

INSTITUTUL POLITEHNIC "TRAIAN VUIA" TIMIȘOARA
FACULTATEA DE ELECTROTEHNICĂ

Ing. LIUBA GHEORGHE

PORNIREA MASINII SINCRONE IN REGIM ASINCRON

TEZA DE DOCTORAT

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICĂ"
TIMIȘOARA

Conducător științific,
Prof.dr.ing. TOMA DORDEA

- 1990 -

INSTITUTUL POLITEHNIC TIMIȘOARA	
Veșnic	556409
Data	229 Lit. F

C U P R I N S

pag.:

Introducere.	1
Cap.1. METODE UTILIZATE PENTRU DETERMINAREA CARACTERISTICILOR DE PORNIRE LA MASINA SINCRONA.	6
1.1. Metode directe de determinare a caracteris- ticilor de pornire a mașinilor sincrone	3
1.1.1. Metode ce folosesc regimul staționar	3
1.1.1.a. Metoda frinei	9
1.1.1.b. Metoda generatorului zarat.	10
1.1.2. Metode ce folosesc regimul dinamic.	15
1.1.2.a. Determinarea cuplului prin metoda determinării grafice a accelerației	16
1.1.2.b. Metoda Ytterberg.	18
1.1.2.c. Metoda Petrov.	20
1.1.2.d. Metoda generatorului unipolar de curent continuu.	22
1.1.2.e. Metoda diferențialului magneoelectric	23
1.2. Metode indirecte de determinare a caracteris- ticilor de pornire a motoarelor sincrone. . . .	24
1.2.1. Metoda funcționării în asincron la joasă tensiune.	25
1.2.2. Metoda funcționării în asincron în sarcină.	25
Cap.2. ECUAȚII SI MARIMI CARACTERISTICE PENTRU REGIMUL ASINCRON LA MASINA SINCRONA.	28
2.1. Mașina simetrică în regim nestaționar.	28
2.2. Ecuațiile mașinii sincrone echivalente în mărimi raportate.	32
2.2.1. Ecuațiile mașinii sincrone după axa transversală.	37
2.2.2. Ecuațiile mașinii sincrone după axa longitudinală.	39
2.2.2.a. Infășurarea statorului alimentată și rotorul în gol.	39

2.2.2.b.	Infășurarea de excitație alimentată infășurarea rotorului fiind în gol.	41
2.2.2.c.	Infășurarea statorului alimentată iar infășurarea rotorică în scurtcircuit.	43
2.3.	Ecuatiile mașinii sincrone sub formă operațională.	44
2.3.1.	Ecuatiile operaționale și parametri operaționali după axa transversală.	44
2.3.2.	Ecuatiile operaționale și parametri operaționali după axa longitudinală.	45
2.4.	Caracteristicile de frecvență corespunzătoare reactanțelor operaționale.	49
2.5.	Ecuatiile curenților la pornirea în asincron a mașinii sincrone.	51
2.5.1.	Ecuatiile de bază cu considerarea alunecării constante.	51
2.5.2.	Relații simplificate pentru calculul curenților.	59
2.6.	Cuplul electromagnetic la pornirea în asincron a mașinii sincrone.	59
2.6.1.	Relații de calcul al cuplului asincron pentru mașini de putere mare.	62
2.6.2.	Cuplul asincron la pornirea mașinii sincrone cu rotorul deschis.	64
2.6.3.	Cuplul asincron la pornirea mașinii sincrone cu infășurarea rotorului în scurtcircuit.	66
Cap. III.	METODE DE DETERMINARE A UNOR PARAMETRI ȘI CARACTERIS- TICILOR DE PORNIRE ÎN REGIM ASINCRON.	70
3.1.	Metoda răspunsului tranzitoriu după cele două axe la variația în treaptă a tensiunii de alimentare.	70
3.1.1.	Atenuarea curentului continuu în infășurarea statorică după axa transversală.	70
3.1.2.	Atenuarea curentului continuu în infăș- surarea statorică după axa longitudinală, în- fășurarea de excitație fiind deschis.	76

3.1.3. Atenuarea curentului continuu în înfășurarea rotorică, înfășurarea statorului fiind deschisă.	82
3.1.4. Atenuarea curentului continuu în înfășurarea statorului, înfășurarea de excitație fiind scurtcircuitată.	85
3.2. Determinarea caracteristicilor de pornire în asincron a mașinii sincrone prin metoda alimentării înfășurării statorice de la o sursă cu tensiune alternativă monofazată.	83
3.2.1. Generalități.	88
3.2.2. Stabilirea principalelor relații de calcul.	89
3.2.3. Conectarea monofazată	94
3.2.4. Conectarea bifazată a înfășurării statorului cu două faze înseriate și a treia liberă.	96
3.2.5. Conectarea trifazată a înfășurării statorice la o sursă de tensiune monofazată.	97
Cap. IV. APLICAREA PRACTICĂ A METODELOR DE DETERMINARE A CARACTERISTICILOR DE FORNIRE A MOTOARELOR SINCRONE, REZULTATE EXPERIMENTALE.	101
4.1. Rezultate experimentale obținute prin metoda atenuării unui curent continuu stabilit în înfășurările mașinii sincrone.	101
4.1.1. Determinarea parametrilor după axa transversală din proba de stingere a curentului continuu prin înfășurarea statorică.	102
4.1.2. Determinarea parametrilor după axa longitudinală din proba de atenuare a curentului continuu în înfășurarea statorică cu înfășurarea rotorică deschisă.	108
4.1.3. Determinarea parametrilor după axa longitudinală din proba de atenuare a curentului continuu în înfășurarea rotorică cu înfășurarea statorică deschisă.	114
4.1.4. Determinarea parametrilor după axa longitudinală din proba de atenuare a curentului continuu prin înfășurarea statorului, înfășurarea rotorului fiind scurtcircuitată.	119

4.1.5. Determinarea curentului de pornire în regim asincron pe baza parametrilor determinați din probele de stingere a cîmpului.	128
4.1.6. Determinarea caracteristicii cuplului la pornirea în asincron a mașinii sincrone . . .	129
4.1.6.1. Determinarea componentei asincrone a cuplului la pornirea cu înfășurarea rotorului deschisă.	130
4.1.6.2. Determinarea componentei asincrone a cuplului la pornirea cu înfășurarea rotorului scurtcircuitată.	131
4.2. Rezultate experimentale obținute prin metoda alimentării înfășurării statorului cu o tensiune alternativă monofazată.	135
4.2.1. Determinarea componentei asincrone a cuplului după axa "q" la pornirea în regim asincron cu înfășurarea rotorului deschisă. .	140
4.2.2. Determinarea componentei asincrone a cuplului după axa "d" la pornirea în asincron cu înfășurarea rotorică deschisă.	143
4.2.3. Determinarea componentei asincrone a cuplului după axa "q" la pornirea în asincron cu înfășurarea rotorului scurtcircuitată.	147
4.2.4. Determinarea componentei asincrone a cuplului după axa "d" la pornirea în asincron cu înfășurarea rotorică scurtcircuitată.	148
Cap.V. CONCLUZII.	153
ANEXA.	160
BIBLIOGRAFIE	191

INTRODUCERE

La încercarea mașinilor electrice de putere mare pe ștandul de probă, apar unele dificultăți legate de metode practice de determinare a parametrilor de funcționare a acestor mașini.

În prezent metodele practice de determinare a parametrilor de funcționare a mașinilor electrice pe ștandul de probă al fabricii constructoare se bazează aproape în întregime pe posibilitățile de cuplare a mașinii de încercat cu o mașină de antrenare. Pentru mașinile de putere mică și în special pentru mașini orizontale, o astfel de cuplare nu ridică probleme deosebite și în acest caz pentru astfel de mașini se pot aplica cu succes toate metodele clasice de încercare prevăzute în normele și standardele în vigoare.

În cazul mașinilor de putere mare însă și în special în cazul mașinilor verticale pentru care o cuplare cu o mașină de antrenare este foarte dificilă, aceste metode clasice de încercare nu mai pot fi aplicate.

Acest fapt poate avea drept consecință imposibilitatea efectuării în întregime a programului de încercări, anumiți parametri și caracteristici de funcționare neputând fi determinați experimental.

Astfel pentru mașinile sincrone de putere mare care în condiții obișnuite de detare ale ștandurilor industriale nu pot fi pornite direct de la rețeaua de alimentare și mici nu pot fi cuplate cu o mașină de antrenare, prin metodele clasice prevăzute în normele și standardele în vigoare, nu există posibilitatea determinării caracteristicii curentului și a cuplului în regim sincron în funcție de alunecare.

Cunoașterea acestor caracteristici însă, este absolut obligatorie întrucât de ele depinde în foarte mare măsură buna funcționare a mașinii respective în condițiile reale de exploatare la beneficiar.

În astfel de situații, uneori se recurge la aplicarea unor metode aproximative care pot da anumite informații reduse privind anumiți parametri de funcționare în sincron a mașinii sincrone.

De exemplu, cuplul de pornire și curentul de pornire la tensiune nominală se pot determina din caracteristica în scurt-circuit asincron la tensiune redusă. Valorile nominale ale cuplului și curentului de pornire se pot aproxima prin recalcularea la tensiunea nominală a valorilor obținute la tensiune redusă.

Aplicarea însă a acestor metode aproximative pentru mașini de puteri mari care în cele mai multe cazuri echipază obiective industriale de importanță majoră, pot pune sub semnul întrebării precizia rezultatelor obținute în timpul încercărilor pe ștand.

Aplicarea unor metode corespunzătoare de încercare se impune cu atât mai mult în cazul mașinilor prototip la care prin probele ce se efectuează în cadrul programului de încercări de tip urmează să se verifice performanțele de funcționare prevăzute de proiectant și trecute în caietul de sarcini.

S-au întâlnit în practica industrială și situații în care, datorită unor metode de proiectare neadecvate, să se proiecteze și să se execute practic mașini ai căror parametri de funcționare determinați experimental să nu corespundă cu cei prevăzuți în caietul de sarcini.

În astfel de cazuri, dacă nu există metode corespunzătoare de testare a mașinii pe ștandul de probă, cu determinarea tuturor parametrilor de funcționare, există pericolul ca în urma unor probe sumare pe ștand, asemenea mașini să fie declarate corespunzătoare și să fie expediate pentru montaj la beneficiar.

Performanțele reduse ale acestor mașini vor ieși în evidență abia în momentul punerii lor în funcțiune pe șantier. Aceste neconcordanțe între parametrii proiectați și cei obținuți pe cale experimentală pot conduce la grave prejudicii economice.

Din aceste considerente, se impune ca o consecință majoră faptul că în cadrul ștandurilor de probă pentru mașini de putere mare să se intensifice activitatea de cercetare în vederea punerii la punct a unor noi metode care să poată fi aplicate cu succes pentru orice tip de mașină indiferent de putere și tip constructiv.

Pentru a putea fi emulgată în vederea generalizării aplicării ei în practica încercărilor industriale, orice metodă propusă trebuie să îndeplinească câteva condiții esențiale:

- să asigure o precizie corespunzătoare ;
- să fie posibilă de aplicat în condițiile obișnuite de de-

tare tehnică a unui ștand de probă industrial;

- să permită aplicarea ei pentru orice mașină indiferent de putere și tip constructiv;

- aplicarea practică a metodei să aibă loc în condițiile unui consum minim de manoperă și energie electrică.

Lucrarea de față își propune să prezinte unele direcții de cercetare ale autorului în domeniul încercării mașinilor electrice sincrone de putere mare privind determinarea unor parametri și a caracteristicilor de pornire în regim asincron.

Lucrarea cuprinde 5 capitole. În cap.I sînt prezentate o parte din metodele cunoscute de determinare a caracteristicii cuplului la mașinile electrice în general care se pot aplica și la mașini sincrone în particular.

Pentru fiecare metodă se prezintă pe scurt principiul teoretic cît și modul practic de aplicare, menționindu-se în același timp avantajele și dezavantajele utilizării metodei respective.

Din această succintă prezentare a principalelor metode cunoscute de determinare a caracteristicilor cuplului la mașinile electrice de curent alternativ se desprinde însă ideea că domeniul lor de aplicare în majoritatea cazurilor este restrîns, limitîndu-se doar pentru mașini într-o gamă de puteri reduse care pot fi aplicate pe ștand prin utilizarea unei mașini de antrenare sau pot fi cuplate direct la rețeaua de alimentare.

Pornind de la această idee, în capitolele următoare ale lucrării sînt expuse două metode de determinare a parametrilor de pornire în regim asincron a mașinii sincrone, metode ce se pot aplica pentru orice mașină sincronă indiferent de putere și tip constructiv.

În cap.II al lucrării sînt prezentate ecuațiile mașinii sincrone în teoria celor două axe cu referiri în special la regimul de funcționare în asincron.

Este cunoscut faptul că studiul regimului asincron al mașinii sincrone cînd rotorul se rotește cu o viteză diferită de cea sincronă este foarte complicat.

În cazul general cînd viteza unghiulară a rotorului este variabilă, acest studiu se poate efectua numai prin rezolvarea pe calculator a sistemului de ecuații diferențiale neliniare corespunzătoare funcționării mașinii sincrone în acest caz.

Decă se consideră însă că într-un anumit interval de timp alunecarea rotorului sincron rămîne constantă ecuațiile obținute

forță pentru care studiul poate fi abordat pe cale analitică. Acest studiu permite să se stabilească concluzii cu valabilitate generală și să se determine relațiile corespunzătoare pentru calculul cuplurilor și curenților.

Au fost stabilite astfel relațiile de calcul pentru cele două componente, după axa d și axa q, ale curențului statoric în regim asincron neexcitat în funcție de alunecarea s.

Aceste relații de calcul se simplifică foarte mult în cazul mașinilor sincrone de putere mare la care rezistența ohmică a înfășurării statorice se poate neglija.

Pe baza relației generale de calcul a cuplului se determină expresia cuplului electromagnetic în regim asincron neexcitat punându-se în evidență cele două componente ale sale:

- componenta continuă care reprezintă cuplul mediu asincron;
- componenta pulsatorie.

Cuplul mediu asincron este componenta de bază a cuplului electromagnetic care produce accelerarea rotorului în regim asincron.

În condițiile neglijarii rezistenței ohmice a înfășurării statorice, relația de calcul pentru componenta asincronă a cuplului se simplifică foarte mult.

Sînt luate în considerare două cazuri distincte pentru care se calculează cuplul mediu asincron: înfășurarea rotorică deschisă și înfășurarea rotorică scurtcircuitată.

În cazul în care înfășurarea rotorului este deschisă, cuplul mediu asincron se prezintă ca o sumă de două componente (m_{ad}'' și m_{aq}'') care depind de parametrii coliviei de pornire.

Dacă înfășurarea rotorică este scurtcircuitată, în expresia cuplului asincron, pe lângă cele două componente (m_{ad}'' și m_{aq}'') care depind de parametrii coliviei de amortizare, mai intervine componenta m_{ad}' care depinde de parametrii circuitului de excitație.

În cap. III al lucrării, pe baza relațiilor de calcul obținute în cap. II, sînt prezentate două metode de determinare experimentală a unor parametri, a caracteristicilor cuplului și a curențului în regim asincron pentru o mașină sincronă.

Conform acestor metode, încercările experimentale se efectuează asupra mașinii în stare de repaus fapt ce permite extinderea domeniului de aplicare a metodelor respective pentru orice

mașină sincronă indiferent de putere și tip constructiv.

În cap.IV sînt prezentate rezultatele obținute experimental prin aplicarea practică a metodelor propuse în cap.III la încercarea pe ștandul de probă de la Secția de Mașini Electrice din Întreprinderea constructoare de Mașini Reșița, a unor mașini sincrone de putere mare.

Se prezintă astfel rezultatele obținute la încercarea pe ștand a unui hidrogenerator orizontal de 13 MW destinat pentru echiparea centralelor Balb de pe Olt. Pentru această mașină s-a făcut determinarea experimentală a caracteristicilor cuplului în regim asincron după ambele metode, creîndu-se astfel posibilitatea comparării rezultatelor obținute după cele două metode.

Se remarcă faptul că rezultatele obținute astfel fac posibilă generalizarea aplicării metodelor descrise la încercarea tuturor mașinilor sincrone pe ștandul de probă indiferent de putere și tip constructiv fapt ce conduce la obținerea unor importante economii de manoperă constructivă și de energie electrică.

C A P I T O L U L I

METODE UTILIZATE PENTRU DETERMINAREA CARACTERISTICILOR DE
PORNIRE LA MASINA SINCRONA

Potrivit principiului de funcționare, motorul sincron dezvoltă un cuplu electromagnetic mediu diferit de zero decât la turația sincronă și din acest motiv motorul sincron nu are cuplu de pornire.

În consecință, pentru pornirea sa este nevoie să fie antrenat din exterior până la turația de sincronism și sincronizat cu rețeaua de alimentare. Această metodă însă este complicată și nu se aplică decât la mașinile ce urmeză să funcționeze în regim generator.

În instalațiile industriale, pornirea motorului sincron se realizează prin altă metodă și anume: pornirea în asincron.

În acest scop motorul sincron este prevăzut cu o colivie rotorică calculată ca să asigure un anumit cuplu de pornire.

Barele coliviei sînt plasate în creștături practicate în piesele polare ale rotorului și sînt confecționate din: alamă, bronz, aluminiu sau din alte aliaje cu rezistivități mai ridicate decât ale cuprului.

În unele cazuri, în loc de bare de colivie se utilizează talpi polare masive, care sînt conectate electric între ele prin bare bune conductoare. În aceste talpi masive se induc curenți turbionari atunci cînd cîmpul magnetic învîrtit al statorului are o anumită viteză relativă față de rotor așa cum este cazul la pornire.

