone în general și a M.E. destinate acționării I-R.T. în special [175,224,225], asigură în mod automat deplasarea punctelor de funcționare de pe curba de ridicat pe tot domeniul său de existență. Acest fapt ce se obține prin modificarea frecvenței trenului de impulsuri a dispozitivului de comandă pe grilă în mod temporizat și automat astfel încât acesta să corespundă la diferite stări dinamice de funcționare, inclusiv cea cvasistaționară a M.E. de încercat. [105]

7.4.2. Folosirea instalației I-M.E. la încercarea simultană a mai multor mașini electrice de încercat, inclusiv la verificarea fiabilității acestora.

Încercarea simultană a mai multor M.E. cu instalația de încercare I-M.E. propusă în prezenta lucrare, se poate obține prin folosirea unui transformator de adaptare cu o înfășurare pe partea de tensiune înaltă și "n" înfășurări în secundar și la care sînt conectate tot atîtea mutatoare statice.

Transformatorul este astfel construit, încît la scurtcircuitul a $n-1$ înfășurări secundare trifazate și la curent nominal în primar, pe înfășurarea secundară rămasă deschisă, să apară cel puțin 85 % din tensiunea secundară de scurtcircuit recalculată. Pentru asigurarea unei funcționări optime, instalația de încercare I-M.E. în acest caz mai cuprinde un bloc de control al comutației pentru toate invertoarele conectate la înfășurările secundare ale transformatorului respectiv. [110]

Instalația de încercare I-M.E. este astfel concepută încît permite folosirea acesteia la verificarea fiabilității M.E. de acționare cu posibilitatea de a verifica simultan mai multe M.E. (în scopul asigurării nivelului de încredere necesar), dat fiind necesitatea de a modela regimul de funcționare a M.E. de acționare [106,108], cît mai apropiat de realitate și a asigura reproductibilitatea încercărilor. Acest fapt duce în final la stabilirea mai precisă a condițiilor limită, necesare în vederea proiectării M.E. respective.

Instalația de încercare I-M.E. poate fi utilizată și ca instalație funcțională de verificare a sistemului de izolație a M.E. în condiții de reproducere optimă a factorilor de exploatare cei mai importanți (termici, mecanici și electrice).

De asemenea instalația I-M.E. permite automatizarea trecerii M.E. de încercat din regim asincron în regim sincron inclusiv o încercare accelerată a acestora.

Este de menționat că verificarea fiabilității M.E. se poate efectua și prin folosirea unei instalații de încercare echipată cu elemente statice în totalitate, derivată din instalația de încercare propusă în lucrare. M.E. asincrone de încercat sînt cuplate mecanic între ele și funcționează alternativ fie în regim de motor, fie de generator, pe baza unui ciclu de funcționare prestabilit. Ele sînt alimentate de la niște mutatoare statice cu circuit intermediar de c.c. [51], soluție propusă de autor și prevăzută a se aplica la I.M.E.B. [106]

Dacă se pune problema încercării de M.E. (sau motoare cu ardere internă) de puteri mai mari, se poate utiliza și un transformator cu conexiune dublu trifazată și bobină

de absorbție în secundar. O instalație de acest gen, propusă de autor este în curs de aplicare la standul de probe de la I.C.M. Reșița. [2, 79, 107, 116, 117, 197]

7.5. Considerații tehnico-economice.

Folosirea instalației de încercare I-M.E., prezintă o serie de avantaje tehnico-economice și sub aspectul obținerii de economii însemnate de energie în conformitate cu legislația în vigoare privind măsurile de dezvoltare a bazei energetice și de folosire mai judicioasă a combustibililor și energiei.

Astfel dacă se efectuează un calcul tehnico-economic, ținând seama de producția anuală de M.E. din cadrul unei întreprinderi, se poate aprecia energia electrică posibil de recuperat (la puterea instalată a instalației de încercare I-M.E), folosind relația:

$$E_{\text{rec}} = N t_f P_N \quad (\text{kWh}) \quad (7.1)$$

în care:

N - numărul de M.E. încercate anual;

t_f - timpul efectiv de funcționare (ore);

P_N - puterea în regim continuu a M.E. (kW).

Indicatorul de eficiență - investiția specifică, este dată de relația:

$$I_s = \frac{C_i}{E_o} \quad (7.2)$$

în care:

C_i - costul total al instalației de încercare (inclusiv costul eventual al instalației de îmbunătățire a factorului de putere);

E_o - economiile anuale realizate prin recuperarea energiei electrice, date de relația:

$$E_o = E_{\text{rec}} P_m \quad (7.3)$$

unde:

P_m - prețul mediu al unui kWh.

./.

Termenul de recuperare (în ani) se obține din raportul:

$$T_r = \frac{E_{it}}{E_{ct}} \quad (7.4)$$

în care:

- C_{iT} - costul investiției totale pentru instalația de încercare I-M.E. se obține din relația:

$$C_{iT} = C_s + C_{exp} + C_i \quad (7.5)$$

iar economiile totale realizate E_{ct} cu relația:

$$E_{ct} = n (P_p - P_o) + E_o \quad (7.6)$$

unde:

- C_s - reprezintă cheltuielile pentru efectuarea studiilor, proiectelor și experimentărilor;
- C_{exp} - cheltuieli de investiție în exploatare;
- n - numărul de instalații realizate pe an;
- P_p - prețul de producție;
- P_o - prețul instalației.

Făcînd un calcul estimativ în cazul instalației aplicate, rezultă că timpul de amortizare la încercarea a circa 500 de M.E. la puterea medie de 30 kW este de maxim un an, fapt ce concordă cu prescripțiile în vigoare.

7.6. Concluzii.

Instalația de încercare I-M.E. permite (în condițiile unui laborator de încercări) încercarea M.E. destinate acționării I-R.T. prin metoda compilației (experimentală, de simulare), prin reproducerea optimă și cît mai aproape de realitate a întregului spectru de condiții de lucru și funcționale ale M.E. respectiv.

Instalația de încercare I-M.E., prin combinarea funcțională a trei mijloace distincte: mașină de c.c.-mutator, dispozitiv de blocare și măsură și dispozitiv de comandă și programare, conduce la obținerea unor performanțe dinamice

./.

maxime (durată minimă a procesului tranzitoriu, precizie mare de reglare, viteză mare de înlăturare a efectelor perturbațiilor măsurabile, consum minim de energie electrică etc.) reprezentînd din cîte se cunoaște o soluție absolut nouă atît pe plan național, cît și mondial. Totodată gama de aplicabilitate a instalației poate fi mult lărgită și pentru încercarea și a altor tipuri de mașini, atît electrice (toate tipurile de M.E.), cît și termice (ca de exemplu motoarele cu ardere internă folosite la acționarea locomotivelor sau autovehiculelor), hidraulice (turbine) etc. [21,113,114,115,116]. Prin inversarea corespunzătoare a curentului de excitație a mașinii de c.c., soluția poate fi generalizată pentru încercarea M.E. la cuplu de sarcină reglat (constant sau variabil după o lege prestabilită) pentru încercări de comportare în sarcină în regim staționar și dinamic a unor acționări reglabile. [84, 92, 93, 99,248]

Pe lîngă avantajele amintite mai sus, utilizarea instalației I-M.E. permite:

- eliminarea rezistențelor de sarcină;
- o întreținere minimă;
- obținerea unei game mari de variație a cuplului;
- detectarea cuplurilor parazite la M.E. asincrone;
- posibilitatea de a încerca orice tip de M.E. cum și schemele de acționare ale acestora în ansamblu;
- posibilitatea de adaptare a oricărui tip de mașină de c.c. existentă în dotarea întreprinderii ce folosesc asemenea instalații, ca mașină de frînare.

În concluzie, rezultă necesară obligativitatea, ca atît standardele cît și normele de produs în vigoare să fie completate la capitolul: "Reguli și metode pentru verificarea calității" (ca de exemplu STAS 6968/1-75 intitulat "Motoare asincrone trifazate destinate acționării instalațiilor de ridicat și transportat") cu următoarea clauză: "Încercarea M.E. destinate acționării I-R.T. se va efectua cu instalații care să permită obținerea la arborele M.E. de încercat (inclusiv din momentul inițial de pornire) a unui cuplu static rezistent constant sau reglat după o lege prestabilită, la un factor de inerție și timp de pornire determinat, cu o precizie sub 1 %".

Ca atare, asemenea încercări sînt dictate de necesitatea de a asigura cele trei criterii de apreciere a unei M.E.: func-

țional, de siguranță și economic [6, 62]. Aplicarea unei astfel de instalații este în primul rând indicată pentru verificarea puterii nominale a unei M.E. în funcție de încălzire, la un anumit regim de funcționare (conform STAS 1893-72) sau pentru determinarea unui regim de funcționare echivalent cu unul din regimurile tip în vederea simplificării încercărilor (în conformitate și cu indicațiile publicației CE 1 34-I).

Totodată, utilizarea unor instalații de încercare, care asigură în primul rând un cuplu static constant (din momentul inițial de pornire) identic cu cel ce reprezintă ridicarea sau coborârea unor greutăți de către I-R.T., contribuie în final la optimizarea dimensiunilor și consumurilor de materiale, la o creștere a siguranței în funcționare, permițând în același timp obținerea de date prețioase cu privire la durata de viață a M.E. încercate și în special a celor folosite în cadrul I-R.T.

C A P I T O L U L VIII

C O N C L U Z I I G E N E R A L E

În urma studiilor teoretice și experimentale efectuate asupra metodelor și instalațiilor destinate stabilirii performanțelor M.E. de acționare, se desprind următoarele concluzii cu caracter general:

1. Ponderea lucrărilor privind determinarea performanțelor mașinilor electrice de acționare a instalațiilor de ridicat și transportat (ce diferă de cele normale, din care derivă în fond) se deplasează din ce în ce mai mult spre determinările experimentale, fapt confirmat și de normele interne cât și de cele internaționale.

2. Pentru obținerea unor rezultate concludente, M.E. de acționare a I-R.T. trebuie încercate în condiții cât mai apropiate cu cele reale din exploatare, pe instalații adecvate acestui scop, capabile să asigure un cuplu static constant, la diferite regimuri de funcționare indicate în normele în vigoare. [97, 99, 159,227].

3. Din marea varietate de metode de încercare descrise în literatura de specialitate și clasificate în capitolul III, cele mai indicate sînt metodele electrice de încercare (punctul 3.3.3.).

4. Dintre aceste metode, metoda și instalația care satisface integral condițiile impuse apriori pentru încercarea M.E. destinate acționării I-R.T. este metoda și instalația propusă în lucrare (fig.4.1, paragraful 4.2), care reprezintă o soluție absolut nouă și originală, brevetată de autor. [99]

5. Față de schemele clasice de încercări, mașinile de c.c. asociate cu mutatoare statice comandate, permit obținerea unor instalații cu performanțe superioare sub aspectul randamentului, gabaritului, ușurinței în exploatare și a posibilității de automatizare. [79]

6. Pentru studiul funcționării acestei instalații inclusiv a proceselor tranzitorii, s-au stabilit ecuațiile funcționale ale sistemului mașină de c.c.-mutator, în raport cu particulari-

tățile de funcționare ale sistemului respectiv, luându-se în considerare efectele mai multor factori: reacția indusului, curenții turbionari etc. (cap.V, punctele 5.2.2.1-5.2.2.3).

7. Rezultatele experimentale efectuate (cap.VII) atît în ceea ce privește testarea instalației cît și încercarea de mașini electrice, confirmă considerațiile teoretice făcute în cap.V. (fig.6.7; 6.9; 7.12).

8. Caracteristicile tehnice ale instalației datorită performanțelor maxime pe care le asigură, satisfac exigențele impuse pe plan mondial cu privire la acuratețea măsurărilor (punctul 4.2.2).

9. Aplicabilitatea instalației poate fi extinsă pentru încercarea simultană a mai multor mașini electrice, în scopul verificării la fiabilitate a acestora (atît pentru partea mecanică cît și electrică) cum și pentru încercarea altor tipuri de motoare termice sau hidraulice (executarea de probe de rodaj, funcționare și recepție). [104,106,108,110]

10. Instalația de încercare pe lîngă că permite încercare completă a mașinilor electrice în general și a celor destinate acționării instalațiilor de ridicat și transportat în special, cu o deosebită acurateță a măsurărilor, poate asigura totodată obținerea unui program variat de încercări prin folosirea unui calculator de proces (dotat cu cartele perforate sau bandă magnetică), cu posibilitate de afișare a principalelor operații și a eventualelor deranjamente. Vizualizarea fenomenelor și înregistrarea acestora se poate efectua folosind un osciloscop cu memorie, respectiv un înregistrator.

11. Standardul în vigoare privind mașinile electrice destinate acționării instalațiilor de ridicat și transportat se recomandă a fi completat în sensul prevederii obligativității producătorilor de asemenea mașini, de a efectua încercările de tip și de lot cu instalații care asigură modelarea regimurilor reale de exploatare (paragraful 7.6), de genul celei tratate în prezenta lucrare.

12. Schema instalației fiind bazată pe principiul recuperării energiei în sistemul energetic, permite obținerea de importante economii de energie, dacă se au în vedere numărul, puterea mașinilor electrice și durata încercărilor respective, (paragraful 7.5).

13. Cerințele actuale în ceea ce privește precizia măsurătorilor și productivitatea instalației, au condus la realizarea unor modele matematice a sistemului mașină de c.c.-mutator static comandat, în care s-au luat în considerare neliniaritățile în vederea studierii fenomenelor prin simulare numerică (cap.VI.).

14. Diferențele mici între rezultatele experimentale și cele calculate cu relațiile folosite în lucrare se explică prin faptul că ipotezele de calcul conțin și ipoteze simplificatoare, dar care nu afectează rigurozitatea relațiilor, fapt confirmat și de rezultatele experimentale obținute (paragraful 7.2).

15. Metoda de calcul propusă în lucrare și modelul matematic stabilit, pot fi utilizate și generalizate pentru diverse sisteme de mașină de c.c.-mutator static comandat din cadrul instalațiilor de încercare, pentru o gamă largă de puteri a M.E. de încercat:

16. Dezavantajul instalațiilor de încercare prevăzute cu asemenea sisteme îl constituie reducerea factorului de putere, compensarea acestuia impunându-se de la caz la caz.

17. Contribuțiile principale considerate de către autor ca originale se pot menționa:

a). Analiză comparativă a metodelor de încercare cunoscute, pe baza studierii unei bogate bibliografii în domeniu (punctele 3.2-3.4);

b). Justificarea efectuării încercărilor mașinilor electrice de acționare a instalațiilor de ridicat și transportat în laboratoarele întreprinderilor, pe instalații de tipul celei elaborate (paragraful 4.2), ea însăși reprezentând o soluție originală brevetată. [99]

c). Precizarea că numai prin combinarea funcțională a unui sistem mașină de c.c. - mutator static comandat și a unei frâne mecanice, se poate obține un cuplu static constant la $t \leq 0$ (cap.IV).

d). Precizarea teoretică și verificarea experimentală că reglarea cuplului trebuie să se efectueze direct la arborele M.E. de încercat (cap.IV și cap.VII).

e). Prevederea unui dispozitiv de blocare mecanică silențioasă și practic instantanee gen "freilauf", cum și a unui programator electronic de concepție originală cu funcțiuni multiple (punctele 7.1.2 și 7.1.3).

f). Stabilirea ecuațiilor funcționale ale sistemului mașină de c.c. - mutator static comandat, cu particularizări în cazul în speță (cap.V);

g). Metoda privind considerarea efectelor curenților turbionari și a saturației circuitului magnetic din rotorul mașinii de c.c. (cap.V, punctele 5.2.2.2 și 5.2.2.3);

h). Stabilirea funcției de transfer a sistemului mașină de c.c. - mutator static comandat;

i) Realizarea unui model matematic și stabilirea schemei echivalente a instalației pentru analiza comportării acesteia în regim dinamic, inclusiv a stabilității sistemului pe calculatorul numeric (cap.VI);

j). Indicații cu privire la completarea standardelor existente referitoare la mașinile electrice destinate acționării instalațiilor de ridicat și transportat (cap.VII);

k). Stabilirea tehnologiei de încercare a M.E. în vederea determinării performanțelor acestora și a condițiilor tehnice principale ce trebuie îndeplinite de instalațiile de încercare (paragraful 4.1);

l). Metodă și instalație pentru ridicarea caracteristicii mecanice a mașinilor electrice de încercat, cu înregistrare continuă în mod automat. [105]

În concluzie se apreciază că întreprinderile constructoare de mașini electrice și beneficiarii acestora pot obține rezultate concludente și edificatoare folosind metodele și instalațiile (în genul celor prezentate în prezenta lucrare) în vederea stabilirii performanțelor produselor lor și în scopul obținerii unei exploatare raționale și cu siguranță mărită a instalațiilor de ridicat și transportat.

B I B L I O G R A F I E

1. ABRAHAM, L., KOPPELMANN, F. Die Zwangskommutierung ein neuer Zweig der Stromrichtertechnik. In: ETZ-A, caiet 18, 1966, p.649-658.
2. ACOSTA, O. Interphase Transformer for Multiple Connected Power Rectifiers. In: IEEE Transactions on Industry and General Applications, vol.IGA-1, nr.6, nov.-dec., 1965.
3. ALECU-CALUSITA, M., GUDUMAC, M. Aspecte privind modelarea sistemelor de reglare automată cu ajutorul calculatorului numeric. Comunicare prezentată la sesiunea de comunicări a Institutului Central de Informatică, București, XI 1977.
4. ALECU-CALUSITA, M., GHEORGHE, V., Trasarea locului rădăcinilor cu ajutorul calculatorului numeric. In: Automatica și electronica, vol.15, nr.3, 1971, p.123-131.
5. ANASTASIU, S. Sisteme multivariabile în procese rapide. In: Automatica și electronica, nr.5, 1971.
6. APETREI, C. Determinarea soluției tehnico-economice la proiectarea mașinilor electrice. In: Studii și cercetări de energetică și electrotehnică, seria A, vol.12, 1962, p.117-143.
7. ARHIP, M. Aplicații ale teoriei reglării combinate la un sistem de simulare a proceselor dinamice rapide. Comunicare la a II-a conferință a electricienilor, București, sept., 1969.
8. AVRAMESCU, A. Performanțele și aplicațiile industriale ale redresoarelor de putere cu semiconductoare. In: Electrotehnica, 10, nr.2-3, 1962, p.95-108.
9. BABUTIA, I., OPRENDECK, B. Determinarea în condiții uzinale a caracteristicii mecanice la mașinile asincrone. Din experiența uzinei "Electromotor" Timișoara, ODPT, București, 1970.
10. BALACI, I., SERACIN, E., ȘORA, I. Schemă pentru reglarea cuplului la motorul de curent continuu cu excitație separată, utilizând o punte cu tiristoare. In: Buletin tehnico-stiințific, IPT, 1975.

11. BĂLĂ, C.V. Proiectarea mașinilor electrice. Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1967.
12. BĂLTEANU, ST. Studiu critic asupra unor caracteristici ale ridicătorului de frână electrohidraulic folosit la sistemele de ridicare acționate cu motor asincron cu inele. In: Lucrările I.C.P.E. București, nr.18, 1967.
13. BÄNDEL, F., HÖLTER, R. Elektrische Antriebe von Rotationsdruckmaschinen. In: AEG - Mitteilungen, 58, nr.8, 1968, p.448.
14. x x x Banc pendulaire d'essai SAK - N 670 - VEM, febr.1965.
15. BARTZER, ST. Considerații privind studiul solicitării termice a motoarelor electrice de acționare. In: Buletinul științific și tehnic al I.P.T., tom 16 (30), fasc. 1, ian.-iunie, 1971.
16. BARTZER, S. Suprasarcina admisibilă a motoarelor electrice prin epuizarea rezervei de încălzire din regimul nominal. In: Electrotehnica, 20, nr.3, 1972.
17. BEDERKE, H.I. ș.a. Elektrische Antriebe und Steuerungen, Stuttgart, B.G., 1969.
18. BEDFORD, B.D., HOFT, R.C. Principles of Inverter Circuits. J.Wiley and Sons, London, 1964.
19. BEJAN, I., BALABAN, G. Automatizări și telecomenzi în electroenergetică. Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1976.
20. BERHNARD, H.I., KNUPPERTZ, B. Inițiere în tiristoare (trad. din l. germană), Ed. Tehnică, București, 1974.
21. BITANG, AL. ș.a. Stand universal pentru încercări de garanție pe modele de turbine hidraulice. In: Construcția de mașini, 26, nr.5-6, 1975.
22. BOBOC, ST. Aparate electronice pentru măsurarea maselor, forțelor și cuplurilor. Ed. Tehnică, București, 1971.
23. BOTAN, V.N. Cum se aleg motoarele electrice ale mecanismelor industriale. Ed. Tehnică, București, 1963.
24. BOTAN, V.N. ș.a. Acționarea electrică a macaralelor și podurilor rulante. Ed. Tehnică, București, 1968.
25. BOTAN, V.N. Bazele calculului acționărilor electrice. Ed. Tehnică, București, 1970.
26. BOTAN, V.N. Reglarea vitezei sistemelor de acționare electrică. Ed. Tehnică, București, 1974.

27. BRAȘOVAN, M., SERACIN, E., BOGOEVICI, N., KELEMEN, A., TRIFA, V. Acționări electrice (ediția a III-a). Aplicații industriale. Ed.Tehnică, București, 1977.
28. BRAȘOVAN, M. Acționări electromecanice. Ed.Didactică și Pedagogică, București, 1967.
29. BRAȘOVAN, M., SERACIN, E. Metode noi de proiectare a acționărilor electrice. Ed.Academiei RSR, București, 1968.
30. BRAȘOVAN, M. Asupra noțiunii caracteristicilor mecanice ale mașinilor electrice. In: Lucrările I.C.P.E., București, nr.30, 1975, p.29.
31. BURCEA, T. ș.a. Acționări electrice reversibile și reglabile prin variația tensiunii de alimentare statorică cu ajutorul tiristoarelor folosind motoarele asincrone pentru macarale. In: E.E.A. Automatica și electronica, 19, nr.2, iunie, 1975, p.74.
32. CĂLIN, S. ș.a. Automatizări electronice. Ed.Tehnică, București, 1972.
33. CĂLIN, S., BELEA, C. Sisteme automate complexe. Ed.Tehnică, București, 1973.
34. x x x CATALOG UNELEC. Moteurs asynchrones fermés a marche intermittente pour levage et manutention, Franța, 1965.
35. x x x CATALOG SIEMENS. Drehstrommotoren für Niederspannung Erläuterungen und Planungsunterlagen, RFG, 1965.
36. x x x CATALOG AEG. Drehstromausrüstungen für Hebezeuge, Lieferprogram, RFG, 1972-1973.
37. CAUSSIN, C. L'alimentation par redresseurs des gros moteurs de laminoirs réversibles. In: Bull.de Soc.Franc. Electr., nr.2, febr.1957.
38. CHAUPRADE, R. Les thyristors dans les systèmes de conversion d'énergie. In: Revue générale de l'Electricité, 80, nr.6, iunie, 1971.
39. CHECIULESCU, M., PASERE, E., GUDUMAC, M. ș.a. Cercetări și realizări de echipamente pentru domeniul electroenergetice. Comunicare prezentată la a IV-a sesiune de comunicări tehnico-științifice ICPET, București, iulie, 1975.