Acești curenți turbionari joacă același rol în producerea cuplului asincron ca și curenții induși în barele unei colivii.

Procesul tranzitoriu al pornirii în asincron se desfășoară în două etape. Mai întîi, înfășurarea de excitație a motorului este deconectată de la sursa de alimentare și conectată în tot timpul procesului de accelerare pe o rezistență R_g relativ mare (de zece ori valoarea rezistenței înfășurării de excitație apei înfășurarea trifazată a statorului se conectează direct la

rețea. Sub acțiunea câmpului învîrtitor statoric, apare un cuplu asincron, care dacă depășește cuplul rezistent la arbore, conduce la accelerarea rotorului. În scurt timp rotorul mașinii ajunge la o viteză staționară apropiată de cea de sincronism, alunecarea nedeșășind valoarea de 0,05.

În a doua etapă, înfășurarea de excitație se conectează la sursa de curent continuu.

Odată cu stabilirea curentului de excitație se produce și un cuplu electromagnetic sincron care se suprapune peste cuplul asincron și provoacă împreună o accelerație a rotorului adică o micșorare a alunecării iar în final după cîteva pendulări rapid amortizate să aibă loc rămînerea mașinii în sincronism.

Menținerea, în prima etapă a pornirii, a înfășurării de excitație în stare deschisă nu este de loc indicată, deoarece t.e.m. indusă de câmpul învîrtitor statoric în înfășurarea de excitație poate atinge valori ridicate (3-20 kv) care să constituie un pericol în privința solicitării dielectrice a izolației înfășurării.

Trebuie remarcat faptul că în timpul pornirii directe la rețea a unui motor sincron apar șocuri mari de curent: de 5-9 ori curentul nominal, care pot produce eforturi electrodinamice deosebite în înfășurarea statorică și în mod special la capetele frontale cu repercursiuni grave în cazul motoarelor la care nu s-au luat măsurile necesare pentru consolidarea bobinajului. Curenții mari ce apar în timpul pornirii provoacă în rețeaua de alimentare căderi mari de tensiune, fapt ce duce la scăderea tensiunii de pornire la bornele motorului și în același timp determină prelungirea procesului de pornire cu influențele negative ce decurg din aceasta asupra regimului termic al motorului.

De asemenea procesul de pornire la rețea este însoțit de șocuri importante de cupluri care presupun dimensionarea corespunzătoare a reductorului de viteză.

La proiectarea unui motor sincron se au în vedere toate considerentele de mai sus dar în același timp se urmărește ca pornirea să se facă în condiții sigure, asigurîndu-se o caracteristică de cuplu de pornire capabilă să producă accelerația rotorului în timp util, și o caracteristică de curent de pornire care să nu provoace perturbări în rețeaua de alimentare.

Este deosebit de important ca aceste caracteristici determinate teoretic in faza de proiectare, sa fie verificate experimental pe standul de probă, pentru fiecare mașină prototip înainte ca aceasta să fie trimisă la beneficiar pentru montaj.

Ca urmare, in fabricile constructoare de mașini electrice se dă o atenție deosebită perfecționării metodelor de determinare experimentală a caracteristicilor de pornire a mașinilor sincrone pe standul de probă.

Metodele cunoscute de determinare a acestor caracteristici se pot împărți in două categorii: metode directe și metode indirecte.

1.1. Metode directe de determinare a caracteristicilor de pornire a mașinilor sincrone

Aceste metode se referă la determinarea cuplului de rotație și a curentului in timpul de pornire. Pentru analiza metodelor de determinare a momentului de rotație se apelează la ecuația momentului dezvoltat de o mașină electrică rotativă:

$$M = M_{st} + M_j \quad (1.1)$$

in care: M este cuplul electromagnetic dezvoltat de mașină;
 M_j este cuplul dinamic sau de accelerație ;
 M_{st} este cuplul static rezistent la arbore.

Pe baza relației de mai sus, metodele de determinare a cuplului de rotație se clasifică in două categorii:

- metode ce folosesc regimul staționar bazate pe măsurarea cuplului rezistent M_{st} pentru $M_j=0$;
- metode dinamice bazate pe măsurarea cuplului de accelerație M_j pentru $M_{st}=0$.

1.1.1. Metode ce folosesc regimul staționar:

Aceste metode se caracterizează prin măsurarea cuplului rezistent la arbore in regim staționar, deci pentru fiecare valoare a cuplului de rotație determinat, regimul electromagnetic corespunzător este stabilizat.

Se prezintă in continuare cîteva metode cunoscute de determinare a cuplului de rotație in regim staționar, metode descrise in literatura de specialitate.

1.1.1.a. Metoda frinei [22] [34]

Datorită interacțiunilor electromagnetice ce apar în întrefierul mașinilor electrice rotative, asupra statorului se exercită forțe egale și de sens opus cu cele ce acționează asupra rotorului.

Punerea în evidență a acestor forțe se poate face direct sau indirect.

Măsurarea directă a forței se realizează prin intermediul unui generator frână cu stator basculant care se poate roti cu un unghi oarecare astfel încât să apese pe un cântar prin intermediul unui braț.

Măsurarea indirectă a forței se face cu mașina fixată pe batiu prin intermediul unor elemente de care deformarea sau modificarea unora din proprietățile lor sînt dependente de forța ce le provoacă.

La utilizarea primei metode, cînd mașina se găsește sub tensiune, respectiv cînd înfășurările sale sînt parcurse de curenți, interacțiunile de natură electromagnetică din întrefier tind să rotească statorul. Acesta, prin intermediul pîrghiei va acționa asupra cântarului care va indica forța din întrefier.

Cuplajul dintre stator și cântar este astfel realizat printr-un sistem de pîrghii încît, indiferent de sensul forței, acum indicator al acestuia se rotește într-un singur sens.

Cunoscînd lungimea "l" a brațului forței și mărimea forței F indicată de cântar se poate determina cuplul dezvoltat de generator pe baza relației:

$$M = F \cdot l \quad (1.2)$$

Cuplul util al motorului de încercat este dat de relația:

$$M_2 = \frac{9560 P_2}{n} \quad (1.3)$$

în care: P_2 - este puterea utilă a motorului de încercat;

n - este viteza de rotație a arborelui.

Considerînd neglijabil cuplul de funcționare în gol al mașinii cu stator basculant se poate scrie:

$$F \cdot l = \frac{9560 P_2}{n} \quad (1.4)$$

Dacă $l=0,956 \text{ m}$ rezultă:

$$0,956 F = \frac{9560 P_2}{n}$$

$$P_2 = 10^{-4} \cdot F \cdot n \quad (1.5)$$

În funcție de necesitate cîntarul poate fi gradat direct în moment sau putere în funcție de dimensiunea adoptată pentru brațul forței.

Cu toate avantajele pe care le prezintă această metodă de determinare a cuplului, nu este aplicabilă pentru mașini de putere mare într-cît nu se execută frîne de puteri mari și în același timp metoda devine costisitoare ținînd cont că întreaga energie se pierde fără a putea fi recuperată.

1.1.1.b. Metoda generatorului tarat [22] [34]

Conform acestei metode mașina de încercat se cuplează mecanic cu un generator tarat de c.c. adică cu un astfel de generator la care s-a determinat cu atenție în prealabil randamentul în toate regiunile de funcționare posibile.

Această metodă se aplică pentru determinarea cuplului electromagnetic în regim staționar, mărimea acestuia fiind dată de relația:

$$M = \frac{P}{2\pi n \cdot \eta} \quad (1.6)$$

unde: P - este puterea pe care o degajă generatorul tarat;

η - este randamentul generatorului tarat în regimul de funcționare dat;

n - viteza de rotație.

Cuplarea generatorului tarat cu motorul de încercat trebuie să fie directă (pe același arbore) deoarece, orice transmisie intermediară introduce erori suplimentare de măsură.

Generatorul de sarcină trebuie să funcționeze cu un domeniu larg de variație a turației.

De aceea este necesar ca puterea nominală a generatorului tarat să fie mai mare decît puterea nominală a motorului de încercat.

Încercarea se poate efectua atît cu disiparea energiei generatorului de sarcină într-un rezistor cît și prin recuperarea acesteia în rețeaua de alimentare.

În cazul recuperării energiei, este necesar ca tensiunea nominală a generatorului de sarcină să fie mai mare decât tensiunea nominală a rețelei de curent continuu la care este conectat.

Aceste două metode de încărcare: pe rezistor și pe rețea, nu sînt însă echivalente între ele.

Considerăm mai întîi că generatorul de curent continuu utilizat are excitație independentă și debitează pe o sarcină rezistivă.

Cuplul de frinare M_f dezvoltat de acest generator este proporțional cu produsul dintre curentul din indus I și fluxul Φ :

$$M_f = K \cdot I \cdot \Phi \quad (1.7)$$

În primă aproximație se poate considera că fluxul depinde numai de curentul de excitație. Dacă generatorul funcționează cu excitația constantă, avînd ca sarcină un rezistor cu rezistență constantă, curentul I este proporțional cu t.e.m. din indus.

T.e.m. din indus U_e fiind la rîndul ei proporțională cu turația rezultă că și curentul I va fi proporțional cu viteza de rotație.

Deci cuplul va fi:

$$M_f = K' \cdot n \cdot \Phi^2 \quad (1.8)$$

Astfel, pentru fiecare valoare a fluxului, dependența cuplului față de turație se va exprima printr-o dreaptă ce trece prin originea coordonatelor avînd panta proporțională cu pătratul fluxului (fig.1.1). Variația cuplului generatorului se poate realiza

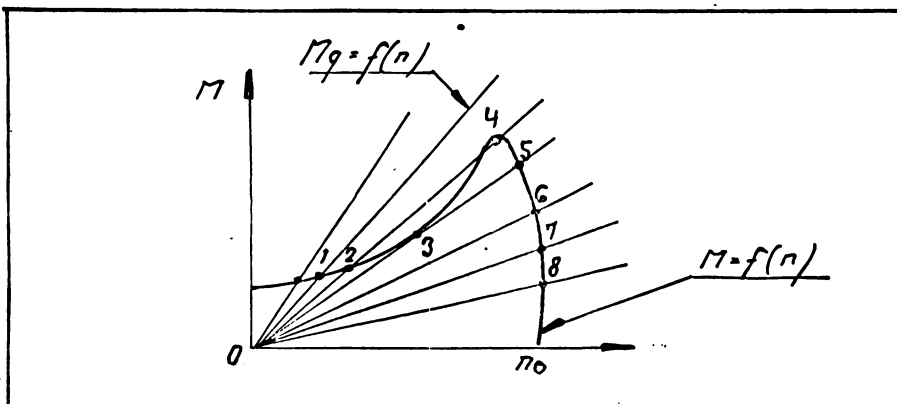


Fig.1.1

fie prin modificarea excitației acesteia menținând constantă rezistența de sarcină, fie modificând rezistența de sarcină menținând constantă excitația. Practic este necesar de obicei să se combine ambele metode.

Dacă pe aceeași diagramă se reprezintă curba de variație a cuplului motorului de încercat în funcție de viteza de rotație, funcționarea motorului împreună cu generatorul de sarcină corespunde punctelor de intersecție dintre această curbă și dreptele reprezentând variația cuplului generatorului funcție de turație.

La trecerea din starea de repaus ($n=0$; $s=1$) la starea de mișcare cu turație crescândă, punctul de funcționare este stabil (punctele 1-2) când motorul însă atinge punctul 3, în care tangenta la curba momentului coincide cu dreapta momentului generatorului, funcționarea stabilă în continuare în comun este imposibilă, deoarece cuplul motorului depășește cuplul generatorului. De aceea, motorul adus până la acest punct va trece la funcționarea stabilă începând din punctul 5, adică din punctul de intersecție al curbei cu prelungirea aceleiași drepte. Toate punctele următoare (6,7...) sînt din nou stabile. Dacă încărcarea generatorului începe de la mersul în gol ($s=0$, $n=100\%$), ajungînd pînă la ultimul punct stabil 4, unde tangenta coincide din nou cu una din drepte, motorul trece în regimul de funcționare stabil abia în punctul 2, în care curba intersectează această dreaptă.

Astfel intervalul dintre punctele 3 și 4 pentru metoda de încărcare considerată reprezintă domeniul de funcționare instabilă și nu poate fi studiat.

În cazul în care generatorul tarat de c.c. debitează pe o rețea de c.c., curentul indusului generatorului va fi:

$$I = \frac{U_0 - U}{r_1} \quad (1.9)$$

unde: U_0 - tensiunea electromotoare a generatorului de c.c.;

U - tensiunea rețelei;

r_1 - suma rezistențelor din circuitul serie al generatorului

În cazul excitației constante, fiecare din aceste valori corespunde unei anumite turații a generatorului:

$$U_0 = K \cdot n \cdot \Phi$$

$$U = k \cdot n \cdot \Phi$$

Astfel se poate scrie:

$$M_T = k''(n_k - n) \cdot \Phi^2 \quad (1.10)$$

unde: n_k - reprezintă viteza de rotație corespunzătoare tensiunii U_k la bornele generatorului la un curent de excitație corespunzător fluxului de excitație Φ .

n - reprezintă viteza de rotație, corespunzătoare tensiunii U la bornele generatorului la un curent de excitație corespunzător aceluiași flux de excitație Φ .

Rezultă că momentul de rotație al generatorului de c.c. este reprezentat printr-o dreaptă înclinată care intersecționează axa absciselor în punctul $n=n_k$ cu panta proporțională cu patratul fluxului.

Si în acest caz variația momentului de rotație al generatorului se poate realiza în două moduri: fie prin modificarea curentului de excitație la tensiune la borne constantă, fie prin modificarea tensiunii la borne menținându-se constant curentul de excitație a generatorului. Dacă tensiunea de alimentare poate fi modificată uniform, curentul de excitație rămânând constant, obținem linii de moment paralele (fig.1.2).

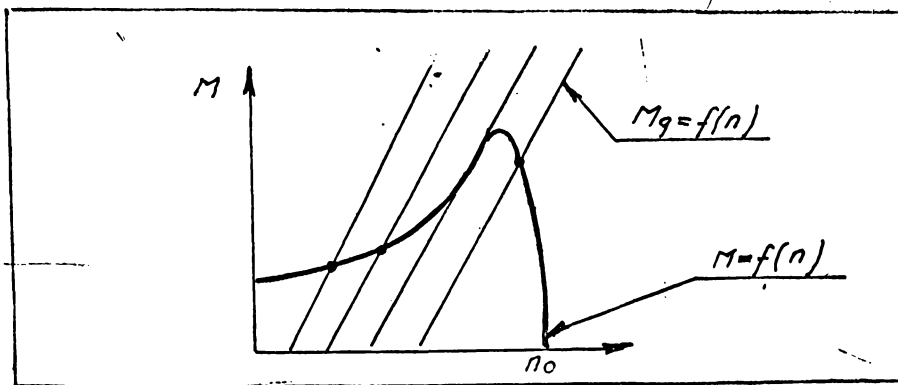


Fig.1.2. Caracteristicile $M=f(n)$ și $M_g=f(n)$ la debitarea generatorului pe rețea.

În cazul funcționării pe o rețea constantă trecerea de la o linie a momentului la alta se poate realiza numai prin modificarea curentului de excitație iar la valori mai ridicate ale acestuia (cînd turația generatorului este coborîtă) liniile de moment devin mai aproape de verticală (fig.1.3).

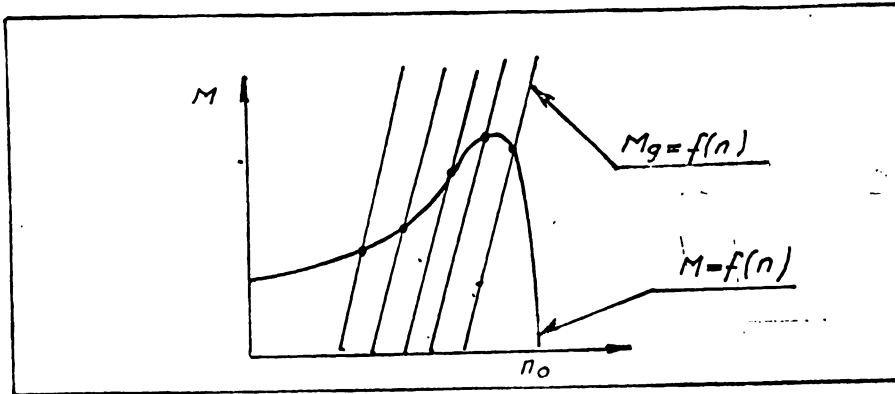


Fig.1.3. Caracteristicile $M=f(n)$ și $M_g=f(n)$.

În ambele cazuri toate punctele de intersecție ale liniilor momentului de rotație a generatorului de sarcină cu curba momentului de rotație a motorului de încărcat corespund unei funcționări stabile. Dacă este necesar să se măsoare valoarea absolută a momentului de rotație este comod să se folosească un generator cu stator basculant. Se poate folosi însă și un generator tarat obișnuit ceea ce este deosebit de comod când curentul de excitație al acestuia rămâne constant. Tararea trebuie să includă și pierderile în fierul indusului ceea ce implică cunoașterea curentului de excitație și a pierderilor mecanice în funcție de viteza de rotație. Prin metoda descrisă pot fi determinate: valoarea momentului maxim (de răsturnare), a momentului minim din procesul de pornire și forma de variație a momentului de rotație în funcție de viteza de rotație.

Metoda descrisă de determinare a caracteristicilor momentului de rotație se aplică cu rezultate bune la mașini de puteri reduse (sub 1000 kW) dar devine foarte greu de aplicat la mașini de puteri ridicate (peste 1000 kW).