40. CHECIULESCU, M., PASERE, E., GUDUMAC, M. ș.a. Cercetări și realizări I.C.P.E. în domeniul echipamentelor electroenergetice. Comunicare prezentată la Conferința "Economia de energie" organizată de IPB, UGSR, CNIT și MEE, Craiova, octombrie, 1975.
41. CIOFU, VAL. Noi încercări ale mașinilor electrice antiexplozive și antigrizutoase. Comunicare la a II-a conferință a electricienilor, București, sept., 1969.
42. CONSTANTINESCU, L., LARKAMP, H. Stand pentru încercări dinamice ale micromotoarelor electrice utilizate în automatizări. In: E.E.A. Electrotehnica, 22, nr.9-10, sep.1974, p.283.
43. CORDIER, J.P. Le variation de vitesse des moteurs à courant alternatif de moyennes et grandes puissances par variateurs statiques de fréquence. In: ACEC Revue, nr. 1-2, 1974, p.3-24.
44. CORLĂȚEANU, V., GAVRILESCU, C., GUDUMAC, M. Indrumar pentru lucrări de laborator la mașini și surse electrice. Ed.Academiei Militare, vol.I, București, 1966.
45. CORLĂȚEANU, V., BERGMAN, I. Curs de încercări de mașini electrice. Ed. I.P.I., 1958.
46. CRACIUNOIU, V. ș.a. Ascensoare electrice. Ed.Tehnică, București, 1966.
47. CRAMARIUC, R., PETRESCU, V., TANASESCU, FL. Măsurători electrice industriale. Ed.Tehnică, București, 1971.
48. DAMSKER, D. Acționarea electrică. Ed.Energetică de Stat, vol.I, București, 1955.
49. DAMSKER, D. Sisteme moderne de acționări electrice. Ed.IDT, București, 1968.
50. DAMSKER, D. Principii și mijloace noi de automatizare a acționărilor electrice. Ed.Academiei RSR, 1964.
51. DAVIS, E., MEIER, R. Application of Inverter Drives. In: IEEE. Transactions on Industry and general Applications, vol. IGA, nr.1, ian.-febr.1969, p.45.
52. DERKSEN, I. Antriebe für Arbeitsprindeln in Werkzeugmaschinen. In: Siemens Zeitschrift, nr.6, 1975, pag.375.
53. DIACONESCU, M. Instalație pentru modelarea fizică a regimurilor de funcționare a sistemelor de acționare electrică. In: Buletin I.P.Iași, sec.III, tom.XXI, fasc.3-4, 1975, p.61.

54. DORDEA, T. Asupra ecuațiilor mașinilor electrice de curent alternativ. In: Studii și cercetări de energetică și electrotehnică, tom.16, nr.1, 1966.
55. DORDEA, T. Mașini electrice. Ed.Didactică și Pedagogică, București 1970.
56. DORDEA, T. ș.a. Metodă de determinare a parametrilor mașinilor de inducție. Comunicare prezentată la a VII-a sesiune de comunicări tehnico-științifice, I.C.P.E. București, sep.1970.
57. DÖRR, W. Zusammenhänge zwischen Leistung, schalthäufigkeit, Schwungmassen und Erwärmung bei polumschaltbaren Drehstrom Aufzugmotoren. In: ETZ-A, 81, caiet 15, iulie 1960.
58. DRAKENSJÖ, I. Messeinrichtung mit dem Drehmomentgeber-Torduktor. In: ASEA Zeitschrift, 15, caiet 2, 1970.
59. DRAGANESCU, O. ș.a. Metode noi utilizate în încercarea mașinilor electrice. Ed.IDT, București, 1966.
60. DRAPER, A. Electrical Machines. London, 1967.
61. DROUIN, G. Contrôle statique de vitesse et de couple des moteurs asynchrones pour engines de levage. In: Bull. Soc.Franç. Electr., Franța, 8, nr.33, 1962.
62. EPURAN, M., TATU, GH. Optimul economic în fabricația mașinilor electrice prin promovarea metodei "analiza valorii". In: Electrotehnica, 22, nr.1, ian.1974, p.1-8.
63. ERNST, H. Die Hebezeuge, vol.1,2,3. Friedr.Vieweg und Sohn, Braunschweig, 1964-1965..
64. FEINBERG, R., CHEN, Y.W. Commutation Phenomena in a Static Power Converter. In: Proc.IEE, vol.III, nr.1, ian. 1974, p.125.
65. FELEA, I. ș.a. Circuite cu tranzistoare în industrie. Ed. Tehnică, vol.I, București, 1963, idem vol.II, 1964.
66. FELEA, I. și colectiv. Circuite cu semiconductoare în industrie. Aparat de măsurat. Ed.Tehnică, București, 1970.
67. FIRAGO, I.B. ș.a.. Tiristornîie Tiklokonvertorî. Ed.Nauka i tehnika, Minsk, 1973.
68. FONG, W. O nouă încercare la temperatură pentru motoarele cu inducție polifazate, prin încărcarea fantomă. In: Proceedings of the IEE, Anglia, iulie 1972.

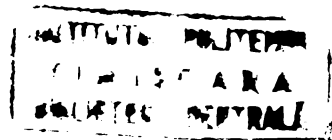
69. FÖLLINGER, O. ș.a. Regelungstechnik, Elitera.- Verlag, Berlin, 1972.
70. FRANSUA, AL., TEODORESCU, D. Servomotoare electrice în sistemele automate. Ed.Tehnică, București, 1966.
71. FRANSUA, AL. Mașini și acționări electrice. Ed.Didactică și Pedagogică, București, 1967.
72. FRANSUA, AL., SAAL, C., TOPA, J. Acționări electrice. Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1975.
73. FRANSUA, AL., NICOLAIDE, A., TRIFU, GH. Mașini electrice uzuale. Ed.Tehnică, București, 1973.
74. GALLAY, M. Progrès récents dans la protection des redresseurs de grande puissance contre les surtensions et les surcharges. In: Bull.Soc.Franç.Electr., 8, vol.V, nr.59, oct.1963.
75. GARABET, T., BIVOL, I., NEGRU, G. Utilizarea redresoarelor comandate în acționări electrice. Ed.Tehnică, București, 1960.
76. GEYGER, W. Dispozitive magnetice neliniare (trad.din l.engleză). Ed.Tehnică, București, 1968.
77. GHEORGHIU, I.S. Mașini electrice, vol.1, Litografia învățămîntului, București, 1955.
78. GHEORGHIU, I.S. Mașini electrice..Probleme și aplicații industriale, vol.1 și vol.2, ed.II, Ed.Tehnică, București, 1966.
79. GHEORGHIU, I.S., FRANSUA, AL. Tratat de mașini electrice. Ed.Academiei R.S.R., București: Mașini de curent continuu, Vol.I, 1968; Transformatoare, Vol.II, 1970; Mașini asincrone, Vol.III, 1971; Mașini sincrone, Vol.IV, 1972.
80. GIBSON, E.J. Sisteme automate neliniare (trad.din l.engleză), Ed.Tehnică, București, 1967.
81. GIBIER, M. Incercările mașinilor electrice. In: L'Electricien, nr.2098, sep.1968, p.177-182.
82. GILLE, G.I., DECAULNE, P., PELEGRIN, M. Teoria și calculul sistemelor de reglare automată. Ed.Tehnică, București, 1962.
83. GÎRLAȘU, ST. Studiul armonicelor curentului de linie la mutatorul cu punți trifazate asimetrice. In: Electrotehnica, 22, nr.1, ian.1974, p.14-22.

84. GLIGA, ST. Stand de probe reostatice pentru locomotive Diesel electrice. In: Electrotehnica, 13, nr.6, 1975, p.217-223.
85. GÖBEL, H., STRUNZE, M. Die untersynchrone Stromrichter cascade in der Antriebestechnik. In: AEG - Mitteilungen, 56, nr.6, 1966, p.392.
86. GROSU, ST., GUDUMAC, M., HERESCU, R., SLAIHER, S. Contribuția I.C.P.E. la dezvoltarea domeniului de mașini și transformatoare electrice. In: Lucrările I.C.P.E., București, nr.28 bis, 1973, p.13-23.
87. GUDUMAC, M. Metode și instalații de încercare a motoarelor de macara fabricate de UMEB. Studiu tehnic, comanda 26.361, Arhiva ICPE, București 1968.
88. GUDUMAC, M. Siliziumgesteuerte Gleichrichter zur Speisung von Eloxierungsanlagen. In: Rumänischer Maschinenbau III, nr.4, 1968, p.60.
89. GUDUMAC, M. Probleme privind transformatoarele pentru alimentarea redresoarelor de putere cu siliciu. In: Lucrările I.C.P.E., București, nr.19, 1968, p.19-28.
90. GUDUMAC, M. Unele considerații privind redresoarele comandate cu transductoare sau tiristoare și aplicațiile lor industriale. Comunicare prezentată la sesiunea de comunicări științifice a cadrelor didactice din Academia Militară Generală, București, aprilie, 1968.
91. GUDUMAC, M. Unele considerații privind conexiunile cu bobină de absorbție utilizate în instalațiile de redresare. Comunicare prezentată în cadrul sesiunii științifice festive organizată cu prilejul sărbătoririi a 150 ani de la înființarea primelor cursuri de inginerie în limba română în București, noiembrie, 1968.
92. GUDUMAC, M. ș.a. Metodă și instalație de încercare a motoarelor de macara, fabricate la UMEB. Proiect tehnic, comanda 26.361, Arhiva ICPE, București, iunie 1969.
93. GUDUMAC, M., MICU, D. Some Considerations concerning the Testing of Asynchronous Motors used in Lifting Equipments. In: Lucrările ICPE, București, nr.24, 1970, p.129-138.

94. GUDUMAC, M. Considerații privind încercarea motoarelor . asincrone folosite în instalații de ridicat și transportat. Comunicare prezentată la sesiunea de comunicări a Academiei Militare, București, aprilie. 1970.
95. GUDUMAC, M. ș.a. Metodă și instalație pentru încercarea motoarelor de macara. Referat tehnic, comanda 26.361, faza prototip experimental, Arhiva ICPE, București, 30 iunie, 1970.
96. GUDUMAC, M. Probleme privind comportarea în exploatare și criteriile de alegere a agregatelor pentru alimentarea cu curent continuu a instalațiilor din industria electrochimică. Comunicare prezentată la a VII-a sesiune de comunicări I.C.P.E., (publicată în volum), București, sept.1970.
97. GUDUMAC, M., MICU, D., IVAN, C. Considerații privind încercarea motoarelor de acționare a instalațiilor de ridicat, în vederea determinării performanțelor lor optime în diverse condiții de lucru. Comunicare prezentată la a VII-a sesiune de comunicări tehnico-științifice ICPE (publicată în volum), București, sept.1970.
98. GUDUMAC, M. ș.a. Metodă și instalație pentru încercarea motoarelor de macara. Referat tehnic - experimentări de prototip, comanda 26.361, Arhiva ICPE, București, 30.12.1970.
99. GUDUMAC, M. Metodă și instalație pentru încercarea motoarelor electrice. Brevet RSR 61.268/1971.
100. GUDUMAC, M. Redresoare cu semiconductoare. Ed.Tehnică, București, 1971.
101. GUDUMAC, M. Considerații privind metodele uzuale de încercare a motoarelor pentru instalații de ridicat, în vederea stabilirii datelor lor specifice. Comunicare prezentată la a II-a sesiune comună de comunicări științifice, Univ. Craiova - GUAMEC, decembrie, 1971.
102. GUDUMAC, M. Unele considerații privind interdependența între parametrii acționărilor electrice ale mașinilor de ridicat și transportat. Comunicare prezentată la a II-a sesiune comună de comunicări științifice, Univ. Craiova, GUAMEC, dec.1971.