Dacă puterea mașinii de încercat depășește o anumită limită în practică nu mai este posibilă încercarea de determinare a momentului de rotație prin metoda generatorului tarat.

1.1.2. Metode ce folosesc regimul dinamic 22 34 78 82

Intrucît puterea maximă a motoarelor ce se pot încerca prin metode de încărcare directă în sarcină este limitată de puterea instalată a ştandului de probă, pentru încercarea maşinilor de putere mare, trebuie să se recurgă la astfel de metode care permit determinarea caracteristicii cuplului fără a fi necesară încărcarea în sarcină a maşinii.

Aceste metode se bazează pe pornirea directă la reţea, la tensiuni nominale, sau tensiune redusă a maşinii în gol.

Cu ajutorul unui oscilograf se înregistrează: tensiunea, curentul şi viteza de rotaţie în timpul procesului de pornire. Pentru înregistrarea directă a cuplului electromagnetic în funcţie de turaţie există diferite metode care utilizează diverse transductoare de cuplu. În timpul pornirii în gol, aproape întregul cuplu M dezvoltat de motor (în afara unei părţi mici a acestuia care acoperă frecările de toate tipurile şi pierderile suplimentare) contribuie la accelerarea rotorului.

Intrucît masa părţilor rotative care se rotesc este constantă, acceleraţia rotorului este proporţională cu momentul de rotaţie care o produce:

$$M - M_{\text{mec}} - M_s = 2 \pi J \frac{dn}{dt}$$

unde: J - este momentul de inerţie al rotorului;

M_{mec} - este momentul datorită frecărilor;

M_s - este momentul datorită pierderilor suplimentare.

Dacă perioada de pornire este prea mică ea poate fi mărită fie prin mărirea momentului de inerţie (montarea unui volant, cuplarea cu o altă maşină, etc.) fie prin micşorarea tensiunii de alimentare. Momentul de frecare M_{mec} şi momentul pierderilor suplimentare M_s sînt mici în raport cu momentul de rotaţie M dezvoltat de motor. Dacă tensiunea la care se face pornirea maşinii, este mică, atunci momentul de rotaţie M dezvoltat de motor poate fi considerat proporţional cu patratul tensiunii. Momentul pierderilor suplimentare depinde în acelaşi mod de tensiune deci el reprezintă întotdeauna aceeaşi fracţiune din cuplul dezvoltat de motor. Momentul de frecare însă nu depinde de tensiune şi de aceea, dacă tensiunea scade mult ponderea acestuia în momentul

total crește simțitor. În timpul procesului de pornire, momentul de frecare nu este constant, el depinzând de viteza de rotație. Întrucât pierderile mecanice care produc momentul de frecare se împart în două categorii: pierderi prin frecare în lagăre și pierderi prin ventilație, se poate considera că momentul datorită pierderilor mecanice prin frecare în lagăre rămâne constant în timpul procesului de pornire, iar momentul datorită pierderilor prin ventilație crește proporțional cu pătratul turației. Rezultă că mărirea perioadei de pornire prin scăderea tensiunii se poate admite atâta timp cât cuplul de frecare este încă neglijabil.

Pentru obținerea variației cuplului în funcție de viteza de rotație se pot aplica diferite metode după cum urmează:

1.1.2.a. Determinarea cuplului prin metoda determinării grafice a accelerației

Această metodă se aplică pentru determinarea variației cuplului dezvoltat de motor în timpul pornirii în gol la o valoare constantă a tensiunii de alimentare. În procesul de accelerare se determină dependența vitezei de rotație funcție de timpul "t" considerat din momentul conectării motorului la rețea. La o astfel de pornire puterea dezvoltată de motor corespunde energiei cinetice a părților sale rotitoare, a pierderilor mecanice și suplimentare.

Dacă se neglijează aceste pierderi (ceea ce poate face de obicei, fără a afecta precizia practică a încercării) se poate considera că accelerația vitezei de rotație care este egală cu derivata vitezei de rotație în raport cu timpul va fi proporțională cu momentul de rotație dezvoltat:

$$M = 2\pi J \frac{dn}{dt} \quad (1.11.)$$

unde J - reprezintă momentul de inerție al părților în rotație.

Trebuie determinată astfel derivata în timp a relației $n=f(t)$. Cea mai simplă metodă de determinare a derivatei constă în diferențierea grafică. În fiecare punct al curbei $n=f(t)$ (fig.1.4) se duce tangenta la curbă și se determină coeficientul unghiular al tangentei, iar din originea O se duce o dreaptă paralelă cu tangenta care determină pe $OG=2 J$ valoarea momentului de rotație corespunzător vitezei de rotație considerate.

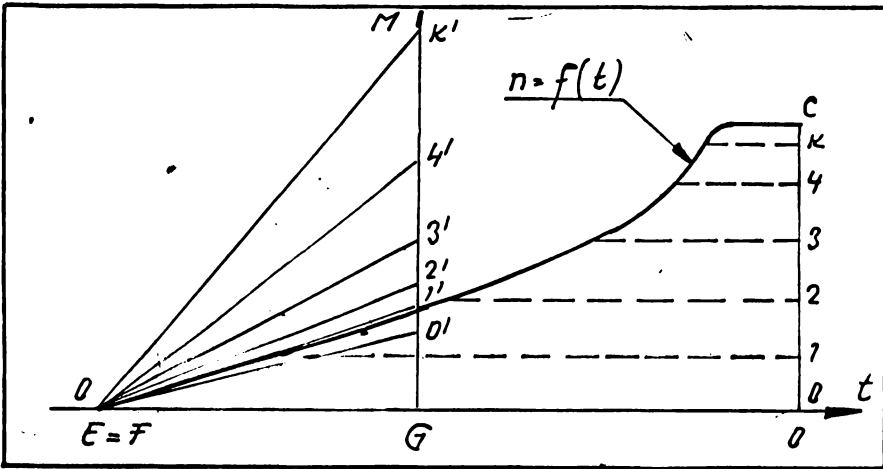


Fig.1.4. Determinarea grafică a accelerației.

Se obține astfel curba din Fig.1.5.

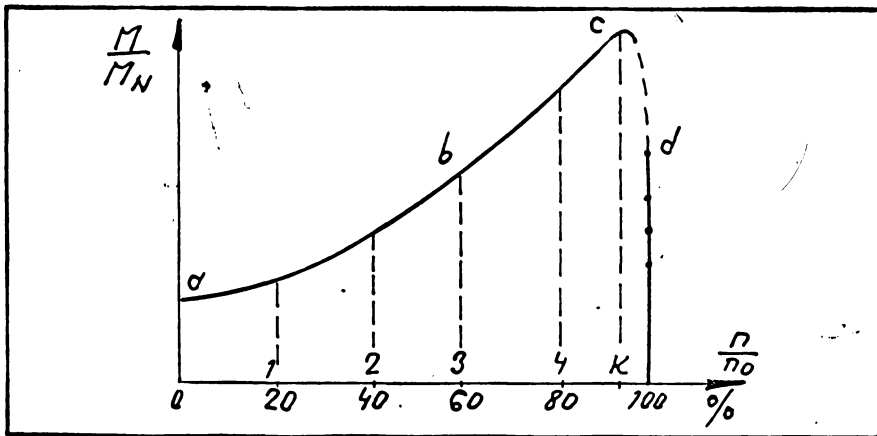


Fig.1.5. Caracteristica cuplului $n=f(n)$ obținută din derivarea grafică a vitezei de rotație.

Curba de variație a vitezei de rotație a mașinii de încercat se poate obține cu mare exactitate în felul următor:

Pe axul mașinii se fixează un disc de circumferința căruia sînt practicate orificii echidistante între ele. De-o parte a discului se așează o sursă de lumină iar de cealaltă parte un fotoelement. În timpul rotirii mașinii fiecare orificiu al discului va determina un fascicul de lumină care prin intermediul fotoelementului provacă un impuls ce se înregistrează la un oscilograf.

556409
229 F

Această metodă de determinare a momentului de rotație are dezavantajul că este foarte laborioasă iar precizia de măsurare este mică.

1.1.2.b. Metoda Ytterberg

Cu această metodă se poate obține derivata funcției $n=f(t)$ fără a fi necesară diferențierea grafică. Motorul de încercat se cupleşcă prin intermediul unui cuplaj rigid cu un generator tahometric cu flux constant. La bornele tahogeneratorului GT se conectează un circuit de derivare (fig.1.6) compus din condensatorul C și rezistența R a buclei BO2 a oscilografului magnetoelectric.

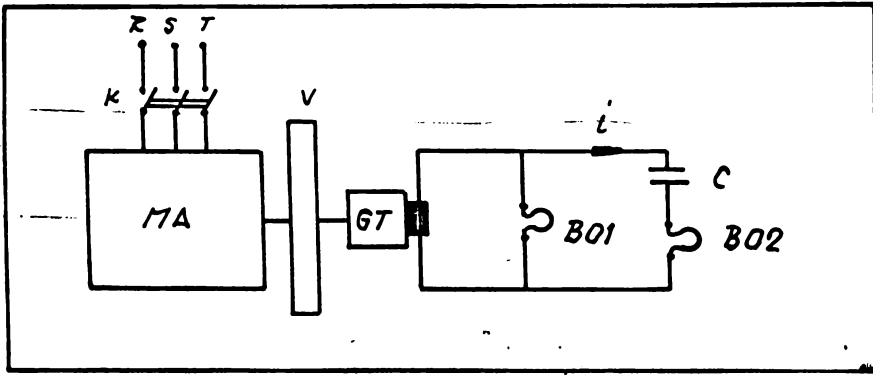


Fig.1.6. Schema electrică Ytterberg pentru derivarea funcției $n=f(t)$.

În cazul în care se neglijează căderea de tensiune internă, tensiunea la bornele tahogeneratorului este proporțională cu viteză de rotație n :

$$U = k \cdot n \quad (1.42.)$$

Dacă este satisfăcută relația $U_R \ll U_C$ unde U_R este tensiunea la bornele buclei iar U_C este tensiunea la bornele condensatorului se poate scrie cu suficientă aproximație:

$$i = C \frac{du}{dt} = C \cdot k \frac{dn}{dt} \quad (1.43.)$$

Dacă înlocuim în ecuația momentului de accelerare derivata vitezei în funcție de curentul i conform relației (1.43.) obținem:

$$M = J \frac{1}{C \cdot k} \quad (1.44.)$$

unde:

- i - este curentul de încărcare al condensatorului ;
- C - capacitatea de derivare ;
- k - constanta tahogeneratorului.

Din relația (1. 4.) rezultă că valoarea curentului de încărcare a condensatorului este proporțională cu momentul de accelerare a rotorului.

Inregistrând curentul din circuitul condensatorului cu ajutorul unui oscilograf magnetoelectric se obține curba accelerației rotorului în perioada pornirii motorului în funcție de timp.

Ordonata unui punct de pe această curbă, la altă scară, conform relației (1. 4.) este proporțională cu momentul de accelerare al rotorului în momentul considerat. Cu același oscilograf magnetoelectric se înregistrează tensiunea la bornele tahogeneratorului care, la o anumită scară reprezintă curba vitezei de rotație în funcție de timp. Cu ajutorul celor două curbe obținute (curba accelerației $a=f(t)$ și curba vitezei de rotație $n=f(t)$ se poate determina grafic caracteristica $a=f(n)$.

Un dezavantaj al acestei scheme de determinare a caracteristicii momentului de rotație îl constituie constanta mare de timp a circuitului de derivare ceea ce determină o micșorare a fidelității circuitului de măsură. De asemenea datorită colectivelor, în curba momentului de rotație apar pulsații perturbatoare.

Aceste pulsații se pot reduce prin utilizarea unui circuit de filtrare tip RLC. În acest caz, căderea de tensiune pe elementele R, L trebuie să fie mică.

Pentru ca filtrul să nu denatureze fenomenul cercetat, curentul din circuitul de filtrare trebuie să fie oscilatoriu amortizat, întrucât constanta de amortizare a fenomenului parazit, în acest caz este mult mai mică decât în cazul regimului aperiodic. Un inconvenient al schemei îl constituie faptul că circuitul de filtrare poate denatura alura curbei $M=f(t)$. La filtrarea pulsațiilor parasite contribuie și alegerea judicioasă a buclelor pentru înregistrare. Astfel, bucla folosită pentru înregistrarea curentului proporțional cu accelerația trebuie să aibă curent nominal mic și să posede în același timp inerție mare pentru a o face insensibilă la oscilații parasite de frecvență ridicată, care ar denatura caracteristica cuplului. Utilizarea unui echipament

lobil cu inertie mare duce la reducerea preciziei de determinare a amplitudinii oscilațiilor parazite.

Principala metodă Vitterberg constă în utilizarea pentru derivarea tensiunii date de un generator, a unui transformator având circuitul magnetic nesaturat. Schema de principiu utilizată este dată în fig.1.7.

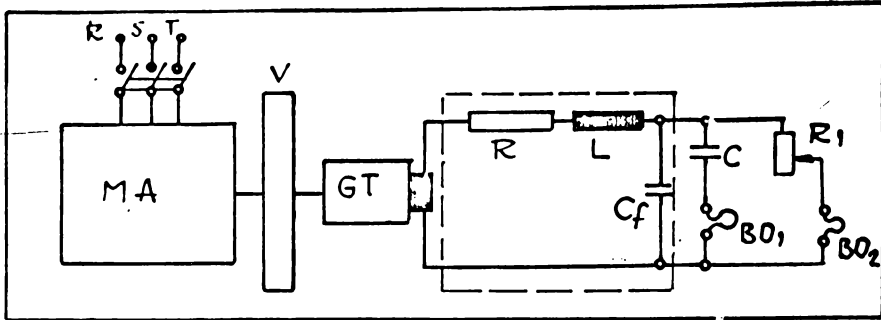


Fig.1.7. Schema electrică Vitterberg cu circuit de filtrare LC.

1.1.2.c. Metoda Petrov

Conținutul acestei metode, pentru determinarea accelerației, se folosește un senzor format dintr-un motor asincron al cărui rotor 4 este un cilindru cu bobine subțiri din cupru sau din bronz în formă de pahar (fig.1.8). În interiorul cilindrilor

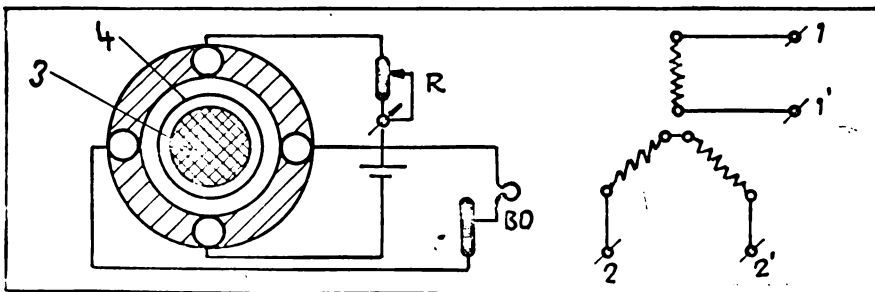


Fig.1.8. Schema de principiu a metodei Petrov.

se așază un miez de fier fix 3. Pe statorul mașinii sunt fixate două înfășurări între axele cărora există un decalaj de 90° . Acestea se pot obține dintr-o înfășurare trifazată obișnuită dacă se conectează două dintre faze în serie, iar cea lăsată este independentă. Faza independentă este folosită pentru excitație și se ali-

mentează de la o sursă de curent continuu. Celelalte două faze inseriate se conectează la aparatul înregistrator.

Rotorul accelerometrului este cuplat rigid cu axul motorului cărui urmează să i se determine caracteristica momentului de rotație. Rotorul accelerometrului, de tip pahar, se va roti cu o viteză variabilă corespunzătoare regimului de demarare a motorului de încercat, în câmpul constant creat de înfășurarea de excitație. În acest fel, în rotor se vor induce tensiuni electromotoare care sînt proporționale cu viteza de rotație:

$$U_{e1} = c \cdot n$$

unde: U_{e1} este t.e.m. indusă în rotorul tip pahar;

c este constantă;

n - viteza de rotație.

Aceste tensiuni electromotoare dau naștere unor curenți în pahar care produc fluxul Φ .

Sensul acestui flux coincide cu axa înfășurării de măsurat. Fluxul Φ_2 care variază în timp cu viteza de rotație, induce o tensiune electromotoare în înfășurarea pe care o străbate:

$$U_{e2} = k_1 \frac{d\Phi_2}{dt} = f(t) \quad (1.15.)$$

Tensiunea electromotoare indusă în înfășurarea de măsură se înregistrează cu ajutorul unui oscilograf magnetoelectric. În cazul în care se procedează la alegerea corespunzătoare a parametrilor accelerometrului, se poate obține o relație aproape liniară între fluxul Φ_2 și viteza de rotație n a motorului, putîndu-se astfel scrie relația:

$$U_{e2} = k_2 \frac{dn}{dt} = f(t) \quad (1.16.)$$

Din punct de vedere al preciziei metodei este necesar ca întrefierul accelerometrului să fie riguros constant în funcție de unghi, iar cuplajul dintre rotorul accelerometrului și rotorul motorului să elimine pe cît posibil vibrațiile.

Cele două întrefieruri trebuie să fie foarte mici iar influența curenților turbionari din miezuri eliminată pe cît posibil, prin utilizarea unei tole silicioase adecvate cu o izolație corespunzătoare.

Schemele bazate pe principiul derivării tensiunii produse de un tahogenerator sînt relativ simplu de realizat. Ele prezintă totuși o serie de inconveniente care influențează negativ rezultatele obținute. Mai importante sînt următoarele:

- rezistența de contact dintre perii și colector este variabilă în timp, limitînd precizia măsurătorilor ;
- lamelele collectorului și părțile de fier în rotație provoacă oscilații parafete care se suprapun pe caracteristica $M=f(n)$ ce urmează să fie determinată.

1.1.2.d. Metoda generatorului unipolar de curent continuu

Cu această metodă se poate obține derivata funcției $n=f(t)$ fără a fi necesară diferențierea grafică și în același timp se elimină pulsațiile datorită collectorului.

Motorul de încercat se cuplează prin intermediul unui cuplaj rigid cu un generator unipolar cu excitație independentă sau cu magneti permanenți. Tensiunea la bornele generatorului unipolar este în orice moment proporțională cu turația.

Dacă la bornele generatorului unipolar se conectează o baterie de condensatoare, curentul de încărcare al bateriei va fi proporțional cu viteza de variație a tensiunii generatorului unipolar:

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (1.17.)$$

unde C este capacitatea bateriei de condensatoare conectată la bornele generatorului unipolar, iar u este tensiunea la bornele generatorului.

Intrucît tensiunea la bornele generatorului este proporțională cu turația, putem scrie:

$$i = C \cdot k \frac{dn}{dt} \quad (1.18.)$$

Dacă magina de încercat este în gol, atunci întreg cuplul de rotație dezvoltat de motor va determina creșterea de turație, adică:

$$M = J \frac{d\omega_r}{dt} = K_1 \frac{dn}{dt} \quad (1.19.)$$

Din ultimele două relații rezultă:

$$i = \frac{k}{K_1} M \quad (1.20.)$$

Deci la o anumită scară, curentul de încărcare a bateriei de condensatoare este proporțional cu cuplul de rotație dezvoltat de motor. Dacă în serie cu bateria de condensatoare se conectează o buclă de oscilograf, oscilograma curentului de încărcare i , la o anumită scară, reprezintă chiar cuplul electromagnetic dezvoltat de motor.

Utilizarea generatorului unipolar prezintă un avantaj prin aceea că se elimină pulsațiile de tensiune datorită creșterilor și a colectorului, dar în același timp are și câteva dezavantaje după cum urmează:

- existența unui contact alunecător între perie și inel este o sursă de perturbații ale tensiunii;
- neuniformitățile întrefierului și vibrațiile pot de asemenea conduce la pulsații ale curentului i .

1.1.2.e. metoda diferențialului magnetoelectric

Conform acestei metode, magina de încercat se cuplează cu un generator mic de curent continuu cu magneti permanenți, având rotorul cilindric fără creștături în scopul de a elimina pulsațiile de tensiune datorită creșterilor sau cu un generator unipolar.

Tensiunea acestui generator se aplică la echipamentul mobil al unui mecanism, constructiv similar cu un instrument de măsurat magnetoelectric obișnuit, însă de dimensiuni mult mai mari.

Acest sistem este cuplat mecanic de echipamentul mobil al unui al doilea aparat similar cu primul, conectat la bucla oscilografului. Ambele sisteme se află sub acțiunea arcurilor antagoniste. Devierea întregului echipament mobil dublu este proporțională cu tensiunea generatorului. La o deviere de la poziția de echilibru, în echipamentul mobil al celui de-al doilea aparat se induce o t.e.m. ce se înregistrează de către bucla oscilografului și care este proporțională cu viteza de rotație a sistemului, adică în final cu accelerația motorului de încercat.

Utilizarea acestui dispozitiv prezintă însă dezavantajul că oscilografurile necesită bucle foarte sensibile. Dacă timpul de pornire este mare, iar turația nominală a maginii de încercate este mică, atunci tensiunea electromotoare ce se obține din cel de-al doilea sistem este foarte mică și dispozitivul devine neutilizabil.

De asemenea o dificultate mare ce se întâmplă la utilizarea acestei metode o constituie determinarea factorului de scară al

curbei înregistrate în unități de cuplu.

În concluzie se poate afirma că metodele de determinare a caracteristicii cuplului care folosesc regimul dinamic sînt ușor de aplicat pentru orice tip de mașină de curent alternativ, dar în același timp comportă anumite dezavantaje, după cum urmează:

- metodele nu sînt reproductibile întrucît la conectarea directă la rețea a mașinii de încercat, valoarea tensiunii care se stabilește la bornele motorului în momentul inițial și în continuare, în perioada pornirii, depinde de raportul dintre puterea rețelei și puterea solicitată de motor în acest regim.

- cuplul dezvoltat de motor în perioada pornirii este influențat de valoarea tensiunii la borne care variază în timpul pornirii. Eroarea datorită acestui fapt este dificil de luat în considerare.

- procesul de accelerare nu permite obținerea cuplurilor parazite întrucît rotorul nu poate urmări variațiile de cuplu din aceste zone.

Din aceste considerente metodele dinamice se recomandă numai pentru controlul alurii caracteristicii cuplului motoarelor electrice rotative.

1.2. metode indirecte de determinare a caracteristicilor de pornire a motoarelor sincrone

Caracteristicile de pornire ale motoarelor sincrone pot fi obținute din caracteristicile de frecvență. Caracteristica de frecvență a unui motor sincron reprezintă dependența impedanței sau conductanței de alunecare sau turăție, la frecvența nominală.

În acest scop se consideră următoarele caracteristici de frecvență:

- caracteristica de frecvență a reactanței longitudinale $x_d(j\omega)$ care reprezintă raportul exprimat în funcție de alunecare, dintre fazorul fundamentalei componente tensiunii indusului produs de fluxul longitudinal datorită curentului longitudinal al indusului și fazorul fundamentalei curentului, rotorul învîrtindu-se la o alunecare dată cu înfășurarea de excitație scurtcircuitată.

- caracteristica de frecvență a reactanței transversale $x_q(j\omega)$ care reprezintă raportul exprimat în funcție de alunecare, dintre fazorul fundamentalei componente tensiunii indusului produsă de fluxul transversal datorit curentului transversal al in-

dusului și fazorului fundamentalei curentului, rotorul învîrtindu-se cu o alunecare dată, cu înfășurarea de excitație scurtcircuitată.

- caracteristica de frecvență a coeficientului de excitație $G(j_s)$ care reprezintă raportul, exprimat în funcție de alunecare, dintre fazorul tensiunii indusului produsă de fluxul magnetic datorit curentului din înfășurarea de excitație și fazorul tensiunii aplicate înfășurării de excitație necesară pentru a produce acest curent, rotorul învîrtindu-se la turația nominală.

Pentru determinarea caracteristicilor de pornire a motoarelor sincrone prin utilizarea caracteristicilor de frecvență se cunosc diverse metode după cum urmează:

1.2.1. Metoda funcționării în asincron la joasă tensiune [22] [36] [49] [72]

Conform acestei metode, se aplică mașinii ce se încearcă o tensiune simetrică redusă $(0,01-0,5)U_n$ la frecvența nominală.

Dacă tensiunea remanentă a mașinii depășește 0,3 ori tensiunea aplicată, rotorul trebuie demagnetizat înainte de încercare. În timpul încercării sînt măsurate și înregistrate tensiunea de linie, curentul de linie și puterea absorbită, înfășurarea de excitație fiind pusă în scurtcircuit.

Viteza de rotație a mașinii este modificată în trepte. Pentru fiecare treaptă de viteză, se măsoară și se înregistrează valorile corespunzătoare ale tensiunii, curentului și a puterii. Impedanțele, rezistențele și reactanțele pentru fiecare treaptă de viteză (alunecare) se calculează folosind relațiile:

$$Z(s) = \frac{U}{\sqrt{3} I}$$

$$R(s) = \frac{P}{3I^2} \quad (1.21.)$$

$$X(s) = \sqrt{Z(s)^2 - R(s)^2}$$

Valorile obținute sînt reprezentate în funcție de alunecare în vederea obținerii caracteristicii de alunecare în vederea obținerii caracteristicii de răspuns în frecvență la tensiuni joase.

1.2.2. Metoda funcționării în asincron în sarcină [22] [36] [72]

Încercarea de funcționare în asincron în sarcină se face

cu mașina rotindu-se în regim de motor, conectată la o rețea de tensiune și frecvență nominale și de putere mult mai mare decât a mașinii de încercat.

Metoda se aplică pentru determinarea caracteristicilor de frecvență în domeniul alunecărilor mici corespunzătoare unor cupluri mici sau egale cu cuplul maxim asincron.

La începutul încercării mașina se învârtiște în sincronism fiind excitată. Apoi excitația este brusc întreruptă și în timpul perioadei următoare a încercării înfășurarea de excitație este fie scurtcircuitată fie închisă pe o rezistență de descărcare sau deschisă pentru a permite obținerea acestor caracteristici pentru toate stările înfășurării de excitație.

Încercarea trebuie efectuată la sarcini diferite cuprinse între 0,1 și 1,0 din valoarea nominală, începând cu sarcina cea mai mică.

Când curenții prin înfășurarea indusului încep să depășească valoarea nominală, trebuie luate precauții corespunzătoare pentru ca încercarea să fie executată într-un timp cât mai scurt pentru a evita încălziri excesive ale mașinii de încercat.

Pentru fiecare sarcină se măsoară și se înregistrează tensiunea de linie, curentul de linie, puterea activă și reactivă, tensiunea și curentul din înfășurarea de excitație.

Valorile medii ale impedanțelor, rezistențelor și reactanțelor se determină pentru fiecare alunecare folosind relațiile:

$$Z(s) = \frac{U}{\sqrt{3} I}$$

$$R(s) = \frac{P}{3 I^2}$$

(1.22)

$$X(s) = \sqrt{Z^2(s) - R(s)^2}$$

Valorile eficace ale tensiunii de linie (U) în timpul unei perioade a oscilației, valorile medii pătratice ale curentului (I) și valoarea medie a puterii (P) pentru aceeași perioadă trebuie calculate pornind de la valorile măsurate sau din oscilograme.

Valorile obținute sînt apoi reprezentate în funcție de alunecare pentru obținerea caracteristicii de răspuns în frecvență, la frecvențe joase.

Principalul dezavantaj al metodelor de încercare a mașinilor sincrone din funcționarea în asincron în sarcină la tensiune nominală sau tensiune redusă îl constituie faptul că nu se pot aplica la mașini de putere mare pentru care nu există posibilitatea încercării în sarcină pe ștandul de probă.

1.2.3. Metoda utilizării funcțiilor de transfer ale mașinii sincrone [36] [37] [39] [40] [51] [72]

Funcțiile de transfer ale ecuațiilor Park pentru mașina sincronă pot fi utilizate pentru determinarea caracteristicilor de frecvență, respectiv pentru analiza comportării mașinii sincrone $0 \leq s \leq 1$ precum și în alte regimuri tranzitorii.

Funcțiile de transfer pot fi determinate din încercarea aplicării bruste a unui curent continuu înfășurării indușului.

Încercarea este făcută pe mașina în repaus, poziția rotorului fiind orientată întâi în axa longitudinală, apoi în axa transversală.

În timpul încercărilor înfășurarea de excitație este scurt-circuitată.

Se remarcă faptul că aplicarea metodelor de determinare a caracteristicilor de pornire a mașinii sincrone prin metode indirecte se impune ca o necesitate la încercarea mașinilor de putere mare pentru care nu există posibilitatea încercării în sarcină pe ștand.

CAPITOLUL II

EQUAȚII ȘI CARACTERISTICE PENTRU REGIMUL
ASINCRON LA MASINA SINCRONA

2.1. Mașina sincronă în regim nestationar [11] [15] [16] [20] [28]

Se consideră cazul unei mașini sincrone cu poli aparenti, mașina sincronă cu poli plini fiind un caz particular al celei considerate.

În fig.2.1.a. este reprezentată schematic o mașină sincronă binolară cu poli aparenti, statorul fiind alcătuit dintr-un miez magnetic cu creștături în care este plasată o înfășurare simetrică m-fazătă.

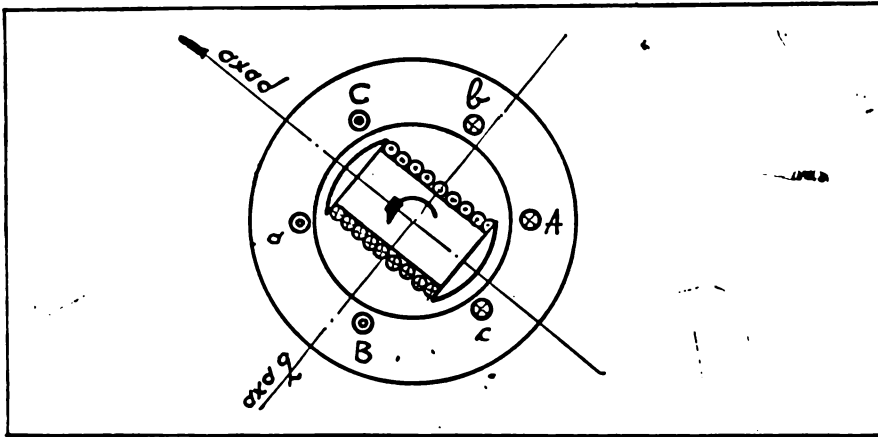


Fig.2.1.a

Rotorul are două axe de simetrie:

- axa longitudinală "d" de-a lungul căreia se închide câmpul magnetic interior;
- axa transversală "q" decolată cu $\frac{\pi}{2}$ radiani electrici față de axa longitudinală "d" în sensul mișcării rotorului, care coincide cu sensul de succesiune a fazelor statorice.

Pe miezul feromagnetic care unește țepile polare este plasată o înfășurare de excitație k.

În talpile polare și în spațiul dintre poli este plasată înfășurarea de amortizare. Aceasta în conformitate cu acțiunea ei, se poate echivala cu două înfășurări separate scurtcircuitate:

- o înfășurare D cu axa după axa de simetrie "d" numită înfășurare de amortizare longitudinală;
- o înfășurare C cu axa după axa transversală "q", numită înfășurare de amortizare transversală.

În fig.2.1.b, este reprezentată schema electrică a mașinii din fig.2.1.a, în cazul considerării numai a armonicei fundamentale a inducției în întrefier. Partea hăgurată reprezintă interstițiul de-a lungul axei d. Toate înfășurările mașinii sînt reprezentate sinusoidal de-a lungul pasului polar. Pierderile în fier se neglijează.

Ecuațiile mașinii sincrone se stabilesc pe baza schemei din fig.2.1.b, pe care o considerăm ca fiind a mașinii reale.

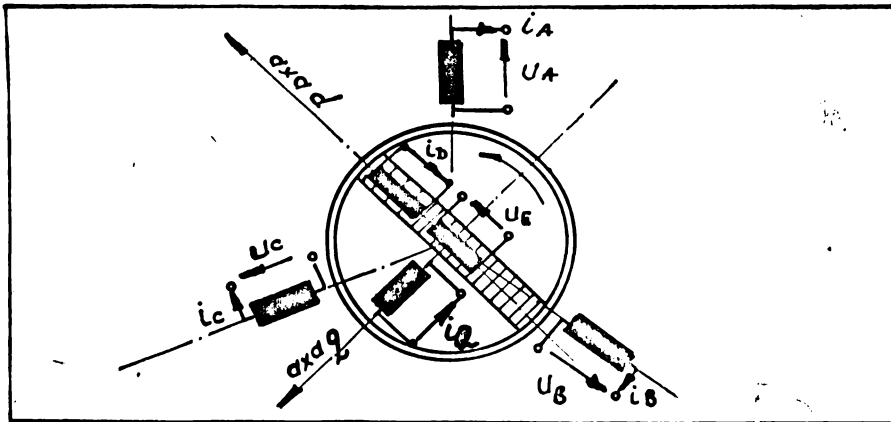


Fig.2.1.b.

Poziția rotorului este caracterizată prin axa longitudinală d, care face unghiul electric θ cu axa A. Axă fazei de ordinul λ face unghiul θ_λ cu axa A, unde ($\theta_1=0$):

$$\theta_\lambda = (\lambda - 1) \frac{2\pi}{p}$$

mașina fiind simetrică.

Pentru mașina considerată, avem:

- R ; R_D; R_C; R_E - rezistențele electrice ale înfășurărilor λ ; D; C și E.

- U_{λ} ; u_{λ} - tensiunile la bornele înfășurărilor statorice și de excitație;

- i_{λ} ; i_D ; i_Q ; i_E - curenții electrici prin înfășurările λ ; D; Q și E.

- N ; N_D ; N_Q ; N_E - numerele de spire corespunzătoare pentru înfășurările λ ; D; Q; E,

- p - numărul perechilor de poli.

Înfășurările de amortizare D și Q sînt scurtcircuitate, curenții, tensiunile și unghiul de poziție θ variază în timp. Aceasta este cazul specific al regimurilor tranzitorii.

Mașina reală a cărei schemă este dată în fig.2.1.b, se înlocuiește cu o mașină echivalentă din punct de vedere energetic a cărei schemă este dată în fig.2.2.