103. GUDUMAC, M. Unele considerații privind recuperarea energiei folosită la încercarea mașinilor electrice prin injectarea acesteia în sistemul energetic. Comunicare prezentată la a II-a sesiune de comunicări ICFET, București, iun.1972.
104. GUDUMAC, M. Procedeu și instalație pentru încercarea grupurilor motor - generator utilizate la acționarea locomotivelor. Brevet RSR, nr.56.682, 1972.
105. GUDUMAC, M. Instalație și metodă de încercare a motoarelor cu regim de funcționare intermitent. Brevet RSR nr. 64.694, 1973.
106. GUDUMAC, M. Metodă și instalație de verificare a fiabilității motoarelor electrice asincrone. Brevet RSR. Dosar OSIM 74.141, 1973.
107. GUDUMAC, M. Procedeu și instalație pentru încercarea grupurilor motor - generator de putere. Brevet RSR nr. 64.764, 1973.
108. GUDUMAC, M. Perspective noi pentru îmbunătățirea calității și fiabilității produselor. In: Știință și tehnică, nr.9, sept.1973.
109. GUDUMAC, M. Unele considerații privind timbrarea motoarelor electrice folosite în instalații de ridicat și transportat. Comunicare prezentată la sesiunea de comunicări tehnico-științifice din cadrul IMEB, decembrie, 1973.
110. GUDUMAC, M. Procedeu și instalație pentru încercarea simultană a grupurilor motor - generator. Brevet RSR, nr. 64.772, 1974.
111. GUDUMAC, M. Agregat de putere pentru alimentarea cu curent continuu a instalațiilor din cadrul liniilor tehnologice din industrie. Brevet RSR, nr.64.773, 1974.
112. GUDUMAC, M. Redresor automatizat pentru alimentarea cu curent continuu reglabil a instalațiilor din industrie. Brevet RSR, Dosar OSIM 77.328, 1974
113. GUDUMAC, M. O nouă metodă de încercare a grupurilor motor - generator folosite la acționarea locomotivelor Diesel electrice bazată pe recuperarea energiei în sistem. Comunicare prezentată la sesiunea comună de comunicări tehnico-științifice, Univ.Craiova - GUAMEC, iunie, 1974

114. GUDUMAC, M. Recuperarea energiei electrice de la standurile de încercare a motoarelor Diesel. Referat prezentat la Consfătuirea "Schimb de experiență cu invenții și inovații din domeniul energiei privind economia de combustibil și energie", București, iunie 1974.
115. GUDUMAC, M. Stand de încercare a motoarelor cu ardere internă, cu puteri cuprinse între 1500-4000 CP. Comunicare prezentată la ICPEHR - Filiala Reșița, decembrie 1974.
116. GUDUMAC, M. Stand de probe pentru încercarea grupurilor motor - generator, cu recuperarea energiei în sistemul energetic. In: Lucrările ICPE București, nr.30, 1975, p.33-39.
117. GUDUMAC, M. Sursă de alimentare cu energie electrică a unei instalații pentru obținerea substanțelor pure semiconductoare. Brevet RSR nr.59.352, 1975.
118. GUDUMAC, M., PASERE, E. Contribuții privind realizarea de echipamente tehnologice moderne utilizate la alimentarea mașinilor de prelucrare a metalelor prin electrochimie și la încercarea grupurilor motor-generator de putere. Comunicare prezentată la a XII-a sesiune jubiliată de comunicări tehnico-științifice, ICPE, București - 1950-1975, 4-6 noiembrie 1976.
119. GUDUMAC, M., ALECU-CALUSITA, M. Analiza cu ajutorul calculatorului a regimului dinamic la un grup motor-generator de putere. Comunicare prezentată la sesiunea de comunicări științifice a Academiei Militare - secțiunea calculatoare și sisteme, București, 14-15 decembrie, 1976.
120. GUDUMAC, M. Metodă și dispozitiv de protecție a mașinilor și instalațiilor electrice. Dosar OSIM nr.88870, 1976.
121. HANNAKAM, L. Gleichstrombremsung von Asynchronmaschinen. In: ETZ-A 87, caiet 14, 1966, p.515-526.
122. HARRIS, C., CREDE, CH. Socuri și vibrații (trad.din l.engleză), Ed.Tehnică, București, 1968.
123. HANGANUT, M. Automatica. Ed.Didactică și Pedagogică, București, 1971.
124. HELMUTH, E. Die Hebezeuge. Vieweg und Sohn, Braunschweig, 1958.



125. HENGESBERGHER, J., WIEGAND, A. Schutz von Thyristor - Stromrichtern grösserer Leistung. In: ETZ-A, 86, caiet 8, 1965, p.263-268.
126. HECK, R., MEYER, M. Die asynchrone Umrichtermaschine, ein kontaktloser, drehzahlregelbarer Umkehrantrieb. In: Siemens Zeitschrift, caiet 4, aprilie, 1963.
127. HERLET, A. Calcul des thyristors pour differents applications. In: Revue Siemens, nr.9, octombrie, 1965, p.294.
128. HORTOPAN, GH. Aparate electrice. Ed.Didactică și Pedagogică, București, 1972.
129. x x x Instrucțiuni pentru seriile sovietice de motoare. A, cap.II. "Recomandări privind alegerea motoarelor pentru regimuri ciclice de funcționare". Date tehnice suplimentare, 1965.
130. x x x Incercările mașinilor electrice de curent continuu. Ed.Energetică de stat, București, 1952.
131. x x x I.S.C.I.R. Indrumător pentru construcția și exploatarea macaralelor. Ed.Tehnică, București, 1965.
132. IVAN, C., GUDUMAC, M., MICU, D. Considerații asupra motoarelor electrice cu funcționare intermitentă. Comunicare la a VII-a sesiune de comunicări tehnico-științifice, ICPE, București, sept.1970.
133. IVAN, C. Considerarea temperaturii diferitelor părți componente ale mașinilor electrice și a transmisiei căldurii între ele. In: Electrotehnica, 22, nr.3, 1974, p.81.
134. JERVE, K.G. Incercările mașinilor electrice rotative (trad. din l.rusă). Ed.Tehnică, București, 1972.
135. JEVONS, M. Electrical Machine Theory. Blackie, Glasgow, London, 1966.
136. KALMAN, R.E., FALB, P.L., ARBIB, M.A. Teoria sistemelor dinamice (trad.din l.engleză), Ed.Tehnică, București, 1976.
137. KARSA, B. Electrical Measuring Instruments and Measurements. Akademia Kiado, Budapest, 1967.
138. KELEMEN, A. Acționări electrice, Ed.Didactică și Pedagogică, București, 1976.
139. KING, K.G. The Application of Silicon Controlled Rectifiers to the Control of Electrical Machines. In: Proceedings of the institution of Electrical Engineers, vol.110, ian.1963, p.197.

140. KLATTE, G. Stand und Entwicklungstendenzen der Antriebstechnik der Zellstoff - und Papierindustrie. In: Technische Mitteilungen AEG - Telefunken, 58, 1968, 8, p.422.
141. KOPPE, H. Mesure de couple de torsion et de la vitesse de rotation d'un arbre de transmission. In: Electronique industrielle, nr.92, mar.-apr.1966, p.230.
142. KORN, A.C. Simularea și măsurarea proceselor aleatoare (trad. din l. engleză). Ed. Tehnică, București, 1969.
143. KOSTENKO, M., PIOTROVSKI, L. Machines électriques, tome I et II, Ed. Mir, Moscow, 1969.
144. KUO, C.B. Sisteme automate cu eșantionare (trad. din l. engleză). Ed. Tehnică, București, 1967.
145. KÜMMEL, F. Elektrische Antriebstechnik, Springer Verlag, Berlin, 1972.
146. LAVI, A., POLGE, I.R. Reglajul vitezei motorului de inducție cu ajutorul invertorului static în rotor (trad. din l. engleză). In: IEEE Transactions, vol.85, ian.1966.
147. LAZAROIU, D.F. Mașini electrice de mică putere. Ed. Tehnică, București, 1965.
148. LEONHARD, A. Elektrische Antriebe, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1959.
149. LEONHARD, W. Diskrete Regelsysteme. Mannheim, Wissenschaftsverlag, 1972.
150. LYM, Y. Reglarea cuplului de pornire la motoarele asincrone cu rotor bobinat (trad. din l. engleză). In: IEEE Transactions Power Apparatus and Systems, 4, apr.1970.
151. MAURER, F. Vergleich verschiedener zündsteuerverfahren für netzgeführte Stromrichter. In: ETZ-A, vol.95, caiet 1, 1974, p.50.
152. MAGUREANU, R. Studiul teoretic și experimental al motorului sincron cu poli aparenti, alimentat de la un comutator electronic. In: Electrotehnica, 18, nr.11, nov.1970. p.410-416.
153. MANFRED, M. ș.a. Drehstromantriebe mit Thyristor - stromrichtern. In: AEG - Mitteilungen, 56, nr.6, 1966, p.370.
154. x x x Manualul inginerului electrician, Vol.II. Mașini electrice. Ed. Tehnică, București, 1954.
155. x x x Manualul inginerului electrician. Vol.III. Curentul continuu. Ed. Tehnică, București, 1956.

156. x x x Manualul inginerului electrician. Vol.V, cap.V, Acționări electrice. Ed.Tehnică, București, 1957.
157. x.x x Manualul inginerului mecanic. Vol.I, secțiunea 3. Mașini de ridicat și transportat. Ed.Agir.,1949.
158. x x x Manualul inginerului electrician. Vol.VIII. Electricizarea și automatizarea în întreprinderile industriale. Ed.Tehnică, București, 1959..
159. x x x Mașini electrice rotative. Culegere de standarde. Ed.Tehnică, București, 1976.
160. MEEROV, V.M. Bazele reglării automate a mașinilor electrice. (trad.din l.rusă), Ed.Energetică de Stat, București, 1954.
161. x x x .Memoratorul inginerului electrician. Siemens. (trad. din l.germană). Ed.Tehnică, București, 1971.
162. MEYER, M. Tiristoarele în practică. Mutatoare cu comutație forțată (trad.din l.germană). Ed.Tehnică, București, 1970.
163. x x x Metode de încercare și control în fabricația motoarelor asincrone. Ed.IDT, București, 1960.
164. MIKULASCHEK, F. ș.a. Halbgesteuerte zu - und Gegenschaltung zweier Dreiphasenbrücken. In: AEG - Mitteilungen, 56, nr,6, 1966,
165. MORARU, A. Amplidina. Ed.Academiei, București, 1962.
166. MOROZOV, P.D. Principiile de bază ale dispozitivelor electrice de acționare (trad,din l.rusă). Ed.Tehnică, București,1952.
167. MÖLTGEN, G. Tiristoarele în practică. Mutatoare cu comutație de la rețea (trad.din l.germană). Ed.Tehnică, București, 1970.
168. MURGU, Z. Comportarea motorului de curent continuu în regim tranzitoriu. In: Electrotehnica, 18, nr.7, iulie 1970, p.241-248.
169. NEDELCU, V. Regimurile de funcționare al mașinilor de curent alternativ. Ed.Tehnică, București, 1968.
170. NICOLAIDE, A. Mașini electrice. Ed.Scrisul.Românesc, Craiova, 1975.
171. NICOLESCU, E., RADUT, C. Mașini electrice fabricate în RSR. Ed.Tehnică, București,1965.

172. NOVAC, I., OPRENDECK, B. Mașini electrice. Ed. Didactică și pedagogică, Timișoara, 1973.
173. NÜRNBERG, V. Die Prüfung der elektrischer Maschinen. Springer Verlag, Berlin, 1959.
174. OPPELT, W. Tehnica reglării automate (trad. din l. germană). Ed. Tehnică, București, 1965.
175. OPRENDECK, B. Considerații asupra caracteristicii mecanice a mașinilor de inducție. In: Electrotehnica, 13, nr. 8, 1965, p. 279.
176. OSTERMANN, H. Thyristorantriebe für Hebezeuge. In: AEG.-Mitteilungen, 56, nr. 7, 1966, p. 432.
177. OSTERMANN, N. H. Acționări electrice de c.c. cu tiristoare pentru mașinile de ridicat și transportat. In: Fördern und Heben, nr. 13, 1967.
178. OTTO, H. Antriebe mit Halbleiter-Stromrichtern über netzgeführte Stromrichter. In: ETZ-A, 88, nr. 18, 1967, p. 452.
179. PAPADACHE, I. Automatica aplicată. Ed. Tehnică, București, 1971.
180. PAPADACHE, I. ș.a. Reglatoare electronice. Ed. Tehnică, București, 1966.
181. PAVLASEK, F. Incărcarea economică a motoarelor asincrone. In: Elektrotehnica 13, nr. 8, aug. 1958, p. 261-262.
182. PELEGRIN, M. ș.a. Elementele sistemelor de reglare automată. Ed. Tehnică, București, 1963.
183. PIMENOV, B., POSSE, B. A. Oprokidivanie invertora. In: Elektricitstvo, nr. 6, 1956, p. 65.
184. PLANCON, M. M., PLAZA, A. M. Une réalisation de positionnement numérique automatique associé à une commande par redresseur-onduleur pour le serrage des vis d'un laminier à chaud. In: Bull. de Soc. Franç. Electric, 8, vol. IV, nr. 46, octobre 1963.
185. POLTEV, V. K., SMOLNIKOV, P. L. Echipamentul electric al uzinelor metalurgice (trad. din l. rusă). Ed. Energetică de stat, București, 1955.
186. QUANDRI, G. Technique d'emploi des moteurs asynchrones industriels et de leur appareillage. Ed. Eyrolles, Paris, 1965.
187. RABINOVICI, A. R. Motoare electrice de macara și metalurgice. Moscow, 1958.

188. RABL, H. Netzgeführte Thyristor-Stromrichter in der Antriebstechnik. In: Elin - Zeitschrift, XXII, caiet 314, dec., Wien, 1970.
189. RADULET, R. Bazele teoretice ale electrotehnicii vol.I-III. Litografia Invățământului, București, 1958.
190. RAULESCU, I. Solicitarea reală a motoarelor de ascensor. In: Electrotehnica, 18, nr.12, dec.1970, p.446-451.
191. REICHMANN, H. Stromrichter mit steuerbaren Siliziumzellen für motorische Antriebe. In: AEG - Mitteilungen, 51, nr. U/2 1961, p.463-471.
192. RICHTER, R. Mașini electrice (trad.din l.germană). Ed.Tehnică, București. Mașini de curent continuu. Vol.I, 1958. Mașini asincrone. Vol.IV, 1960. Mașini cu colector de curent alternativ mono și polifazate, (grupuri cu mașini de reglaj.) Vol.V, 1961.
193. RIOUX, C. Stabilirea teoriei generale a mașinilor electrice plecând de la ecuațiile câmpului electromagnetic. In: Revue générale de l'Electricité, 79, nr.5, mai, 1970, p.415-421.
194. ROSENMAYR, D. Elemente cu tiristoare și motoare asincrone pentru acționarea dispozitivelor de ridicat cu turație variabilă. In: Brown Boveri Mitteilungen, Elveția, 56, nr.2, 1969, p.72-78.
195. ROUMEGOUS, A. ș.a. Couplementre à transfert magnétique. In: Electronique industrielles, nr.111, mar.1968, p.97-102.
196. RÜDENBERG, R. Fenomene tranzitorii în sistemele electroenergetice. (trad.din l.engleză). Ed.Tehnică, București, 1959.
197. SACHELARIE, T. ș.a. Proiectarea instalațiilor de automatizare pentru marile grupuri energetice. In: FEA Automatica și electronica, 19, 1975, nr.1, p.12.
198. SAND, M. Mașini electrice speciale, vol.I. Ed.Didactică și Pedagogică, București, 1963.
199. SAVANT, I.C. Calculul sistemelor automate (trad.din l.engleză). Ed.Tehnică, București, 1967.
200. SCHLIEPHAKE, G., WIEGAND, A. Gleichstromantriebe mit Thyristorstromrichtern. In: AEG - Mitteilungen, 56, nr.6, 1966.

201. SCHWARZ, M. A new Laboratory for studying flow and thermal Problems in Electrical Machines. In: Brown Boveri, vol.55, nr.10-11, oct.1968, p.631-639.
202. SCHRAGE, H.H. Scherbius Control Set for use in Testing Asynchronous Machines. In: Brown Boveri, vol.55, nr. 10-11, oct.1968, p.672-673.
203. SCHÄCHTER, S., CRACIUNOIU, V., CHIRIAC, A. Sisteme de reglare automată unificate. Ed. Tehnică, București, 1963.
204. SCHUISKY, W. Inductions Maschinen. Wien, Springer Verlag, 1957.
205. SCHRÖDER, D. Die dynamischen Eigenschaften von Stromrichterstellgliedern mit natürlicher Kommutierung. In: Elektr. Techn. Zeitschrift A 91, 4, 1970, p.242-243.
206. SCHÖNFELD, R., KRUG, H. Stand und Entwicklungstendenzen von Gleichstromstellantriebe. In: Elektrie, 28, ca- iet 1, 1974, p.49.
207. SCHAUER, W. Stand und Entwicklungstendenzen von kranan- tricben zur Erhöhuugn der Effektivität im Umschlag- prozess. In: Elektrie, 28, caiet nr.1, 1974, p.47.
208. SCHAEFER, I. The Rectifier Design. John Wiley and Sons, New-York, 1967.
209. SEBASTIAN, L. Utilajul electromecanic al întreprinderi- lor industriale. EDP, București, 1965.
210. SEBASTIAN, L. Automatica. Ed.Tehnică, București, 1974.
211. SEDLAK, H. Asupra predeterminării încălzirii la mașinile electrice. In: Elin-Zeitschrift, Austria, nr.1, 23, 1971, p.17-19.
212. SEGAL, H. ș.a. Mașini de ridicat și transportat. Ed.Teh- nică, București, 1960.
213. SERACIN, E. Utilajul electromecanic al întreprinderilor industriale. Ed.Didactică și Pedagogică, București, 1973.
214. SERACIN, E., GUDUMAC, M. Considerații privind stabilirea datelor motoarelor de acționare a instalații de ri- dicat și transportat. Comunicare prezentată la a III-a Conferință a Electricienilor, București, sept. 1972.

215. SIMONYI, K. Electrotehnică teoretică. Ed. Tehnică, București, 1974.
216. SÎROMEATNIKOV, I.A. Regimurile de funcționare ale motoarelor asincrone (trad. din l. rusă). Ed. Tehnică, București, 1952.
217. SHINSKEY, G.F. Practica sistemelor de reglare automată (trad. din l. engleză). Ed. Tehnică, București, 1969.
218. SKOBELEV, E.V. Dvigateli pulsiruiuşcevo toka. Energhia, 1968.
219. SOLODOVNIKOV, V.V. ș.a. Reglatoare automate și sisteme de urmărire (trad. din l. rusă). Ed. Tehnică, București, 1965.
220. SPIVACOVSKI, O.A., RUDENCO, F.N. Mașini de ridicat și transportat (trad. din l. rusă). Ed. Tehnică, București, 1953.
221. SPIESS, G., RUFLI, A. Starting Arrangements of Electric Drives with mechanical Holding Brakes. Brevet SUA 3.244.957.
222. SOFAN, E. ș.a. Procedeu, dispozitiv și instalație pentru pornirea în sarcină a motoarelor electrice la platforma de încercare. Brevet RSR, nr. 53125, 1970.
223. SOFAN, E. Stand de probă pentru motoare de ascensor și de macara cu pornire în sarcină și modelarea regimului de exploatare. Brevet RSR, nr. 53176, 1970.
224. SORA, I. Determinarea pe cale experimentală a caracteristicii cuplului la motoarele asincrone cu rotorul în scurtcircuit. In: Electrotehnica, V, nr. 12, 1957.
225. SORA, I. Contribuții privind etalonarea oscilogramelor obținute la ridicarea experimentală a caracteristicii cuplului la motoarele asincrone cu rotorul în scurtcircuit. In: Electrotehnica, nr. 4, 1958, p. 138.
226. x x x STAS 8028-67. Sisteme de reglare automată pentru tehnica curenților tari. Ed. 1975.
227. x x x Studiul comportării motoarelor pentru acționarea macaralelor în diferite condiții de lucru și mediu. Raport tehnic, arhiva IMEB, București, 1963.
228. SUISKII, P.A. Cercetarea încălzirii motoarelor asincrone în scurtcircuit din seriile A și AO cu putere de 0,6...100 kW în regim de funcționare intermitentă. In: Elektricestvo, nr. 12, dec. 1958, p. 44-48.

229. SUISKII, P.A., BUDNIKOV, W. Determinarea numărului admisibil de cercetări pe oră al motoarelor asincrone în scurtcircuit. In: Vestnik Elektropromîşlenosti, nr.2, 1959.
230. TANHAÜSER, R. Geregelte Gleichstromantriebe für Krananlagen. In: Siemens Zeitschrift, 40, nr.7, 1966.
231. TARRANT, D., WOODFORD, R. New A.E.J. Test Plant for Motors. In: Electr.engineering (Australia): Vol.45, nr.4, apr. 1968, p.21-25.
232. THALER, G., WILCOX, M. Electric Machines. John Wiley and Sons, New-York, 1966.
233. TIMOTIN, A., HORTOPAN, V. Lecții de Bazele electrotehnicii. Ed.Didactică și Pedagogică, Vol.I și II, București, 1962.
234. TEDORORESCU, D. Sisteme automate. Ed.Facla, București, 1974.
235. TOPA, I. Arbore electric cu recuperarea electromagnetică a energiei de alunecare. In: Electrotehnica, 21, nr.11, 1973, p.435.
236. TRUFANOV, C.A. Incercarea motoarelor asincrone pentru macarale pe bandă ralantă. In: Vestnik Elektropromîşlenosti, 31, nr.3, mar.1960, p.34-38.
237. TRUXAL, G.I. Control Engineers Haudbook. M.C.Graw Hill, New-York, 1958.
238. TUNSOIU, GH. Acționări și automatizări electrice. Ed.Didactică și Pedagogică, București, 1968.
239. TURCU, I., RUSU, H. Contribuții la pornirea cu accelerație controlată a motorului electric asincron. In: Electrotehnica, 21, nr.4, 1973, p.141.
240. UHLMAN, Y. Die Anwendungen kontakloser Steuerungen in der Antriebstechnik. In: Elektro - Welt, 6, nr.9,11, 1961.
241. VAZDAUTEANU, V., SERACIN, E., BOGOEVICI, N. Utilajul electromecanic al întreprinderilor industriale. Ed.Didactică și Pedagogică, București, 1961.
242. VLASOVA, D. ș.a. Elektromaşinaia tormoznaia ustanovka dlia issledovateliskih rabot. In: U.B.Y.Z. Elektromehanika, nr.3, 1963.
243. VILCOVICI, V., BALAN, ST., VOINEA, R. Mecanica teoretică. Ed.Tehnică, București, 1963.

244. VESENEVSKI, B. Caracteristicile motoarelor utilizate în acționări electrice (trad.din l.rusă). Ed.Tehnică, București, 1969.
245. VOGEL, L., WIEGAND, A..Thyristor-Stromrichter für Industrieantriebe. In: AEG-Mitteilungen, 56, nr.2, 1966, p.98.
246. WASSERAB, T. Über der energetischen wirkungsgrand von elektrischen Antrieben. In: Elektrotechnik und Maschinenbau, 89, 17, 1972, p.275-283.
247. WEH, H., MEYER, I. Die direkte Berechnung von Strom und Drehmoment bei Asynchronmaschinen. In: ETZ-A, 87, caiet 14, 1966, p.504.
248. WEINRICH, G. VĂRZARU, E. ș.a. Sisteme de reglare unificate pentru procese rapide, vol.I și II, Ed.Tehnică, București, 1970.
249. WESSELAK, F. Der Antrieb von Kolbenverdichtern mit stromrichtergespeisten Gleichstromotoren. In: Siemens Zeitschrif, caiet 5, mai 1961, p.344.
250. WESTINGHOUSE. Silicon Controlled Rectifier Designers Handbook, ed.II, SUA, 1970.
251. WHITE, D.C., WOODSON, H.H. Electromechanical Energy Conversion, John Wiley, New-York, 1959.
252. ZILBERMAN, B.E. Modelizarea acționărilor electrice. Ed. Tehnică, București, 1963.