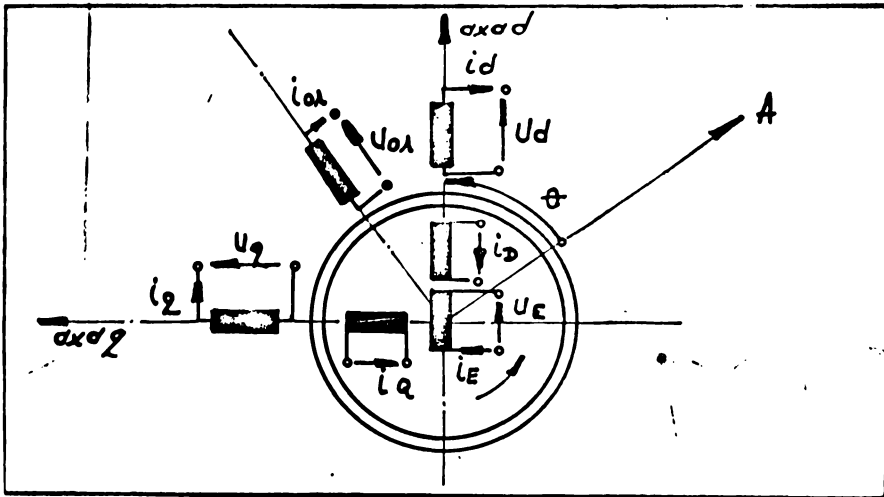


Fig.2.2. Schema echivalentă a mașinii sincrone în teoria celor două axe.

Mașina echivalentă este caracterizată prin următoarele:

- are m înfășurări în stator fixe față de stator necuplate magnetic între ele, cu axele în axele înfășurării mașinii reale. Aceste înfășurări nu produc câmp magnetic în întregul rotor.

- are 2 înfășurări statorice, repartizate sinusoidal, mobile față de stator, fixe față de rotor, cu axele suprapuse una peste axa d, iar cealaltă peste axa q, și două înfășurări, rotorice similare celor două înfășurări statorice, dar fixe față de rotor, cu axele în axele d respectiv q respectiv o înfășurare rotorică fixă față de rotor, cu axa după axa longitudinală d.

Curenții acestor înfășurări produc câmpul magnetic din întrefierul mașinii (câmpul principal), fiind cuplate magnetic între ele.

- mașina echivalentă are același întrefier, același diametru, același număr de perechi de poli și același moment de inerție ca mașina reală.

Înfășurarea fixă statorică de ordinul λ are $N_{0\lambda}$ spire, inductivitatea $L_{0\lambda}$, rezistența $R_{0\lambda}$, tensiunea la borne $U_{0\lambda}$, fluxul $\psi_{0\lambda}$ și curentul $i_{0\lambda}$;

Înfășurările mobile statorice d și q și înfășurările fixe rotorice D , Q , E , au corespunzător, următoarele mărimi:

- numărul de spire: N_d, N_q, N_D, N_Q, N_E ;
- inductivitatea: $L_{dd}, L_{qq}, L_{DD}, L_{QQ}, L_{EE}$;
- rezistența: R_d, R_q, R_D, R_Q, R_E ;
- fluxul: $\psi_d, \psi_q, \psi_D, \psi_Q, \psi_E$;
- curentul: i_d, i_q, i_D, i_Q, i_E ;
- tensiunea: u_d, u_q, u_E .

Tinând cont de ecuațiile (2.221) și (2.226) stabilite la pct.2.39 [ind.bibl.1], ecuațiile mașinii echivalente din fig. 2.2. obțin forma următoare:

$$u_d = -R_d i_d - \frac{d\psi_d}{dt} + \psi_q \frac{d\theta}{dt} \quad (2.1)$$

$$u_q = -R_q i_q - \frac{d\psi_q}{dt} - \psi_d \frac{d\theta}{dt} \quad (2.2)$$

$$U_{0\lambda} = -R_{0\lambda} i_{0\lambda} - \frac{d\psi_{0\lambda}}{dt} \quad (2.3)$$

$$U_E = R_E i_E + \frac{d\psi_E}{dt} \quad (2.4)$$

$$0 = R_D i_D + \frac{d\psi_D}{dt} \quad (2.5)$$

$$0 = R_Q i_Q + \frac{d\psi_Q}{dt} \quad (2.6)$$

$$\psi_d = L_{dd} i_d + L_{Dd} i_D + L_{Ed} i_E \quad (2.7)$$

$$\psi_q = L_{qq} i_q + L_{Qq} i_Q \quad (2.8)$$

$$\psi_{0\lambda} = L_{0\lambda} i_{0\lambda} \quad (2.9)$$

$$\psi_E = L_{dE} i_d + L_{Dd} i_D + L_{EE} i_E \quad (2.10)$$

$$\psi_D = L_{dD} i_d + L_{DD} i_D + L_{ED} i_E \quad (2.11)$$

$$\psi_Q = L_{qQ} i_q + L_{EQ} i_E \quad (2.12)$$

$$M_m \dot{\omega} (i_d \psi_Q - i_Q \psi_d) + \frac{J}{p} \cdot \frac{d^2 \theta}{dt^2} \quad (2.13)$$

Aceste $2m+11$ ecuații determină complet funcționarea mașinii echivalente. Spre exemplu, dacă se cunosc tensiunile la borne, prin rezolvare se obține dependența în raport cu timpul a curenților, fluxurilor și a unghiului θ , necunoscutele fiind: $i_d, i_q, \psi_d, \psi_q, \theta, i_{o\lambda}, \psi_{o\lambda}, i_E, \psi_E, i_D, \psi_D, i_Q, \psi_Q$.

2.2. Ecuațiile mașinii sincrone echivalente în mărimi raportate [1] [15] [16] [20] [28] [85]

Pentru studiul proceselor tranzitorii în mașina sincronă vom utiliza sistemul de ecuații (2.1)-(2.13) scris în mărimi raportate.

La introducerea mărimilor raportate pentru distingerea mai bună a valorilor momentane, mărimile fizice se scriu cu indice zero "0".

Mărimile de bază față de care se face raportarea se ale următoarele: [85]

- pentru tensiuni : $U_b = \sqrt{2} \cdot U_{no}$

- pentru curenți : $I_b = \sqrt{2} \cdot I_{NO}$

- pentru rezistențe : $R_b = \frac{U_{no}}{I_{no}}$

- pentru înălțări : $\psi_b = \frac{\sqrt{2} U_{no}}{\omega_{no}}$

- pentru timp : $t_b = \frac{1}{\omega_{no}}$

- pentru putere : $S_b = 3U_{no} I_{no}$

- pentru inductivități : $L_b = \frac{U_{no}}{\omega_{no} I_{no}}$

Pentru obținerea ecuațiilor în mărimi raportate se procedează în felul următor:

Ecuația 2.1 se împarte cu $\sqrt{2} U_{no}$ și se obține:

$$\frac{u_{do}}{\sqrt{2} U_{no}} = R_{do} \frac{i_{no}}{U_{no}} \cdot \frac{i_{do}}{\sqrt{2} I_{no}} - \frac{d\psi_{do}}{\omega_{no} dt_0} \cdot \frac{\omega_{no}}{\sqrt{2} U_{no}} + \frac{\psi_{qo} \omega_{no}}{\sqrt{2} U_{no}} \cdot \frac{d\theta}{\omega_{no} dt_0}$$

Introducem notații:

$$u_d = \frac{u_{do}}{\sqrt{2} U_{no}} ; i_d = \frac{i_{do}}{\sqrt{2} I_{no}} ; \psi_d = \frac{\psi_{do} \omega_{no}}{\sqrt{2} U_{no}} ; r_d = R_{do} \frac{I_{no}}{U_{no}} ;$$

$$\psi_q = \frac{\psi_{qo} \omega_{no}}{\sqrt{2} U_{no}} ; t = \omega_{no} \cdot t_0$$

Cu aceste notații, ecuația de mai sus devine:

$$u_d = -r_d i_d - \frac{d\psi_d}{dt} + \psi_q \frac{d\theta}{dt} \quad (2.1')$$

Se procedează la fel și cu ecuația 2.2 și se obține:

$$u_q = -r_q i_q - \frac{d\psi_q}{dt} - \psi_d \frac{d\theta}{dt} \quad (2.2')$$

unde:

$$u_q = \frac{u_{qo}}{\sqrt{2} U_{no}} ; i_q = \frac{i_{qo}}{\sqrt{2} I_{no}} ; r_q = R_{qo} \frac{I_{no}}{U_{no}}$$

În același mod, ecuația (2.3) devine:

$$u_{o\lambda} = -r_{o\lambda} \cdot i_{o\lambda} - \frac{d\psi_{e\lambda}}{dt} \quad (2.3')$$

unde:

$$u_{o\lambda} = \frac{u_{o\lambda o}}{\sqrt{2} U_{no}} ; r_{o\lambda} = R_{o\lambda o} \frac{I_{no}}{U_{no}}$$

$$i_{o\lambda} = \frac{i_{o\lambda o}}{I_{no}} ; \psi_{o\lambda} = \psi_{e\lambda o} \frac{\omega_{no}}{\sqrt{2} U_{no}}$$

În scopul utilizării aceluiași mărimi de bază (U_{no}, I_{no}) și pentru circuitul de excitație, în locul mărimilor u_E, i_E, R_E, ψ_E ,

se introduc mărimile raportate la stator: u_f, i_f, R_f, ψ_f , acestea avind forma:

$$u_f = k_U u_E = \frac{N_a k_a}{N_e k_E} u_E$$

$$i_f = k_i i_E = \frac{2}{3} \cdot \frac{N_b k_b}{N_a k_a} i_E$$

$$R_f = \frac{k_U}{k_i} R_E = \frac{3}{2} \left(\frac{N_a k_a}{N_b k_b} \right)^2 R_E$$

$$\psi_f = k_U \psi_E = \frac{N_a k_a}{N_b k_b} \psi_E$$

unde: N_a, N_b - reprezintă numărul de spire pentru înfășurările statorice și excitație, iar

k_a, k_b - reprezintă coeficienții de bobinaj pentru cele două înfășurări.

Coeficienții k_U și k_i sînt coeficienții de reducere la stator a tensiunii și a curentului de excitație.

Ecuația 2.4 scrisă în mărimi raportate la stator, va fi:

$$u_{fo} = R_{fo} \cdot i_{fo} + \frac{d\psi_{fo}}{dt_0}$$

Deci împărțim această ecuație prin $\sqrt{2} U_{no}$, obținem ecuația:

$$u_f = r_f \cdot i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \quad (2.4')$$

unde:

$$u_f = \frac{U_{fo}}{\sqrt{2} U_{no}}; \quad i_f = \frac{i_{fo}}{\sqrt{2} I_{no}}; \quad r_f = \frac{R_{fo} I_{no}}{U_{no}}; \quad \psi_f = \frac{\psi_{fo} \omega_{no}}{\sqrt{2} U_{no}}$$

in același mod se procedează și pentru ecuațiile (2.5) și (2.6) și se obțin următoarele:

$$r_D i_D + \frac{d\psi_D}{dt} = 0 \quad (2.5')$$

$$r_Q i_Q + \frac{d\psi_Q}{dt} = 0 \quad (2.6')$$

unde s-a notat:

$$r_D = R_{D0} \frac{I_{no}}{U_{no}} ; i_D = \frac{i_{D0}}{\sqrt{2} I_{no}} ; \psi_D = \frac{\psi_{D0} \omega_{no}}{\sqrt{2} U_{no}} ; r_Q = R_{Q0} \frac{I_{no}}{U_{no}} ;$$

$$i_Q = \frac{i_{Q0}}{\sqrt{2} I_{no}} ; \psi_Q = \frac{\psi_{Q0} \omega_{no}}{\sqrt{2} U_{no}}$$

Se ține cont de faptul că R_{D0} ; i_{D0} ; ψ_{D0} ; R_{Q0} ; i_{Q0} ; ψ_{Q0} reprezintă parametrii circuitului de amortizare după axa d respectiv q din rotor, reduși la stator.

Pentru a obține expresiile înălțărilor în mărimi raportate, ecuațiile corespunzătoare (2.7)-(2.12) se împart prin $\frac{\sqrt{2} U_{no}}{\omega_{no}}$, se obține astfel pentru ecuația 2.7:

$$\frac{\psi_{d0}}{\sqrt{2} U_{no}} = \frac{L_{dd} \omega_{no}}{U_{no}} \cdot \frac{i_{d0}}{\sqrt{2} I_{no}} + \frac{L_{dc} \omega_{no} I_{no}}{U_{no}} \cdot \frac{i_{D0}}{\sqrt{2} I_{no}} +$$

$$+ \frac{L_{fd} \omega_{no} I_{no}}{U_{no}} \cdot \frac{i_{f0}}{\sqrt{2} I_{no}}$$

Introducând notațiile:

$$x_d = \frac{L_{dd} \omega_{no} I_{no}}{U_{no}}$$

$$x_{dD} = \frac{L_{dD} \omega_{no} I_{no}}{U_{no}} = \frac{L_{Dd} \omega_{no} I_{no}}{U_{no}}$$

$$x_{dF} = \frac{L_{dF} \omega_{no} I_{no}}{U_{no}} = \frac{L_{Fd} \omega_{no} I_{no}}{U_{no}}$$

se obține ecuația:

$$\psi_d = x_d i_d + x_{dD} i_D + x_{dF} i_f \quad (2.7')$$

În mod asemănător se obțin și celelalte ecuații în mărimi raportate:

$$\psi_q = x_q i_q + x_{qC} i_c \quad (2.8')$$

$$\psi_{o\lambda} = x_o i_{o\lambda} \quad (2.9')$$

$$\psi_f = x_{df} i_d + x_f i_f + x_{fD} i_D \quad (2.10')$$

$$\psi_D = x_{dD} i_d + x_{fD} i_f + x_D i_D \quad (2.11')$$

$$\psi_Q = x_{qQ} i_q + x_Q i_Q \quad (2.12')$$

In aceste ecuații s-au mai introdus următoarele notații:

$$x_q = \frac{L_{qQ} \omega_{no} I_{no}}{U_{no}}$$

$$x_{qQ} = \frac{L_{qQ} \omega_{no} I_{no}}{U_{no}} = \frac{L_{qQ} \omega_{no} I_{no}}{U_{no}}$$

$$x_f = \frac{L_{ff} \omega_{no} I_{no}}{U_{no}}$$

(2.13')

$$x_{fD} = \frac{L_{fD} \omega_{no} I_{no}}{U_{no}} = \frac{L_{Df} \omega_{no} I_{no}}{U_{no}}$$

$$x_D = \frac{L_{DD} \omega_{no} I_{no}}{U_{no}}$$

$$x_Q = \frac{L_{QQ} \omega_{no} I_{no}}{U_{no}}$$

Ecuațiile (2.7')-(2.12') se pot pune sub forma unei ecuații matriciale care are forma următoare:

$$\begin{pmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_o \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_d & & & x_{df} & x_{dD} & \\ & x_q & & & & x_{qQ} \\ & & x_o & & & \\ x_{df} & & & x_f & x_{fD} & \\ x_{dD} & & & x_{fD} & x_D & \\ & x_{qQ} & & & & x_Q \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

In ecuațiile de mai sus s-a considerat căci inductivitățile

mutuale sînt respectiv egale, adică rezultă:

$$x_{dD} = x_{Dd}; \quad x_{fD} = x_{Df}; \quad x_{qQ} = x_{Qq}$$

ținînd cont de relațiile (2.5') și (2.6'):

$$r_D i_D + \frac{d\psi_D}{dt} = 0 \quad (2.5')$$

$$r_Q i_Q + \frac{d\psi_Q}{dt} = 0 \quad (2.6')$$

rezultă că nu toți parametri ce intră în ecuația matricială (2.14) se pot considera independenți. Ecuațiile (2.1')-(2.12') se pot transforma, eliminîndu-se curenții și fluxurile din înfășurările de amortizare D și Q.

În aceste ecuații, obținute după eliminarea mărimilor i_D ; i_Q ; ψ_D ; ψ_Q , parametrii circuitului de amortizare D și Q care mai rămîn: rezistențele r_D ; r_Q și coeficienții x_{qQ} ; x_Q ; x_{dD} ; x_{fD} ; x_D se înlocuiesc cu alți parametri ce se pot determina experimental: constante de timp, coeficienți de dispersie și coeficienți de cuplaj magnetic.

Aceste transformări se fac separat pentru cele două axe: axa transversală și axa longitudinală.

2.2.1. Ecuațiile mașinii sincrone după axa transversală

Considerăm ecuația (2.8') din care scoatem curentul din înfășurarea de amortizare rotorică după axa transversală i_Q :

$$i_Q = \frac{1}{x_{qQ}} (\psi_Q - x_Q i_Q)$$

Expresia curentului i_Q se introduce în ecuația 2.12' și obținem:

$$\psi_Q = x_{qQ} i_Q + x_Q \frac{1}{x_{qQ}} (\psi_Q - x_Q i_Q)$$

Derivăm expresia fluxului ψ_Q și obținem:

$$\frac{d\psi_Q}{dt} = x_{qQ} \frac{di_Q}{dt} + \frac{x_Q}{x_{qQ}} \left(\frac{d\psi_Q}{dt} - x_Q \frac{di_Q}{dt} \right)$$

Introducem ce i_Q și pe $\frac{d\psi_Q}{dt}$ cu valorile lor în ecuația:

$$r_Q i_Q + \frac{d\psi_Q}{dt} = 0$$

și obținem:

$$\frac{r_Q}{x_{qQ}} (\psi_Q - x_q i_q) + x_{qQ} \frac{di_q}{dt} + \frac{x_q}{x_{qQ}} \left(\frac{d\psi_q}{dt} - x_q \frac{di_q}{dt} \right) = 0$$

$$\frac{x_q}{x_{qQ}} \frac{d\psi_q}{dt} + \frac{r_Q}{x_{qQ}} = x_q \left[\frac{x_q}{x_{qQ}} - \frac{x_{qQ}}{x_q} \right] \frac{di_q}{dt} + \frac{r_Q}{x_{qQ}} i_q x_q$$

Înmulțim ecuația obținută cu $\frac{x_{qQ}}{r_Q}$ și obținem:

$$\frac{x_q}{r_Q} \frac{d\psi_q}{dt} + \psi_q = x_q \left[\left(1 - \frac{x_{qQ}^2}{x_q x_Q} \right) \frac{x_{qQ}}{r_Q} \frac{di_q}{dt} + i_q \right] \quad (2.15)$$

Facem următoarele notații:

$$T_q = \frac{x_q}{r_Q} ; \quad \tilde{\tau}_q = \frac{x_{qQ}}{x_q} ; \quad \tilde{\tau}_Q = \frac{x_{qQ}}{x_Q}$$

$$\tilde{\nu}_q = 1 - \tilde{\tau}_q = 1 - \frac{x_{qQ}}{x_q} ; \quad \tilde{\nu}_Q = 1 - \tilde{\tau}_Q = 1 - \frac{x_{qQ}}{x_Q}$$

$$\tilde{\tau}_{qQ} = \tilde{\tau}_q \tilde{\tau}_Q = \frac{x_{qQ}^2}{x_q x_Q} ; \quad \tilde{\nu}_{qQ} = 1 - \tilde{\tau}_{qQ} = 1 - \frac{x_{qQ}^2}{x_q x_Q}$$

unde: T_q - reprezintă constanta de timp a înfășurării de amortizare după axa transversală ;

$\tilde{\tau}_q$ și $\tilde{\tau}_Q$ - reprezintă coeficienții de cuplaj magnetic mutual între înfășurările q și Q ;

$\tilde{\nu}_q$ și $\tilde{\nu}_Q$ - reprezintă coeficienții de dispersie corespunzători circuitelor q și Q ;

$\tilde{\tau}_{qQ}$ - reprezintă coeficientul global de cuplaj magnetic între cele două înfășurări q și Q ;

$\tilde{\nu}_{qQ}$ - reprezintă coeficientul global de dispersie corespunzător perechii de înfășurări q, Q .