INDEX PE AUTORI

	<u>pag.</u>
1. Abraham, L.	75
2. Acosta, O.	164
3. Alecu-Călușită, M.	3,121,123
4. Anastasiu, S.	131
5. Apetrei, C.	167
6. Arbib, M.A.	90
7. Arhip, M.	63
8. Avramescu, A.	43
9. Babuția, I.	28,33-36,38,42,53,55
10. Balaban, G.	116,117
11. Balaci, I.	28,51
12. Bălan, St.	143
13. Bălă, C.V.	58,90,91
14. Băltesanu, St.	34
15. Bänder, F.	75
16. Bartzler, S.	14,17
17. Bederke, H.I.	90
18. Bejan, I.	116,117
19. Bedford, B.D.	9,66
20. Belea, C.	117,141
21. Bergman, I.	28,36
22. Bernhard, H.I.	89,90,98
23. Besekerski, V.A.	97
24. Bitang, Al.	166
25. Bivol, I.	63,89
26. Boboc, St.	143
27. Bogoevici, N.	7,11,16,36,60,61,90,91
28. Boțan, V.N.	7-9,12,16,17,19,61,90,91, 137
29. Brașovan, M.	8,9,11,16,17,28,51,53,60, 61,90,91,110
30. Budnikov, W	2,28
31. Burcea T.	63
32. Călin, S.	117,141
33. Caussin, C.	83
34. Chauprade, R.	85
35. Checiulescu, M.	3
36. Chen, Y.M.	65
37. Ciofu, Val.	28
38. Chiriac, A.	143
39. Constantinescu, L.	28
40. Cordier, I.P.	147
41. Corlățeanu, V.	28,36,147
42. Cramariuc, R.	143
43. Crăciunoiu, V.	7,143
44. Crede, Ch.	62
45. Damsker, D.	11,16-18,63,89,90,116
46. Davis, E.	163
47. Decaulne, P.	105
48. Derksen, I.	83
49. Diaconescu, M.	2,28,63
50. Dordea, T.	27,28,58,90,91
51. Dörr, N.	14,20,21,28

	<u>pag.</u>
52. Drakensjö, I.	143
53. Drăgănescu, O.	2, 28, 63
54. Draper, A.	58, 90
55. Drouin, G.	41
56. Epuran, M.	167
57. Ernest, H.	7
58. Falb, P.L.	90
59. Feinberg, R.	65
60. Felea, I.	141, 143
61. Firago, I.B.	79
62. Fong, V.	2, 28, 63, 143
63. Föllinger, O.	63, 90, 116
64. Fransua, Al.	9, 12, 16, 17, 36, 44, 47, 51, 58, 61, 90, 91, 101, 168
65. Gallay, M.	138
66. Garabet, T.	63, 89
67. Gavrilesco, C.	28, 147
68. Geyger, W.	53
69. Gheorghiu, I.S.	9, 17, 28, 34-36, 47, 51, 58, 61, 90, 91, 92, 98, 101
70. Gheorghe, V.	123
71. Gibson, E.I.	105
72. Gibier, N.	2, 28
73. Gille, G.I.	105
74. Gîrlașu, St.	79
75. Göbel, H.	147
76. Gliga, St.	166
77. Grosu, St.	3
78. Gudumac, M.	3, 11, 13, 14, 28, 29, 32, 35, 47, 50, 51, 55, 57, 63, 66, 74, 79, 115, 137, 141, 144, 147, 148, 151, 162, 163, 166, 168, 170
79. Hannakam, L.	144
80. Harris, C.	62
81. Hângănuț, M.	117
82. Helmuth, E.	7
83. Hengsberger, J.	138
84. Heck, R.	147
85. Herescu, R.	3
86. Herlet, A.	138
87. Hoft, R.C.	8, 66
88. Hortopan, Gh.	137
89. Hortopan, V.	80
90. Hölter, R.	75
91. Ivan, C.	3, 13, 151
92. Jerve, K.G.	2, 28, 36, 55
93. Jevons, M.	58, 90
94. Kalman, R.E.	90
95. Karsa, B.	143
96. Kelemen, A.	11, 16, 61, 63, 67, 79, 82, 85, 90, 91
97. King, G.K.	83
98. Klatte, G.	140
99. Knuppertz, B.	89, 90, 98
100. Koppe, H.	143
101. Koppelman, F.	75

	<u>pag.</u>	
102. Korn, A.C.	57	.
103. Kostenko, M.	58,90,92,93	.
104. Krung, H.	28	.
105. Kuo, C.B.	89	.
106. Kummel, F.	16,90	.
107. Larkamp, H.	28	.
108. Lavi, A.	147	.
109. Lăzăroiu, D.F.	35,94	.
110. Leonhard, A.	16,90	.
111. Leonhard, W.	89	.
112. Lym, I.	147	.
113. Maurer, F.	67,79	.
114. Măgureanu, R.	74	.
115. Manfred, M.	65	.
116. Meerov, V.M.	90	.
117. Meyer, I.	17	.
118. Meyer, M.	65,147	.
119. Meyer, R.	163	.
120. Micu, D.	3,13,14,28,47	.
121. Mikulaschek, F.	83	.
122. Moraru A.	41,105	.
123. Morozov, P.D.	16,90,114,116	.
124. Möltgen, G.	63,65-67,79	.
125. Murgu, Z.	90	.
126. Nedelcu, V.	11	.
127. Negru, G.	63,89	.
128. Nicolaide, A.	58,90	.
129. Nicolescu, E.	11	.
130. Novac, I.	90	.
131. Nürnberg, V.	2,28	.
132. Oppelt, W.	116	.
133. Oprendeck, B.	28,33,34-38,42,53,55,90, 162	.
134. Ostermann, H.	147	.
135. Otto, H.	75	.
136. Papadache, I.	96-98,116	.
137. Pasere, E.	3	.
138. Pavlašek, F.	2,28,42,55,63,79,83,	.
139. Pelegrin, M.	105,107,143	.
140. Petrescu, V.	143	.
141. Pimenov, B.	138	.
142. Piotrovski, L.	58,90,92,93.	.
143. Plançon, M.M.	63,65,68,83	.
144. Plaza, A.M.	63,65,68,83	.
145. Polge, I.R.	147	.
146. Poltev, V.K.	7,11,147	.
147. Posse, B.A.	138	.
148. Quandri, G.	147	.
149. Rabinovici, A.R.	11	.
150. Rabl, H.	75	.
151. Răduleț, R.	90,91,95	.
152. Răduț, R.C.	11	.
153. Răulescu, I.	28,57	.
154. Reichmann, H.	79	.
155. Richter, R.	42,58,90	.
156. Rioux, C.	90	.

	<u>pag.</u>
157. Rosemayr, D.	147
158. Roumegous, A.	143
159. Rudenco, F.N.	7,62
160. Rűdenberg, R.	90
161. Rufli, A.	28,63
162. Rusu, H.	147
163. Saal, C.	12,17
164. Sachelarie, T.	164
165. Sand, M.	90,91,94-97,101
166. Savant, I.C.	123
167. Schliephake, G.	138
168. Schwarz, M.	28
169. Schrage, H.H.	2,28
170. Schächter, S.	143
171. Schuisky, W.	9
172. Schröder, D.	75
173. Schönfeld, R.	28
174. Schauer, W.	28
175. Schaefer, I.	63,66,67
176. Sebastian, L.	16,114,116
177. Sedlak, St.	19,28
178. Segal, H.	7,28
179. Seracin, E.	3,7-9,11,16,17,19,23,25-29, 51,55,60,61,90,91
180. Shinsky, G.F.	90
181. Simonyi, K.	80,95
182. Spiess, G.	28,63
183. Sîromeatnikov, I.A.	13
184. Skobelev, C.	89
185. Sleicher, S.	3
186. Smolnikov, P.	7,11,147
187. Sofan, I.	28,51,63
188. Solodovnikov, V.V.	103
189. Sora, I.	28,51,162
190. Spivacovschi, O.A.	7,62
191. Strunze, M.	147
192. Suiskii, P.A.	2,28,79
193. Tatu, Gh.	167
194. Tarrant, D.	28
195. Tănăsescu, Fl.T.	143
196. Thaler, G.	89-91,107,116
197. Timotin, A.	80
198. Teodorescu, D.	44,47,58,90
199. Trifu, Gh.	90
200. Trifa, V.	11,16,61,91
201. Truxal, G.F.	19,90,116
202. Trufanov, C.A.	2,28
203. Tunsoiu, Gh.	16,90
204. Turcu, I.	147
205. Topa, I.	12,17
206. Uhlman, I.	58
207. Vărzaru, E.	63,90,137,141
208. Văzdăuțeanu, V.	7
209. Vlasova, D.	41
210. Vîlcovici, V.	143

	<u>pag.</u>
211. Vešenevski, B.	90
212. Vogel, L.	67
213. Voinea, R.	143
214. Wasserab, T.	67
215. Weh, H.	17
216. Weinrich, G.	63, 90, 137, 141, 166
217. Wesselak, F.	79
218. White, D.C.	90
219. Weigand, A.	138
220. Wilcox, M.	89-91, 107, 116
221. Woodford, R.	28
222. Woodson, H.H.	90
223. Zilbermann, B.E.	2, 94

CALCULUL SI ALEGEREA PRINCIPALELOR ELEMENTE
FOLOSITE IN CADRUL INSTALATIEI DE INCERCARE I-ME.
(breviar)

A. ALEGEREA MASINII DE CURENT CONTINUU.

1. Mașina de c.c. folosită ca generator de frînare, trebuie să permită măsurarea cuplului maxim M_{\max} , respectiv a puterii maxime P_{\max} , dezvoltată de M.E. de încercat, conform relațiilor:

$$M_{\max} = \lambda M_N \text{ și } P_{\max} = \lambda P_N \quad (\text{I-1})$$

Deoarece pentru intervale scurte mașina de c.c. poate fi supraîncărcată de 1,5 ori, rezultă că în cazul $\lambda = 3$, puterea pentru mașina de c.c. va fi:

$$P_{\text{m.c.c.}} = 2 k_i P_{N1} \quad (\text{I-2})$$

în care:

P_{N1} - puterea nominală a mașinii de încercat;
 $k_1 = 1,05 + 1,1$ - coeficient care ține seama de încălzirile suplimentare produse de armonicile de curent.

Dacă $P_{N1} = 13 \text{ kW}$, rezultă:

$$P_{\text{m.c.c.}} = 1,1 \times 2 \times 13 = 27 \text{ kW} \quad (\text{I-3})$$

Pentru M.E. de 23 kW se obține:

$$P_{\text{m.c.c.}} = 1,1 \times 2 \times 23 = 50 \text{ kW} \quad (\text{I-3a})$$

Deasemeni, pentru M.E. cu puteri pînă la 60 kW:

$$P_{\text{m.c.c.}} = 1,1 \times 2 \times 60 = 132 \text{ kW} \quad (\text{I-3b})$$

2. Caracteristicile principale ale mașinii de c.c. existentă la platforma de încercări a Intreprinderii de Mașini Electrice București sînt:

$$P_N = 27 \text{ kW}; U_N = 220 \text{ V}; i_{AN} = 140 \text{ A}; GD^2 = 3 \text{ kgf m}^2$$

$$\Omega_N = 104,6 \text{ rad/s}; n = 950 \text{ rot/min.}$$

B. DIMENSIONAREA ELEMENTELOR MUTATORULUI STATIC.

1. Tensiunea mutatorului:

$$U_{di} = U_N + R_B i_L + R_a (i_L - i_A) + 2 \Delta U_a \quad (\text{I-4})$$

unde:

$$\text{- curentul limită: } i_L = 1,8 i_A = 252 \text{ A.}$$

Rezistența bobinei $R_B = \frac{10}{252} = 0,0396 \Omega$, în care s-a considerat $U_B = 10 \text{ V}$, căderea de tensiune în bobina de filtrare.

Rezistența rotorică (inclusiv rezistența de contact a periilor și rezistența cablului) va fi [248] :

$$R_a = 0,065 \frac{U_N}{i_A} = 0,065 \frac{220}{140} = 0,102 \Omega \quad (\text{I-5})$$

Căderea de tensiune în tiristoare (conform catalog AEG ed.70) va fi: $\Delta U_A = 1,5 \text{ V}$.

În consecință, înlocuind în relația I-4 cu valorile sale numerice, se obține pentru tensiunea mutatorului:

$$U_{di} = 220 + 10 + 3 + 11,4 = 244,4 \text{ V.} \quad (\text{I-6})$$

2. Tensiunea în secundarul transformatorului de adaptare:

$$U_s = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} U_{di} \frac{1}{0,85} = 213 \text{ V.} \quad (\text{I-7})$$

În acest caz s-a avut în vedere și funcționarea mutatorului în regim de invertor.

3. Valoarea efectivă a curentului din secundar (considerînd pulsul de curent ca fiind dreptunghiular):

$$i_s = i_A \sqrt{\frac{2}{3}} = 114,2 \text{ A} \quad (\text{I-8})$$

4. Puterea nominală a transformatorului:

$$P_{NT} = \frac{U_{sN} i_{sN} \sqrt{3}}{\eta \cos \varnothing} = 58,4 \text{ kVA.} \quad (\text{I-9})$$

S-a adoptat $P_{NT} = 60 \text{ kVA.}$

5. Inductivitatea de scurtcircuit a transformatorului pe o fază:

$$L_{kf} = \frac{U_k \frac{U_s}{\sqrt{3}}}{100 \cdot 2\pi \cdot f \cdot i_s} = \frac{5 \cdot 220 / \sqrt{3}}{100 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 114,2} \quad (\text{I-10})$$

Deoarece în circuitul rotoric intervine permanent inductivitatea a două faze înseriate rezultă:

$$L_k = 2 L_{kf} = 3,52 \text{ mH} \quad (\text{I-10a})$$

6. Rezistența transformatorului (raportată la secundar) va fi:

$$R_{kf} = 0,1 \frac{U_2 / \sqrt{3}}{I_2} \frac{U_k}{100} = 0,1 \frac{220 / \sqrt{3} \cdot 5}{114,2} = 5,52 \text{ m}\Omega \quad (\text{I-11})$$

unde: $U_{ko\%} = 0,1 U_{k\%}$.

În circuitul rotoric intervine permanent rezistența a două faze:

$$R_k = 2 R_{kf} = 11,1 \text{ m}\Omega \quad (\text{I-12})$$

7. Curentul efectiv din primarul transformatorului este:

$$i_{1s} = i_{sN} \frac{1}{k} = 114,2 \frac{220}{380} = 66 \text{ A} \quad (\text{I-13})$$

sau:

$$i_{1L} = i_{1s} \frac{i_L}{i_N} = 66 \cdot 1,8 = 119 \text{ A} \quad (\text{I-14})$$

./.

C. ALEGEREA TIRISTOARELOR. [161]

8. Tensiunea de vîrf la care va fi solicitat tiristorul din cadrul mutatorului static comandat va fi:

$$U_{inv} = \sqrt{2} U_{2N} = 1,045 \sqrt{2} \cdot 220 = 325 \text{ V} \quad (\text{I-15})$$

9. Valoarea medie a curentului pe un tiristor va fi:

$$i_m = \frac{i_{di}}{3} = \frac{140}{3} = 46,7 \text{ A} \quad (\text{I-16})$$

iar la trecerea curentului limită:

$$i_{mL} = i_m \frac{i_L}{i_N} = 46,7 \cdot 1,8 = 84 \text{ A} \quad (\text{I-17})$$

10. Valoarea efectivă a curentului pe un tiristor:

$$i_{ef} = \frac{i_{di}}{3} = \frac{140}{3} = 81 \text{ A} \quad (\text{I-18})$$

Curentul efectiv limită va fi:

$$i_{efL} = 2 \times 81 = 162 \text{ A} \quad (\text{I-19})$$

11. Coeficientul de siguranță:

$$c_u = \frac{U_{inv.max}}{U_{inv.}} = 2,25 \quad (\text{I-20})$$

Din cataloage s-au ales tiristoare AEG tip T 170F/700 cu răcire forțată și siguranțe ultrarapide corespunzătoare tip AEG cu $200 A_{ef}$; $1000 V_{max}$.

Deconectarea și limitarea curentului se realizează la $2,5 i_N = 350 \text{ A}$.

Releele termice pentru protecție la supracurenți de durată, sînt reglate la un curent de 74 A .

12. Pentru limitarea valorilor periculoase $\left(\frac{di}{dt}\right)$ s-au prevăzut în serie cu fiecare tiristoare bobine fără miez cu $L = 10 \mu\text{H}$.

D. CALCULUL BUCLEI DE REGLARE A CUPLULUI.

13. Inductivitatea circuitului rotoric se poate calcula cu aproximație relația empirică (considerînd că mașina de c.c. are înfășurare de compensație):

$$L_{AA} = \frac{\beta U_N}{i_{NP} \Omega_N} = \frac{0,25 \cdot 220}{140 \cdot 2 \cdot 104,6} = 0,00187 \text{H} = 1,87 \text{ mH} \quad (\text{I-21})$$

14. Inductivitatea bobinei de filtrare.

Bobina se dimensionează astfel încît componenta alternativă a curentului din circuitul de c.c., dată de componentele alternative ale mutatorului, funcționînd în regim de redresor, respectiv invertor, să nu depășească un anumit procent dat.

Prima armonică de frecvență $6f = 300 \text{ Hz}$ a tensiunii invertorului este maximă cînd $\alpha = 90^\circ$.

In acest caz:

$$\sqrt{2} I_6 = \frac{u_6 \sqrt{2}}{2\pi f_6 L_b} \leq I_0 \quad (\text{I-22})$$

unde:

$$I_0 \approx 0,05 I_N = 7 \text{ A} \quad (\text{I-23})$$

și

$$L_b \geq \frac{74,3 \sqrt{2}}{2\pi 300 \cdot 7} = 7,96 \text{ mH} \quad (\text{I-24})$$

unde:

$$U_6 = 0,25 U_{di,max} = 0,25 \cdot 220 \cdot 1,35 = 74,3 \text{ V} \quad (\text{I-25})$$

Rezistența bobinei R_b este egală cu $0,05 \Omega$.

Pentru cazul sistemului mașină de c.c. mutator existent la I.M.E.B. s-a constatat că oscilațiile curentului redresat sînt suficient atenuate de inductivitatea totală a circuitului comun mutator-mașină de c.c., fapt ce a condus la concluzia că se poate renunța la bobina de netezire.

15. Constanta de timp electromagnetică:

$$T_{Ak} = \frac{L_{Ak}}{R_{Ak}} = 18,36 \text{ ms} \quad (\text{I-26})$$

(fără a se lua în considerare bobina de filtrare)

∴

și

$$T_{Ab} = \frac{L_{Ab}}{R_{Ab}} = \frac{10,437}{0,1827} = 57,12 \text{ ms} \quad (I-27)$$

(cu considerarea bobinei de filtrare),

unde:

$$L'_{AA} = L_{AA+k_{sp}L_{pAo}} = k_A L_{AA} = 1,1 L_{AA} = 2,09 \text{ mH} \quad (I-28)$$

$$L_{Ak} = L'_{AA} + L_k = 2,09 + 0,3474 = 2,4374 \text{ mH} \quad (I-29)$$

$$L_{Ab} = L_{Ak} + L_b = 2,437 + 8 = 10,437 \text{ mH} \quad (I-30)$$

Rezistența totală din circuitul de c.c. va fi:

$$R_{Ak} = R_a + R_k = 0,10 + 0,03273 = 0,13273 \Omega \quad (I-31)$$

în care:

$$R_a = R_{AA} + R_{cp} + R_{cb} = 0,0689 + 0,0314 = 0,10 \Omega \quad (I-32)$$

R_{cp} - rezistența de contact a periiilor, este apreciată la 1% ($\Delta U_p = 2,2 \text{ V}$) și

R_{cb} - rezistența cablului, de asemenea la 1%.

16. Constanta de timp electromecanică a sarcinii:

$$T_m = \frac{J_{TM}}{F} = \frac{0,75}{3,09} \simeq 242 \text{ ms} \quad (I-33)$$

în care:

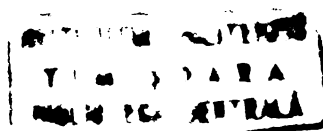
$$J_{TM} = J_m \times (F.I.) \quad (I-34)$$

(de exemplu pentru M.E. asincrone cu inele din fabricația întreprinderii Mașini Electrice București, tip AIM - 160 M - 6; 7,5 kW; 1000 rot/min. și $J_m = 0,15 \cdot \text{Nms}^2$).

iar,

$$F = F_0 + F_{cs} = 0,147 + 2,943 = 3,09 [\text{Nms/rad.}] \quad (I-35)$$

./.



în care:

$$F_0 = \frac{U_0 I_0}{\Omega_0^2} = \frac{230 \cdot 7}{104,6^2} = 0,147 \text{ [Nms/rad]} \quad (\text{I-36})$$

De asemenea, coeficientul de frecare vîscoasă, corespunzătoare unui cuplu static constant, în momentul inițial de pornire a M.E. de încercat ($t < 0$) și la $n = 1000$ rot/min.

$$F_{cs} = \frac{U_N I_N}{\Omega_N^2} = \frac{230 \cdot 140}{104,6^2} = 2,943 \text{ [Nms/rad]} \quad (\text{I-37})$$

17. Coeficientul de amplificare (tensiune-cuplu) va fi:

$$K_M = \frac{k_e}{R_A} = \frac{2,11}{0,132} = 15,98 \left[\frac{Vs}{\text{rad}} \right] \quad (\text{I-38})$$

în care:

$$k_e = \frac{U_e}{\Omega} = \frac{220}{104,6} = 2,11 \left[\frac{Vs}{\text{rad}} \right] \quad (\text{I-39})$$

18. Coeficientul de frecare vîscoasă:

$$F' = \frac{k_e^2}{R_A} = \frac{2,11^2}{0,132} = 33,72 \text{ [Nms/rad}^2\text{]} \quad (\text{I-40})$$

19. Calculul coeficientului β_f :

$$\beta_f = \frac{F'}{F} = \frac{33,7}{0,09} = 10,9 \left[\frac{s}{\text{rad}} \right] \quad (\text{I-41})$$

(cu luare în considerare a cuplului static constant)

$$\beta_f = \frac{F'}{F_{cs}} = \frac{33,7}{2,943} = 11,45 \left[\frac{s}{\text{rad}} \right] \quad (\text{I-42})$$

(cu aplicarea perturbației după 1 s)

$$\beta_f = \frac{F'}{F} = \frac{33,7}{0,147} = 229 \left[\frac{s}{\text{rad}} \right] \quad (\text{I-43})$$

(în absența cuplului static constant).