Coeficientul global de dispersie $\checkmark_{q\omega}$ și coeficientul global de cuplaj $\checkmark_{q\omega}$ rămân neschimbați cu reducerea la înfășurarea primară.
Cu aceste notații ecuația (2.15) devine:

$$T_q \frac{d\psi_q}{dt} + \psi_q = x_q (T_\omega \cdot \checkmark_{q\omega} \frac{di_q}{dt} + i_q) \quad (2.16)$$

2.2.2. Ecuațiile mașinii sincrone după axa longitudinală

Pentru axa longitudinală vom scrie trei ecuații diferențiale considerând următoarele situații:

- infașurarea statorului este alimentată iar înfășurarea de excitație este în gol ($i_f=0$).
- infașurarea de excitație este alimentată iar înfășurarea statorului este în gol ($i_d=0$; $i_q=0$).
- Infașurarea statorică este alimentată iar înfășurarea de excitație este scurtcircuitată.

2.2.2.a. înfășurarea statorului este alimentată și rotorul în gol

Considerăm deci în primul rând că înfășurarea statorului este alimentată la tensiunea u_d , iar înfășurarea de excitație este în gol ($i_f=0$).

În acest caz particular, când $i_f=0$, ecuațiile (2.7'), (2.11') și (2.5') devin:

$$\psi_d = x_d i_d + x_{dD} i_D \quad (2.17)$$

$$\psi_D = x_{dD} i_d + x_D i_D \quad (2.18)$$

$$0 = r_D i_D + \frac{d\psi_D}{dt} \quad (2.19)$$

Din ecuația (2.17) scoatem curentul i_D :

$$i_D = \frac{1}{x_{dD}} (\psi_d - x_d i_d)$$

Introducem această valoare a curentului i_D în ecuația (2.18) și obținem:

$$\psi_D = x_{dD} i_d + x_D \frac{1}{x_{dD}} (\psi_d - x_d i_d)$$

Cu valorile obținute pentru curentul i_D și înlocuirea ψ_D , ecuația (2.19) devine:

$$r_D \frac{1}{x_{dD}} (\psi_d - x_d i_d) + x_{dD} \frac{di_d}{dt} + \frac{x_D}{x_{dD}} \left(\frac{d\psi_d}{dt} - x_d \frac{di_d}{dt} \right) = 0$$

sau:

$$\frac{x_D}{x_{dD}} \frac{d\psi_d}{dt} + \frac{r_D}{x_{dD}} \psi_d = \left(\frac{x_d x_D}{x_{dD}} - x_{dD} \right) \frac{di_d}{dt} + \frac{r_D x_d}{x_{dD}} i_d$$

Înmulțim ambii membri ai ecuației de mai sus cu $\frac{x_{dD}}{r_D}$ și obținem:

$$\frac{x_D}{r_D} \frac{d\psi_d}{dt} + \psi_d = x_d \left[\left(1 - \frac{x_{dD}^2}{x_d x_D} \right) \frac{x_D}{r_D} \cdot \frac{di_d}{dt} + i_d \right]$$

Folosind notațiile:

$$T_D = \frac{x_D}{r_D} ; \quad \sigma_{dD} = 1 - \frac{x_{dD}^2}{x_d x_D}$$

obținem în final ecuația diferențială:

$$T_D \frac{d\psi_d}{dt} + \psi_d = x_d \left(\sigma_{dD} T_D \frac{di_d}{dt} + i_d \right) \quad (2.20)$$

Am obținut astfel o relație între înălțuirea ψ_d și componenta longitudinală a curentului pentru cazul când circuitul de excitație este deschis.

Pentru a obține o relație între înălțuirea rotorică co-respunzătoare înfășurării de excitație ψ_f și curentul longitudinal i_d , considerăm ecuația (2.10') din care scoatem curentul i_D :

$$i_D = \frac{1}{x_{fD}} (\psi_f - x_{dF} i_d)$$

din ecuația (2.16) obținem:

$$\psi_D = x_{dD} i_d + x_D \frac{1}{x_{fD}} (\psi_f - x_{dF} i_d)$$

Introducem expresiile obținute pentru i_D și ψ_D în ecuația (2.19) și avem:

$$r_D \frac{1}{x_{fD}} (\psi_f - x_{dF} i_d) + x_{dD} \frac{di_d}{dt} + \frac{x_D}{x_{fD}} \left(\frac{d\psi_f}{dt} - x_{dF} \frac{di_d}{dt} \right) = 0$$

sau:

$$\frac{x_D}{x_{fD}} \frac{d\psi_f}{dt} + \frac{r_D}{x_{fD}} \psi_f = \left(\frac{x_{df}x_D}{x_{fD}} - x_{dD} \right) \frac{di_d}{dt} + \frac{r_D}{x_{fD}} x_{df} i_d$$

Inmulțim ecuația de mai sus cu $\frac{x_{fD}}{r_D}$ și obținem:

$$\frac{x_D}{r_D} \frac{d\psi_f}{dt} + \psi_f = \left(x_{df} \frac{x_D}{r_D} - \frac{x_{dD}x_{fD}}{r_D} \right) \frac{di_d}{dt} + x_{df} i_d$$

Folosind notațiile:

$$\frac{x_D}{r_D} = T_D ; \quad \mu_D = 1 - \frac{x_{dD}x_{fD}}{x_{df}x_D}$$

obținem în final ecuația diferențială:

$$T_D \frac{d\psi_f}{dt} + \psi_f = x_{df} (\mu_D \cdot T_D \frac{di_d}{dt} + i_d) \quad (2.21)$$

În această ecuație coeficientul μ_D cît și constanta de timp T_D pot fi determinați experimental.

2.2.2.b. Infășurarea de excitație este alimentată, infășurarea statorului fiind în gol.

În acest caz particular, cînd infășurarea statorică este în gol ($i_d=0$), iar curentul de excitație este diferit de zero ($i_f \neq 0$), ecuațiile (2.7°), (2.10°) și (2.11°) devin:

$$\psi_d = x_{dD} i_d + x_{df} i_f \quad (2.22)$$

$$\psi_f = x_f i_f + x_{fD} i_D \quad (2.23)$$

$$\psi_D = x_{fD} i_f + x_D i_D \quad (2.24)$$

Din ecuația (2.23) scoatem curentul i_D :

$$i_D = \frac{1}{x_{fD}} (\psi_f - x_f i_f)$$

Introducem pe i_D în ecuația (2.24) și obținem:

$$\psi_D = x_{fD} i_f + x_D \frac{1}{x_{fD}} (\psi_f - x_f i_f)$$

Introducînd pe i_D și ψ_D în ecuația:

$$r_D i_D + \frac{d\psi_D}{dt} = 0$$

obținem:

$$\frac{x_D}{x_{fD}} \frac{d\psi_f}{dt} + \frac{r_D}{x_{fD}} \psi_f = \left(\frac{x_f x_D}{x_{fD}} - x_{fD} \right) \frac{di_f}{dt} + \frac{r_D}{x_{fD}} x_f i_f$$

Înmulțim ecuația obținută mai sus cu $\frac{x_{fD}}{r_D}$ și obținem:

$$\frac{x_D}{r_D} \frac{d\psi_f}{dt} + \psi_f = T_D \cdot x_f \left(1 - \frac{x_{fD}^2}{x_f x_D} \right) \frac{di_f}{dt} + x_f \cdot i_f$$

Folosind notațiile:

$$\frac{x_D}{r_D} = T_D ; \sqrt{}_{fD} = 1 - \frac{x_{fD}^2}{x_f \cdot x_D}$$

obținem în final ecuația diferențială:

$$T_D \frac{d\psi_f}{dt} + \psi_f = x_f (T_D \sqrt{}_{fD} \frac{di_f}{dt} + i_f) \quad (2.25)$$

Am obținut astfel o relație între fluxul de excitație ψ_f și curentul de excitație i_f .

În continuare, pentru același caz particular ($i_f \neq 0; i_d = 0$) se va obține o ecuație diferențială ce exprimă legătura între fluxul longitudinal ψ_d și curentul de excitație i_f .

Pentru aceasta, din ecuațiile (2.23) și (2.24) scoatem pe i_D și ψ_D și obținem:

$$i_D = \frac{1}{x_{dD}} (\psi_d - x_{df} \cdot i_f)$$

$$\psi_D = x_{fD} i_f + \frac{x_D}{x_{dD}} (\psi_d - x_{df} \cdot i_f)$$

Introducem pe i_D și ψ_D în ecuația:

$$r_D i_D + \frac{d\psi_D}{dt} = 0$$

și obținem:

$$\frac{x_D}{x_{dD}} \frac{d\psi_d}{dt} + \frac{r_D}{x_{dD}} \psi_d = \left(\frac{x_D x_{df}}{x_{dD}} - x_{fD} \right) \frac{di_f}{dt} + \frac{r_D}{x_{dD}} x_{df} i_f$$

Însumăm întreaga ecuație de mai sus cu $\frac{x_{dD}}{r_D}$ și obținem:

$$\frac{x_D}{r_D} \frac{d\psi_d}{dt} + \psi_d = x_{df} \left(1 - \frac{x_{fD} x_{dD}}{x_{df} x_D} \right) \frac{di_f}{dt} + i_f$$

Utilizând notațiile:

$$\frac{x_D}{r_D} \triangleq T_D ; \quad 1 - \frac{x_{fD} x_{dD}}{x_{df} x_D} = \mu_D$$

obține ecuația finală:

$$T_D \frac{d\psi_d}{dt} + \psi_d = x_{df} (T_D \mu_D) \frac{di_f}{dt} + i_f \quad (2.26)$$

2.2.2.c. Infășurarea statorică este alimentată iar infășurarea rotorică în scurtcircuit

În acest caz avem $i_d \neq 0$, $i_f \neq 0$, deci trebuie să considerăm ecuațiile (2.7°), (2.10°), (2.11°).

Din ecuația (2.7°) scoatem pe i_D :

$$i_D = \frac{1}{x_{dD}} (\psi_d - x_d i_d - x_{df} i_f)$$

Din ecuația (2.11°) obținem:

$$\psi_D = x_{dD} i_d + x_{fD} i_f + \frac{x_D}{x_{dD}} (\psi_d - x_d i_d - x_{df} i_f)$$

Introducem pe i_D și ψ_D în ecuația (2.5°) și obținem în final:

$$T_D \frac{d\psi_d}{dt} + \psi_d = x_d (T_D \mu_D) \frac{di_d}{dt} + i_d + x_{df} (T_D \mu_D) \frac{di_f}{dt} + i_f \quad (2.27)$$

Am obținut astfel ecuația diferențială ce exprimă relația între fluxul longitudinal statoric ψ_d , curentul statoric longitudinal i_d și curentul de excitație i_f .

Acum, dacă din relațiile (2.10°) și (2.11°) scoatem curentul i_D și fluxul ψ_D , obținem:

$$i_D = \frac{1}{x_{fD}} (\psi_f - x_{df} i_f - x_f i_f)$$

$$\psi_D = x_{dD} i_d + x_{fD} i_f + x_D \frac{1}{x_{fD}} (\psi_f - x_{df} i_f - x_f i_f)$$

Introducem pe i_D și ψ_D în relația:

$$r_D i_D + \frac{d\psi_D}{dt} = 0$$

și obținem în final ecuația diferențială:

$$T_D \frac{d\psi_f}{dt} + \psi_f = x_{fd} (T_D \mu_D \frac{di_d}{dt} + i_d) + x_f (T_D \tilde{\nu}_{fD} \frac{di_f}{dt} + i_f)$$

Cu această ecuație obținem relația între fluxul de excitație ψ_f și cei doi curenți i_d și i_f .

2.3. Ecuațiile mașinii sincrone sub formă operațională Parametrii operaționali 11 15 16 53 84

Utilizarea calculului operațional se face în cazul în care avem: $\frac{de}{dt} = ct.$

Obșnuit, la rezolvarea ecuațiilor mașinii sincrone se utilizează calculul operațional cu transformata Carson

$$f(p) = p \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt$$

În continuare funcțiile imagine se vor scrie barat ondulat iar valorile inițiale se scriu cu litere mari și indicele zero.

Vom considera ecuațiile mașinii sincrone obținute pentru cele două axe: axa transversală și axa longitudinală.

2.3.1. Ecuațiile operaționale și parametrii operaționali dună axa transversală

Pentru condiții inițiale nule, ecuația diferențială 2.16 devine:

$$i_q \cdot \tilde{\Psi}_q(p) + \tilde{\Psi}_q(p) = x_q \left[\tilde{\nu}_{qq} T_c p \tilde{i}_q(p) + \tilde{i}_q(0) \right] \quad (2.29)$$

Împărțim ambii membri ai ecuației prin $(pT_c + 1)$ și obținem:

$$\tilde{\Psi}_q(p) = x_q \frac{p T_w \tilde{\sigma}_{qq} + 1}{p T_w + 1} I_q(p) \quad (2.30)$$

Dacă introducem notația:

$$\tilde{X}_q(p) = x_q \frac{p T_w \tilde{\sigma}_{qq} + 1}{p T_w + 1} \quad (2.31)$$

obținem ecuația operațională după axa transversală scrisă sub formă:

$$\tilde{\Psi}_q(p) = \tilde{X}_q(p) \tilde{I}_q(p) \quad (2.32)$$

Mărimea $\tilde{X}_q(p)$ se numește reactanța operațională după axa transversală.

Dacă se calculează valorile limită ale reactanței $\tilde{X}_q(p)$ obținem următoarele mărimi:

- Valoarea limită a reactanței $\tilde{X}_q(p)$ corespunzătoare începutului procesului tranzitoriu se numește reactanță supratranzitorie transversală (x_q^*) și este egală cu:

$$\tilde{X}_q(p=\infty) = X_q(t=0) = x_q \frac{T_w \tilde{\sigma}_{qq} + 1}{T_w} = \tilde{\sigma}_{qq} x_q$$

$$\text{deci: } x_q^* = \tilde{\sigma}_{qq} x_q$$

- Valoarea limită a reactanței $X_q(p)$ corespunzătoare regimului stabilizat ($t=\infty$) se numește reactanță sincronă transversală și este egală cu:

$$X_q(p=0) = X_q(t=\infty) = x_q$$

Deci x_q reprezintă tocmai reactanța sincronă transversală.

2.3.2. Ecuațiile operaționale și parametrii operaționali după axa longitudinală

Utilizăm ecuațiile diferențiale obținute în paragraful 2.2.2. pentru cele trei cazuri de funcționare a mașinii sincrone:

a) Mașina sincronă avind înfășurarea statorică alimentată iar înfășurarea de excitație în gol.

În acest regim particular de funcționare s-au obținut ecuațiile diferențiale (2.20) și (2.21).

Ecuația (2.20), pentru condiții inițiale nule, sub formă

operatională devine:

$$x_D p \tilde{\Psi}_d(p) + \tilde{\Psi}_d(p) = x_d \left[\tilde{U}_{dD} p I_D \tilde{I}_d(p) + \tilde{I}_d(p) \right]$$

$$\tilde{\Psi}_d(p) (p T_D + 1) = x_d (\tilde{U}_{dD} p T_D + 1) \tilde{I}_d(p)$$

$$\tilde{\Psi}_d(p) = \frac{x_d (\tilde{U}_{dD} p T_D + 1)}{p T_D + 1} \tilde{I}_d(p) \quad (2.33)$$

Dacă facem notația:

$$\tilde{X}_{d0}(p) = x_d \frac{p \tilde{U}_{dD} T_D + 1}{p T_D + 1} \quad (2.34)$$

Ecuația operatională (2.33) devine:

$$\tilde{\Psi}_d(p) = \tilde{X}_{d0}(p) \tilde{I}_d(p) \quad (2.35)$$

unde $\tilde{X}_{d0}(p)$ reprezintă reactanța operatională longitudinală pentru cazul cînd circuitul de excitație este deschis.

Pentru condiții inițiale nule, ecuația (2.21) scrisă sub formă operatională va fi:

$$p T_D \Psi_f(p) + \Psi_f(p) = x_{df} (p T_D \mu_D + 1) \tilde{I}_d(p)$$

$$\tilde{\Psi}_f(p) = x_{df} \frac{p T_D \mu_D + 1}{p T_D + 1} \tilde{I}_d(p) \quad (2.36)$$

Dacă introducem notația:

$$\tilde{X}_{df}(p) = x_{df} \frac{p T_D \mu_D + 1}{p T_D + 1} \quad (2.37)$$

obținem:

$$\tilde{\Psi}_f(p) = \tilde{X}_{df}(p) \tilde{I}_d(p)$$

unde: $\tilde{X}_{df}(p)$ este reactanța operatională mutuală dintre rotor și stator.

b) Mașina sincronă avînd infăgurarea rotorică alimentată iar infăgurarea statorică în gol.

Pentru acest regim particular au fost deduse ecuațiile diferențiale după axa longitudinală în paragraful 2.2.2.b., obținînd-

du-se ecuațiile (2.25) și (2.26).

Pentru condiții inițiale nule, ecuația (2.25) scrisă sub formă operațională va avea forma:

$$pT_D \tilde{\Psi}_f(p) + \tilde{\Psi}_f(p) = x_f \left[pT_D \tilde{V}_{fD} \tilde{I}_f(p) + \tilde{I}_f(p) \right]$$

$$\tilde{\Psi}_f(p) = x_f \frac{pT_D \tilde{V}_{fD} + 1}{pT_D + 1} \tilde{I}_f(p) \quad (2.3c)$$

Introducem notația:

$$\tilde{X}_{f0}(p) = x_f \frac{pT_D \tilde{V}_{fD} + 1}{pT_D + 1} \quad (2.39)$$

Cu această notație, ecuația (2.38) devine:

$$\tilde{\Psi}_f(p) = \tilde{X}_{f0}(p) \tilde{I}_f(p)$$

unde: $\tilde{X}_{f0}(p)$ reprezintă reactanța operațională a circuitului de excitație pentru cazul cînd înfășurarea indusului este în gol.

Ecuația diferențială (2.26) scrisă sub formă operațională va fi:

$$\tilde{\Psi}_d(p) (T_D \cdot p + 1) = x_{df} (pT_D \tilde{V}_{dD} + 1) \tilde{I}_f(p)$$

$$\tilde{\Psi}_d(p) = x_{df} \frac{pT_D \tilde{V}_{dD} + 1}{pT_D + 1} \tilde{I}_f(p) \quad (2.40)$$

$$\tilde{\Psi}_d(p) = \tilde{X}_{df}(p) \tilde{I}_f(p) \quad (2.41)$$

unde: $\tilde{X}_{df}(p)$ reprezintă reactanța operațională mutuală a circuitului indusului față de circuitul de excitație.

Determinarea reactanțelor operaționale definite pînă în prezent presupune determinarea coeficienților: \tilde{V}_{df} ; \tilde{V}_{fD} ; \tilde{V}_{dD} ; \tilde{V}_{dq} ; x_d ; x_{df} ; x_q și a constantelor de timp T_q ; T_d care intră în expresiile acestor reactanțe.

c) Mașina sincronă are alimentată înfășurarea statorică, înfășurarea rotorică fiind în scurtcircuit:

Pentru acest regim de funcționare, în paragraful 2.2.2. au fost deduse ecuațiile diferențiale (2.27) și (2.28), care sub

formă operațională sînt:

$$\tilde{\Psi}_d(p) = \tilde{X}_{d0}(p)\tilde{I}_d(p) + \tilde{X}_{df}(p)\tilde{I}_f(p) \quad (2.42)$$

$$\tilde{\Psi}_f(p) = \tilde{X}_{df}(p)\tilde{I}_d(p) + \tilde{X}_{f0}(p)\tilde{I}_f(p) \quad (2.43)$$

Pentru determinarea relației directe între $\tilde{\Psi}_d(p)$ și $\tilde{I}_d(p)$ la ecuațiile operaționale (2.42) și (2.43) se mai adaugă ecuația de tensiuni (2.4^o) a circuitului de excitație scrisă sub formă operațională pentru cazul cînd $U_f=0$:

$$r_f \tilde{I}_f(p) + p \tilde{\Psi}_f(p) = 0 \quad (2.44)$$

Din ecuația (2.42) scoatem pe $\tilde{I}_f(p)$:

$$\tilde{I}_f(p) = \frac{\tilde{\Psi}_d(p) - \tilde{X}_{d0}(p)\tilde{I}_d(p)}{\tilde{X}_{df}(p)}$$

Introducînd expresia lui $\tilde{I}_f(p)$ în ecuația (2.43) obținem:

$$\tilde{\Psi}_f(p) = \tilde{X}_{df}(p)\tilde{I}_d(p) + \tilde{X}_{f0}(p) \frac{\tilde{\Psi}_d(p) - \tilde{X}_{d0}(p)\tilde{I}_d(p)}{\tilde{X}_{df}(p)}$$

Cu aceste valori pentru $\tilde{I}_f(p)$ și $\tilde{\Psi}_f(p)$, ecuația (2.44) devine:

$$r_f \frac{\tilde{\Psi}_d(p) - \tilde{X}_{d0}(p)\tilde{I}_d(p)}{\tilde{X}_{df}(p)} + p \tilde{X}_{df}(p)\tilde{I}_d(p) + p \tilde{X}_{f0}(p) \frac{\tilde{\Psi}_d(p) - \tilde{X}_{d0}(p)\tilde{I}_d(p)}{\tilde{X}_{df}(p)} = 0$$

Aducînd la formă simplă relația de mai sus, obținem

$$\tilde{\Psi}_d(p) = \tilde{X}_{d0}(p) + p \frac{\tilde{X}_{df}^2(p)}{r_f + p \tilde{X}_{f0}(p)} \tilde{I}_d(p) \quad (2.45)$$

Dacă notăm:

$$\tilde{X}_d(p) = \tilde{X}_{d0}(p) + p \frac{\tilde{X}_{df}^2(p)}{r_f + p \tilde{X}_{f0}(p)} \quad (2.46)$$

ecuația (2.45) devine:

$$\tilde{\Psi}_d(p) = \tilde{X}_d(p) \cdot \tilde{I}_d(p) \quad (2.47)$$

unde $\tilde{X}_d(p)$ reprezintă rezistența operațională după axa longitudinală.

Se observă că în expresia acestei reactanțe operaționale intervin reactanțele $\tilde{X}_{do}(p)$, $\tilde{X}_{fo}(p)$, $\tilde{X}_{df}(p)$ care au fost definite din regimurile particulare studiate anterior și care, se pot determina practic, determinându-se în prealabil coeficienții ce intră în expresiile acestora.

2.4. Caracteristici de frecvență corespunzătoare reactanțelor operaționale: [38] [39] [40] [46] [49] [64]

Dacă în expresia reactanțelor operaționale, se înlocuiește variabila complexă "p" cu variabila imaginară "js" se obține caracteristica de frecvență.

Dacă rotorul se rotește cu alunecarea constantă s, bobinajul indusului se caracterizează prin impedanța : $R_a + j\bar{X}_q(js)$, după axa transversală, respectiv prin impedanța : $R_a + j\bar{X}_d(js)$ după axa longitudinală.

Mărimile $\bar{X}_q(js)$ și $\bar{X}_d(js)$ se numesc reactanțe în complex sau caracteristicile de frecvență ale reactanțelor operaționale.

Dacă în expresiile reactanțelor operaționale obținute la paragraful 2.3., se înlocuiește variabila "p" cu variabila "js" obținem reactanțele corespunzătoare în complex.

Astfel, dacă se consideră reactanța operațională după axa transversală dată de relația (2.31), înlocuind variabila "p" cu "js" obținem reactanța în complex după axa transversală:

$$\bar{X}_q = x_q \frac{1 + js T_q \sqrt{\sigma_{dq}}}{1 + js T_q} \quad (2.46)$$

La fel se obțin reactanțele în complex \bar{X}_{do} , \bar{X}_{fo} și \bar{X}_{df} ; din relațiile (2.34), (2.39) și (2.37):

$$\bar{X}_{do} = x_d \frac{1 + js T_D \sqrt{\sigma_{dD}}}{1 + js T_D} \quad (2.49)$$

$$\bar{X}_{fo} = x_f \frac{1 + js T_D \sqrt{\sigma_{fD}}}{1 + js T_D} \quad (2.50)$$

$$\bar{X}_{df} = x_{df} \frac{1 + js T_D \mu_D}{1 + js T_D} \quad (2.51)$$

Aceste expresii în complex ale reactanțelor se pot scrie și în alt mod separînd partea reală de partea imaginară:

$$\bar{x}_q = x_q \frac{1 + js T_q \check{V}_{q0}}{1 + js T_q} = x_q \left[\frac{1 + (sT_q)^2 \check{V}_{q0}}{1 + (sT_q)^2} - j \frac{s T_q \check{C}_{q0}}{1 + (sT_q)^2} \right]$$

$$\bar{x}_{d0} = x_d \frac{1 + js T_D \check{V}_{dD}}{1 + js T_D} = x_d \left[\frac{1 + (sT_D)^2 \check{V}_{dD}}{1 + (sT_D)^2} - j \frac{s T_D \check{C}_{dD}}{1 + (sT_D)^2} \right]$$

$$\bar{x}_{f0} = x_f \frac{1 + js T_D \check{V}_{fD}}{1 + js T_D} = x_f \left[\frac{1 + (sT_D)^2 \check{V}_{fD}}{1 + (sT_D)^2} - j \frac{s T_D \check{C}_{fD}}{1 + (sT_D)^2} \right]$$

$$\bar{x}_{df} = x_{df} \frac{1 + js T_D u_D}{1 + js T_D} = x_{df} \left[\frac{1 + (sT_D)^2 u_D}{1 + (sT_D)^2} - j \frac{s T_D \check{C}_D}{1 + (sT_D)^2} \right]$$

Pentru cazul particular cînd rotorul este blocat, adică $s=1$, părțile reale ale acestor expresii capătă următoarea formă:

$$R_e \bar{x}_q (s=1) = x_q \frac{1 + T_q^2 \check{V}_{q0}}{1 + T_q^2} \cong x_q \check{V}_{q0} = x_q'' \quad (2.52)$$

$$R_e \bar{x}_{d0} (s=1) = x_d \frac{1 + T_D^2 \check{V}_{dD}}{1 + T_D^2} \cong x_d \check{V}_{dD} = x_d'' \quad (2.53)$$

$$R_e \bar{x}_{f0} (s=1) = x_f \frac{1 + T_D^2 \check{V}_{fD}}{1 + T_D^2} \cong x_f \check{V}_{fD} \quad (2.54)$$

$$R_e \bar{x}_{df} (s=1) = x_{df} \frac{1 + T_D^2 u_D}{1 + T_D^2} \cong x_{df} u_D \quad (2.55)$$

La scrierea relațiilor de mai sus s-a ținut cont de faptul că sînt îndeplinite condițiile:

$$T_D^2 \gg 1 \quad \text{și} \quad T_q^2 \gg 1$$

2.5. Ecuațiile curenților la pornire în asincron a mașinii sincrone

Studiul regimurilor asincrone ale mașinii sincrone este foarte complicat atât timp cât viteza este variabilă, procesul tranzitoriu mecanic suprapunându-se peste procesul tranzitoriu electromagnetic.

Ecuațiile diferențiale sînt neliniare ceea ce face în cazul general să nu poată fi soluționată decît numeric.

Pentru simplificarea problemei, se ține cont de faptul că la conectarea mașinii sincrone la rețea, procesele electromagnetice se desfășoară cu o viteză mult mai mare în raport cu procesele mecanice și se poate considera că la un moment dat turația deci și alunecarea este constantă.

2.5.1. Ecuațiile de bază cu considerarea alunecării constante

Analiza fenomenelor ce au loc la conectarea înfișurării indusului mașinii sincrone la sursa de tensiune, se face pe baza ecuațiilor de tensiuni (2.1)-(2.4).

Dacă $s=ct.$, atunci unghiul θ are expresia:

$$\theta = (1-s)t + \theta_0$$

deci: $\frac{d\theta}{dt} = 1-s.$

Ecuațiile de tensiuni (2.1)-(2.4) devin:

$$\frac{d\psi_d}{dt} - (1-s)\psi_q + r_a i_d = u_d \quad (2.56)$$

$$\frac{d\psi_q}{dt} + (1-s)\psi_d + r_a i_q = u_q \quad (2.57)$$

$$\frac{d\psi_f}{dt} - r_f i_f = u_f \quad (2.58)$$

Pentru $s=ct.$, ecuațiile de tensiuni devin liniare și prin urmare pentru rezolvarea lor se poate aplica principiul superpoziției. Pentru o mașină sincronă trifazată scriem ecuațiile de tensiuni sub forma:

$$\begin{aligned}
 u_a &= U_n \cos t \\
 u_b &= U_n \cos\left(t - \frac{2\pi}{3}\right) \\
 u_c &= U_n \cos\left(t + \frac{2\pi}{3}\right)
 \end{aligned} \tag{2.59}$$

Tensiunea de excitație în unități relative este:

$$u_f = U_f$$

Pentru $s=ct.$, unghiul θ este dat de relația:

$$\theta = (1-s)t + \theta_0$$

Exprimăm acum tensiunea de alimentare în coordonate d, q, o și obținem:

$$\begin{aligned}
 u_d &= \frac{2}{3} U_n \left[\cos t \cos \theta + \cos\left(t - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \right. \\
 &\quad \left. + \cos\left(t + \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \\
 u_d &= U_n \cdot \cos(st - \theta_0)
 \end{aligned} \tag{2.60}$$

$$\begin{aligned}
 u_q &= -\frac{2}{3} U_n \left[\cos t \sin \theta + \cos\left(t - \frac{2\pi}{3}\right) \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \right. \\
 &\quad \left. + \cos\left(t + \frac{2\pi}{3}\right) \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \\
 u_q &= U_n \sin(st - \theta_0)
 \end{aligned} \tag{2.61}$$

$$u_o = \frac{1}{3} U_n \left[\cos t + \cos\left(t - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] = 0$$

Deci în sistemul de axe d, q sistemul de tensiuni trifazate simetrice $u_a; u_b; u_c$ se transformă într-un sistem de tensiuni bifazat cu frecvența S .

Aplicind principiul suprapoziției, sistemul de ecuații (2.56)-(2.57) se împarte în două subsisteme. Astfel în prima fază considerăm că doar înfăgurarea indusului este alimentată, înfăgurarea de excitație fiind scurtcircuitată, avînd de-a face cu o pornire în asincron cu rotorul în scurtcircuit.

Ecuațiile ce caracterizează procesul de pornire în asincron cu înfăgurarea de excitație scurtcircuitată sînt:

$$\frac{d\psi_d}{dt} - (1-s)\psi_q + r_a i_d = u_d$$

$$\frac{d\psi_g}{dt} + (1-s)\psi_d + r_a i_g = u_g \quad (2.62)$$

$$\frac{d\psi_f}{dt} + r_f i_f = 0$$

În a doua etapă considerăm că numai înfășurarea de excitație este alimentată, înfășurarea indusului fiind scurtcircuitată.

Ecuațiile ce determină funcționarea mașinii în această situație sînt următoarele:

$$\frac{d\psi_d}{dt} - (1-s)\psi_q + r_a i_d = 0$$

$$\frac{d\psi_g}{dt} + (1-s)\psi_d - r_a i_g = 0 \quad (2.63)$$

$$\frac{d\psi_f}{dt} + r_f i_f = u_f$$

Însumînd procesele ce au loc în cele două cazuri particulare obținem procesul complex al pornirii mașinii asincronă. În cadrul lucrării de față considerăm doar cazul pornirii în asincron cu rotorul în gol, sau scurtcircuitat.

Introducem vectorii complexi, reprezentativi \bar{U}_d și \bar{U}_q a căror parte reală reprezintă chiar tensiunile u_d și u_q , adică:

$$u_d = R_e \bar{U}_d = U_n \cos(st - \theta_0)$$

$$u_q = R_e \bar{U}_q = U_n \sin(st - \theta_0)$$

Curenții care se stabilesc în indus și în înfășurarea de excitație se reprezintă prin vectorii complexi \bar{I}_d , \bar{I}_q , \bar{I}_f a căror parte reală o constituie funcțiile de timp i_d , i_q și i_f .

De asemenea, fluxurile magnetice ser reprezintă prin vectorii complexi $\bar{\Psi}_d$, $\bar{\Psi}_q$, $\bar{\Psi}_f$.