20. Constanta electromecanică efectivă de timp a sistemului mașină de c.c., sarcină (în absența cuplului static

constant) este:

$$T_{em} = \frac{J}{F+F'} = \frac{0,75}{0,147+33,7} = \frac{0,75}{33,847} = 22,2 \text{ ms} \quad (\text{I-44})$$

E. ELEMENTELE F.d.T. A MUTATORULUI.

21. Mutatorul avînd o conexiune în punte trifazată, cu tiristoare, timpul mort statistic va fi:

$$T = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{6} \cdot \frac{1}{50} = 1,67 \text{ ms} \quad (\text{I-45})$$

22. Factorul de amplificare maxim al mutatorului în regim de invertor:

$$K_{PI} = \frac{\pi}{180^\circ} \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_s \sin \alpha = \frac{U_{di} \pi}{180^\circ} = 1,35 \cdot 240 \approx 324 \left[\frac{\text{V}}{\text{rad}} \right] \quad (\text{I-46})$$

23. Factorul de amplificare al D.C.G. (care este un element liniar, neinerțial) este:

$$K_{DCG} = \frac{\pi}{6} = 0,52 \left[\text{rad/V} \right] \quad (\text{I-47})$$

24. Regulatorul de cuplu (de tip P.I.D) are următoarele caracteristici:

- coeficientul de amplificare $K_r = 0,95;$ (I-48)

- constanta de derivare $T_i = 0,21 \text{ s}$ (I-49)

- constanta de integrare $T_d = 0,15 \text{ s}$ și $a=10;$ (I-50)

25. Alegerea traductorului de cuplu.

Traductorul de cuplu are următoarele caracteristici:

$$K_{TC} = 0,023 \text{ mV/Nm} \quad (\text{I-51})$$

(conform prospectului Hottinger),

iar

$$K_{AM} = 0,5 \text{ V/mV} \quad (\text{I-52})$$

26. Constanta de timp a circuitului echivalent va fi:

$$T_1 = 0,1 T_{Ak} = 0,1 \cdot 18,36 = 1,836 \text{ ms} \quad (\text{I-53})$$

$$T'_1 = 6_2 T_1 = 0,36 \text{ ms} \quad (\text{I-54})$$

27. Constanta de timp parazită (introdusă de filtrele din circuitul buclei de reglare, de procesul de comutare automată, inclusiv timpul mort statistic):

$$T_{\Sigma} = 11,67 \text{ ms} \quad (\text{I-55})$$

ANEXA II-a

Convenții de notare și prescurtări folosite în lucrare.

- A.E. - acționare electrică;
- A.M. - amplificator magnetic;
- D.A. - durată relativă de funcționare activă;
- D.C.G. - dispozitiv de comandă pe grilă a tiristoarelor;
- F.d.T. - funcție de transfer;
- I-R.T. - instalație de ridicat și transportat;
- I-M.E. - instalație de încercare a mașinilor electrice destinate acționării instalațiilor de ridicat și transportat (cu modelarea regimurilor reale de exploatare);
- M.E. - mașină electrică^{x)};
- S.A. - sistem de reglare automată;
- t.e.m. - tensiune electromotoare;
- t.m.m. - tensiune magnetomotoare;
- c.c. - curent continuu;
- c.a. - curent alternativ;
- ct. - constant;
- fig. - figură.

^{x)} În sensul celor recomandate în lucrarea [30]

PRINCIPALELE NOTATII FOLOSITE IN TEXT.^{x)}

- a - număr de căi de curent;
- α - unghi de comandă;
- $\beta_N, \beta_P, \beta_F, \beta_R$ - coeficienți subunitari ce țin cont de eficiența scăzută a răcirii M.E. (la turații mici în regim staționar), la pornire, frînare și repaus (indicii P, N, F și R corespunzând acestor regimuri);
- $\cos \varphi$ - factor de putere;
- u_e - t.e.m. indusă;
- η - randament;
- $\Psi_e, \Psi_A, \Psi_{eA}$ - fluxul total de excitație, fluxul transversal și fluxul total util, care pătrunde în rotor);
- ϕ_k - fluxul polilor auxiliari;
- ϕ - fluxul util;
- f - frecvența curentului alternativ;
- u - unghi de suprapunere (anodică);
- h - număr de conectări pe oră (frecvența de conectare);
- i_e, i_A - curentul de excitație, respectivul curentul absorbit (în rotor);
- I_1 - curent statoric la M.E. asincrone;
- I_2 - curent rotoric la M.E. asincrone cu inele;
- i_p - factor de multiplicitate a curentului statoric;
- i_d - curent redresat;
- J_{tM} - moment de inerție total al ansamblului motor-generator (inclusiv a dispozitivelor anexe montate pe același arbore);
- k - constante de proporționalitate;
- k_g - raportul dintre curentul unei M.E. la funcționarea cu viteza de regim și curentul nominal;
- λ - coeficient de suprasarcină a M.E. asincrone;
- M_p, M_K, M_N - cuplul de pornire, maxim admis, respectiv nominal;
- m, m_R, m_j, m_o - cuplul electromagnetic, cuplu rezistent la arborele mașinii de c.c., cuplu dinamic, respectiv, cuplul datorat pierderilor de mers în gol;
- m_{Fe}, m_H, m_T - cuplul datorat pierderilor în fier, prin histeresis, respectiv datorită efectului curenților turbionari;

x) Unele notații mai puțin frecvent folosite în lucrare sînt explicitate în text.

- m - număr de faze;
- N - număr de conductoare la periferia rotorului;
- n - turație (rot/min.);
- Ω - viteza unghiulară (rad/s);
- p - număr de perechi de poli;
- p' , p'' - număr de perechi de poli corespunzătoare turației mari, respectiv corespunzătoare turației mici;
- P_N - putere nominală;
- P_S - putere în regim staționar;
- P_u - putere utilă (kW);
- Q_{1p} , Q_{1N} , Q_{1F} , Q_{2N} , Q_{2F} - pierderile (sau cantitățile de căldură) degajate în perioadele indicate prin indicii P, N, F (stator 1, rotor 2);
- R_e , R_A - rezistența înfășurării de excitație, respectiv a circuitului indusului;
- Λ - permeanța circuitului magnetic;
- s - alunecare;
- s - variabilă complexă;
- t_a , t_c , t_N , t_p , t_F , t_R - durata activă, durata unui ciclu, respectiv duratele corespunzătoare regimului staționar, de pornire, repaus și frînare;
- θ_a - temperatura mediului ambiant;
- ϑ_N - supratemperatura maximă la puterea nominală;
- u_E , u_A - tensiunea la bornele înfășurării de excitație, respectiv la bornele înfășurării rotorului (u_A reprezentînd tensiunea sursei de alimentare a mașinii de c.c. la funcționarea acesteia în regim de motor);
- $U_{di\alpha}$ - tensiunea redresată corespunzătoare unghiului de comandă α ;
- U_{di} - tensiunea redresată (necomandată);
- u_c - tensiunea de comandă;
- u_{cmax} - tensiunea de comandă maximă;
- X_c - reactanța de comutație;

NOTA:

O paranteză pătrată în cursul textului indică o referință bibliografică.

S-a utilizat sistemul de unități S.I.

Cu litera mică s-au notat valorile instantanee, cu literă mare valorile medii sau efective maxime.

STRUCTURA LUCRARII

Lucrarea este structurată în opt capitole:

Nr. crt.	Denumirea	Text pag.	Tabele	Figuri	Fotografii	Ref.bibliografice
1.	Cap. I	6	-	-	-	52
2.	Cap. II	19	3	3	-	57
3.	Cap. III	22	-	9	-	55
4.	Cap. IV	23	1	14	-	69
5.	Cap. V	27	-	2	-	60
6.	Cap. VI	8	6	11	-	17
7.	Cap. VII	17	4	9	14	36
8.	Cap. VIII	4	-	-	-	4
9.	Rezumate	4	-	-	-	-
10.	Bibliografie	19	-	-	-	-
11.	Index pe autori	5	-	-	-	-
12.	Anexa I	6	-	-	-	4
13.	Anexa II-a	1	-	-	-	-
14.	Anexa II-b	2	-	-	-	-
15.	Anexa II-c	1	-	-	-	-
16.	Cuprins	4	-	-	-	-
Total :		168	14	48	14	-

C U P R I N S

pag.

CAPITOLUL I.

Introducere 1

CAPITOLUL II.

Aspecte specifice privind mașinile electrice de acționare a instalațiilor de ridicat și transportat.

2.1. Generalități 7

2.2. Sisteme de acționare electrică specifice instalațiilor de ridicat și transportat 8

2.3. Mașinile electrice destinate acționării instalațiilor de ridicat și transportat 10

2.4. Probleme privind alegerea datelor tehnice pentru mașinile electrice de acționare destinate instalațiilor de ridicat și transportat 14

2.5. Concluzii 26.

CAPITOLUL III.

Metode de determinare experimentală a parametrilor mașinilor electrice pentru instalațiile de ridicat și transportat.

3.1. Generalități 28

3.2. Clasificarea metodelor de încercare a mașinilor electrice pentru instalațiile de ridicat și transportat 29

3.3. Expunere succintă a principalelor metode de încercare cunoscute 30.

3.3.1. Metode de frînare mecanice 30

3.3.2. Metode de frînare electrice 34.

3.3.3. Metode de frînare electrice destinate încercării mașinilor electrice pentru acționarea instalațiilor de ridicat și transportat 44

3.4. Concluzii 54

CAPITOLUL IV.

Metodă și instalație de încercare a mașinilor electrice destinate acționării instalațiilor de ridicat și transportat .

4.1. Condiții tehnice specifice instalațiilor de încercare a mașinilor electrice destinate acționării instalațiilor de ridicat și transportat	56
4.2. Schema de principiu a instalației de încercare (I-M.E)	57
4.2.1. Funcționarea schemei	57
4.2.2. Considerații avute la elaborarea soluției pentru instalația de încercare	61
4.3. Regimul de funcționare al unui mutator static comandat la alimentarea unei mașini de curent continuu ..	63
4.4. Mutatorul static comandat în regim de invertor (cazul unei punți cu tiristoare)	74
4.5. Funcționarea în mai multe cadrane a unei mașini de curent continuu alimentată de la un mutator static comandat	82
4.6. Concluzii	86

CAPITOLUL V.

Regimul dinamic de funcționare a instalației de încercare.

5.1. Introducere	89
5.2. Considerații teoretice privind regimul dinamic al sistemului mașină de c.c. - mutator static comandat	89
5.2.1. Ecuațiile de funcționare în regim dinamic ale mașinii de c.c. cu excitație separată	89
5.2.2. Ecuațiile complete de funcționare în regim dinamic ale mașinii de c.c.	91
5.2.3. Ecuațiile de funcționare ale mașinii de c.c. în formă operațională	101
5.3. Stabilirea funcției de transfer a sistemului mașină de c.c. - mutator static comandat	105
5.3.1. Considerații generale	105
5.3.2. Funcția de transfer a mașinii de c.c.	107
5.3.3. Funcția de transfer a sistemului mașină de c.c. - mutator din cadrul instalației de încercare (I-M.E)	111
5.4. Concluzii	115

CAPITOLUL VI.

Studiul dinamicii și stabilității sistemului de reglare automată adoptat cu ajutorul calculatorului numeric.

6.1. Considerații generale	116
6.2. Studiul funcției de transfer a sistemului	117
6.3. Acordarea optimă a regulatorului de cuplu	122
6.4. Stabilirea schemei pentru modelare pe calculatorul ICL	123
6.5. Concluzii	131

CAPITOLUL VII.

Aplicații industriale și rezultate experimentale.

7.1. Instalația industrială realizată	137
7.1.1. Funcționarea sistemului mașină de c.c. - mutator în cadrul instalației de încercare (I-M.E)	137
7.1.2. Funcționarea dispozitivului special de blocare mecanică și măsură	142
7.1.3. Funcționarea dispozitivului de programare și comandă	144
7.2. Rezultate experimentale obținute cu instalația de încercare	148
7.3. Rezultate experimentale obținute cu mașinile electrice încercate	150
7.4. Alte posibilități de aplicare a instalației de încercare propusă în lucrare	162
7.4.1. Utilizarea instalației de încercare I-M.E. la ridicarea caracteristicii mecanice cu înregistrare continuă și cu posibilitate de recuperare a energiei în sistem	162
7.4.2. Folosirea instalației I-M.E. la încercarea simultană a mai multor mașini electrice de încercat, inclusiv la verificarea fiabilității acestora ...	162
7.5. Considerații tehnico-economice	164
7.6. Concluzii	165

CAPITOLUL VIII.

Concluzii generale	172
--------------------------	-----

	pag.
Bibliografie	172
Index pe autori	191
Anexa I - Calculul și alegerea principalelor elemente folosite în cadrul instalației de încercare I-M.E. (breviar)	196
Anexa II-a - Convenții de notare și prescurtări folo- site în lucrare	204
Anexa II-b - Principalele notații folosite în text..	205
Anexa II-c - Structura lucrării	207