Ecuațiile de tensiuni (2.62) scrise sub formă vectorială au forma următoare:

$$\begin{aligned} js\bar{\Psi}_d - (1-s)\bar{\Psi}_q + r_a \bar{I}_d &= \bar{U}_d \\ js\bar{\Psi}_q + (1+s)\bar{\Psi}_d + r_a \bar{I}_q &= \bar{U}_q \\ js\bar{\Psi}_f + r_f \bar{I}_f &= 0 \end{aligned} \quad (2.64)$$

Ecuațiile de fluxuri se pot scrie sub următoarea formă:

$$\begin{aligned}\bar{\Psi}_d &= \bar{X}_{do}\bar{I}_d + \bar{X}_{df}\bar{I}_f \\ \bar{\Psi}_q &= \bar{X}_q\bar{I}_q \\ \bar{\Psi}_f &= \bar{X}_{df}\bar{I}_d + \bar{X}_{fo}\bar{I}_f\end{aligned}\quad (2.65)$$

Din sistemul de ecuații (2.65) obținem:

$$\bar{I}_f = \frac{\bar{\Psi}_d - \bar{X}_{do}\bar{I}_d}{\bar{X}_{df}}$$

$$\bar{\Psi}_f = \bar{X}_{df}\bar{I}_d + \bar{X}_{fo} \frac{\bar{\Psi}_d - \bar{X}_{do}\bar{I}_d}{\bar{X}_{df}}$$

Introducând pe \bar{I}_f și $\bar{\Psi}_f$ în ultima ecuație a sistemului (2.64) obținem o relație directă între $\bar{\Psi}_d$ și \bar{I}_d :

$$\bar{\Psi}_d = \bar{X}_{do} - jS \frac{\bar{x}_{df}^2}{r_f + jS \bar{X}_{fo}} \bar{I}_d \quad (2.66)$$

Ecuația (2.66) se poate scrie sub forma:

$$\bar{\Psi}_d = \bar{X}_d \cdot \bar{I}_d \quad (2.67)$$

unde \bar{X}_d reprezintă reactanța în complex a mașinii sincrone după axa longitudinală.

$$\bar{X}_d = \bar{X}_{do} - jS \frac{\bar{x}_{df}^2}{r_f + jS \bar{X}_{fo}} \quad (2.6b)$$

Reactanța în complex \bar{X}_d se poate deci determina în funcție de reactanțele complexe \bar{X}_{do} ; \bar{X}_{df} ; \bar{X}_{fo} care la rîndul lor se pot calcula cu ajutorul relațiilor cunoscute (2.49)-(2.52).

Introducînd valorile reactanțelor \bar{X}_{do} ; \bar{X}_{df} ; \bar{X}_{fo} date de relațiile (2.49)-(2.51) în relația (2.6b) obținem:

$$\bar{X}_d = \bar{x}_d \frac{S^2 T_f \cdot T_D \bar{V}_{dfD} - jS(T_f \bar{V}_{df} + T_D \bar{V}_{dD}) - 1}{S^2 T_f \cdot T_D \bar{V}_{fD} - jS(T_f + T_D) - 1} \quad (2.69)$$

În expresia reactanței complexe \bar{X}_d intervine coeficientul de dispersie global \bar{V}_{dfD} a cărui valoare este dată de relația

(2.10) din [04]

$$\checkmark_{dfD} = 1 - \frac{x_d \cdot x_f^2 + x_f \cdot x_d^2 + x_d \cdot x_d^2 - 2x_{df} \cdot x_{df} \cdot x_{df}}{x_d \cdot x_f \cdot x_D} \quad (2.70)$$

Curba hodograf a vectorului \bar{X}_d este dată în fig.2.3.

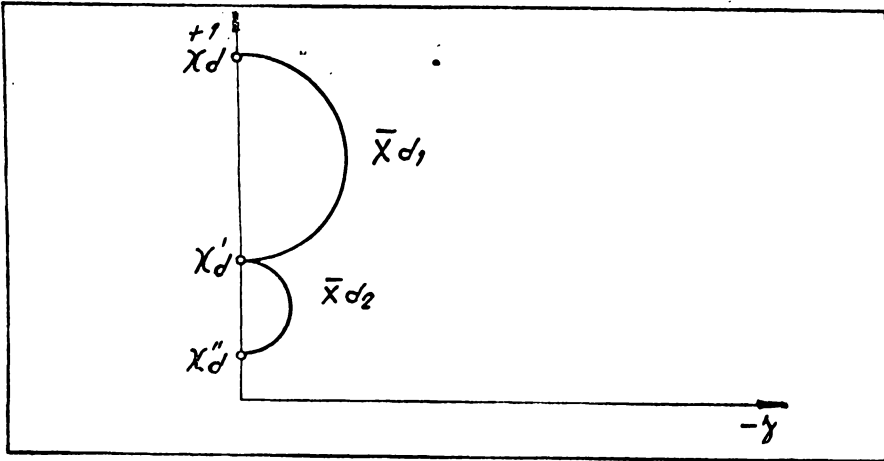


Fig.2.3. Curba hodograf a vectorului \bar{X}_d .

Pentru valori foarte mici ale alunecării "s" în expresia reactanței complexe \bar{X}_d se pot neglija termenii "s²" și locul geometric al lui \bar{X}_d devine un cerc. În acest caz reactanța complexă devine:

$$\bar{X}_{d1} = x_d \frac{1 + js(T_f \checkmark_{df} + T_D \checkmark_{dD})}{1 + js(T_f + T_D)} \cong x_d \frac{1 + js T_f \checkmark_{df}}{1 + js T_f} \quad (2.71)$$

Această simplificare devine posibilă întrucât $T_D \ll T_f$, infășurarea de excitație fiind scurtcircuitată.

Dacă infășurarea de excitație este conectată pe o rezistență de 10 ori mai mare decât rezistența infășurării de excitație, atunci constanta de timp T_f se micșorează de 10 ori și în acest caz nu mai este posibilă simplificarea de mai sus.

Punctul de pe locul geometric al vectorului complex \bar{X}_{d1} , corespunzător $S = \infty$ ne dă reactanța subtranszitorie X_d' :

$$\bar{X}_d'(S = \infty) = x_d \frac{T_d \checkmark_{df} + T_D \checkmark_{dD}}{T_f + T_D} \cong x_d \checkmark_{df} = x_d'$$

Pentru valori mai mari ale alunecării S, în expresia

reactanței în complex \bar{X}_d se pot neglija termenii în 1 și în acest caz reactanța complexă longitudinală devine:

$$\bar{X}_{d2} = x_d \frac{1 + js \frac{1}{T_f \bar{\sigma}_f + T_D \bar{\sigma}_D}}{1 + js \frac{1}{T_f \bar{\sigma}_{fD} + T_D \bar{\sigma}_{fD}}} \approx x_d \frac{1 + js T_D \bar{\sigma}_D''}{1 + js T_D \bar{\sigma}_{fD}} \quad (2.72)$$

Pentru $S = \infty$ obținem:

$$X_{d2}(S = \infty) = x_d \cdot \bar{\sigma}_D'' = x_d''$$

Cunoscând reactanțele complexe X_d , X_q putem rezolva sistemul de ecuații (2.64) în care introducem:

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}_d &= \bar{X}_d \cdot \bar{I}_d \\ \bar{\Psi}_q &= \bar{X}_q \cdot \bar{I}_q \end{aligned} \quad (2.73)$$

obținem sistemul:

$$\begin{aligned} (js X_d + r_a) \bar{I}_d - (1-s) \bar{I}_q &= \bar{U}_d \\ (1-s) \bar{X}_d \cdot \bar{I}_d + (r_a + js \bar{X}_q) \bar{I}_q &= \bar{U}_q \end{aligned} \quad (2.74)$$

Din acest sistem putem determina curenții \bar{I}_d și \bar{I}_q în funcție de parametri mașinii \bar{X}_d ; \bar{X}_q și tensiunile U_d ; U_q .

Pentru determinarea curentului de excitație se consideră ecuațiile:

$$\begin{aligned} js \bar{\Psi}_f + r_f \bar{I}_f &= 0 \\ \bar{\Psi}_f &= \bar{X}_{df} \bar{I}_d + \bar{X}_{fo} \bar{I}_f \end{aligned}$$

de unde rezultă expresia curentului de excitație:

$$\bar{I}_f = - \frac{js \bar{X}_{df}}{r_f + js \bar{X}_{fo}} \bar{I}_d \quad (2.75)$$

Am obținut astfel curentul care se stabilește în înfăgurarea de excitație scurtcircuitată în funcție de curentul statoric.

Deci înfăgurarea de excitație este deschisă, atunci tensiunea la bornele ei este:

$$\bar{U}_f = jS \bar{\Psi}_f = jS \bar{X}_{df} \cdot \bar{I}_d \quad (2.76)$$

La rezolvarea sistemului de ecuații (2.74) se ține cont de faptul că în coordonate d, q tensiunile de alimentare se pot scrie sub forma:

$$u_d = R_e \bar{U}_d = U_n \cos(St - \theta_0)$$

$$u_q = R_e \bar{U}_q = U_n \sin(St - \theta_0)$$

Rezultă că în cazul alimentării indusului mașinii sincrone cu un sistem simetric de tensiuni, se poate scrie următoarea relație între \bar{U}_d și \bar{U}_q :

$$\bar{U}_q = -j\bar{U}_d \quad (2.77)$$

Introducând relația (2.77) în ecuațiile (2.74) obținem următorul sistem de ecuații:

$$\begin{aligned} (r_a + jS \bar{X}_d) \bar{I}_d - (1-S) \bar{X}_q \cdot \bar{I}_q &= \bar{U}_d \\ (1-S) \bar{X}_d \cdot \bar{I}_d + (r_a + jS \bar{X}_q) \bar{I}_q &= \bar{U}_q \end{aligned} \quad (2.78)$$

Rezolvând sistemul (2.78) în raport cu \bar{I}_d și \bar{I}_q obținem:

$$\bar{I}_d = \frac{\begin{vmatrix} \bar{U}_d & -(1-S)\bar{X}_q \\ -j\bar{U}_d & r_a + jS \bar{X}_q \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} r_a + jS \bar{X}_d & -(1-S)\bar{X}_q \\ (1-S)\bar{X}_d & r_a + jS \bar{X}_q \end{vmatrix}} = \frac{r_a + jS \bar{X}_q (2S-1)}{r_a^2 + (1-2S)\bar{X}_d \bar{X}_q + j r_a \cdot S (\bar{X}_d + \bar{X}_q)} \bar{U}_d$$

Împărțind expresia curentului \bar{I}_d prin $(2S-1)$ obținem:

$$\bar{I}_d = \frac{\frac{r_a}{2S-1} + j \bar{X}_q}{\frac{r_a^2}{2S-1} - \bar{X}_d \bar{X}_q + j \frac{S r_a}{2S-1} (\bar{X}_d + \bar{X}_q)} \bar{U}_d \quad (2.79)$$

Rezolvând sistemul (2.78) în raport cu \bar{I}_q obținem în mod analog:

$$\bar{I}_q = \frac{\frac{r_a}{2S-1} + j \bar{X}_d}{\frac{r_a^2}{2S-1} - \bar{X}_d \bar{X}_q + j \frac{S r_a}{2S-1} (\bar{X}_d + \bar{X}_q)} \bar{U}_d \quad (2.80)$$

Corespunzător ecuațiilor curenților (2.79) și (2.80) putem construi schema echivalentă din fig.2.4.

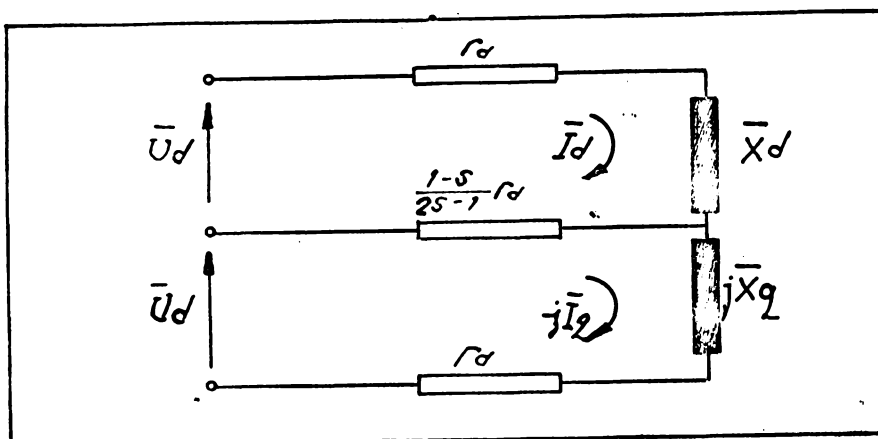


Fig.2.4

Această schemă poate sta la baza analizei și calculului curenților în regim asincron stabilizat în cazul alimentării indusului cu un sistem simetric de tensiuni.

Elementele schemei (\bar{X}_d și \bar{X}_q) sînt reactanțele complexe longitudinală și transversală.

Schema echivalentă este constituită din două ochiuri de rețea alimentate fiecare cu tensiunea \bar{U}_d , avînd în brațul comun rezistența $\frac{1-s}{2s-1} r_a$ unde r_a este rezistența de fază a indusului mașinii.

Curenții ciclici corespunzători celor două contururi sînt tocmai curenții " \bar{I}_d " și " $j\bar{I}_q$ ".

Din schema echivalentă se observă că, pentru $s=1$, curenții devin:

$$\bar{I}_d(s=1) = \frac{\bar{U}_d}{r_a + j\bar{X}_d(s=1)}$$

$$j\bar{I}_q(s=1) = \frac{\bar{U}_d}{r_a + j\bar{X}_q(s=1)}$$

(2.81)

Pentru $s=0,5$ curenții prin cele două contururi devin egali:

$$\bar{I}_d(s=0,5) = \bar{I}_q(s=0,5) = \frac{\bar{U}_d}{r_a + \frac{\bar{X}_d(s=0,5) + \bar{X}_q(s=0,5)}{2}} \quad (2.82)$$

2.5.2. Relatii simplificite pentru calculul curentilor

Analiza dependentei componentelor \bar{I}_d și \bar{I}_q a curentului functie de alunecarea "s" pe baza relatiilor (2.79)-(2.80) este destul de complicata. Pentru masinile de putere mare, se poate considera că rezistența infuzurării inductorului r_a este neglijabilă în raport cu reactanțele \bar{X}_d și \bar{X}_q . În aceste condiții ($r_a=0$) relatiile de calcul al curentilor (2.79) și (2.80) se simplifică și devin:

$$\bar{I}_d = \frac{\bar{U}_d}{j \bar{X}_q} \quad ; \quad j \bar{I}_q = \frac{\bar{U}_d}{j \bar{X}_d} \quad (2.83)$$

Se observă deci că locul geometric al curentilor este inversul locului geometric al reactanțelor (fig.2.5).

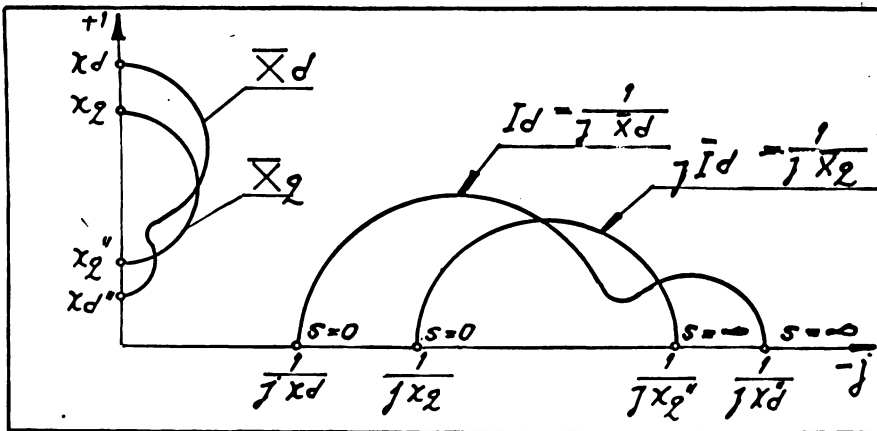


Fig.2.5. Reprezentarea grafică a curentilor \bar{I}_d, \bar{I}_q și a reactanțelor în complex \bar{X}_d, \bar{X}_q .

2.6. Cușul electromagnetic la pornirea în asincron a mașinii sincrone [7] [8]

În cazul în care mașina sincronă este conectată la o rețea cu tensiuni simetrice trifazate, rotorul fiind scurtcircuitat, curentii și fluxurile sînt niște vectori de formă:

$$\bar{I}_d = I_d e^{j(\omega t + \alpha_d)}$$

$$\begin{aligned}\bar{i}_d &= I_d \cdot e^{j(St + \alpha_d)} \\ \bar{\psi}_d &= \psi_d \cdot e^{j(St + \beta_d)} \\ \bar{\psi}_q &= \psi_q \cdot e^{j(St + \beta_q)}\end{aligned}\quad (2.83)$$

unde $\alpha_d; \alpha_q; \beta_d; \beta_q$ sînt unghiurile pe care vectorii respectivi ai curenților și fluxurilor le fac cu axa reală din planul complex.

Valorile momentane ale funcțiilor de timp ale curenților și fluxurilor magnetice vor fi:

$$\begin{aligned}i_d &= R_e \bar{i}_d = I_d \cos(St + \alpha_d) \\ i_q &= R_e \bar{i}_q = I_q \cos(St + \alpha_q) \\ \psi_d &= R_e \bar{\psi}_d = \psi_d \cos(St + \beta_d) \\ \psi_q &= R_e \bar{\psi}_q = \psi_q \cos(St + \beta_q)\end{aligned}\quad (2.85)$$

Dacă în relația cunoscută a cuplului electromagnetic:

$$m_e = \frac{3}{2} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (2.86)$$

înlocuim curenții și fluxurile prin expresiile lor date de relațiile (2.85), obținem:

$$\begin{aligned}m_e &= \frac{1}{2} \left\{ \psi_d I_q \left[\cos(\beta_d - \beta_q) + \cos(2St + \beta_d + \alpha_q) \right] - \right. \\ &\quad \left. - \psi_q I_d \left[\cos(\beta_q - \alpha_d) + \cos(2St + \beta_q + \alpha_d) \right] \right\} \quad (2.87)\end{aligned}$$

Expresia (2.87) a cuplului electromagnetic se poate descompune în două componente: o componentă continuă m_e și o componentă alternativă m_p . Componenta continuă m_e reprezintă cuplul asincron și este egală cu valoarea medie a cuplului electromagnetic m_e dat de relația (2.87) în intervalul de la $2St=0$ la $2St=2\pi$ adică de la $t=0$ pînă la $t=\frac{T}{S}$.

Avem deci:
$$M_a = \frac{S}{\pi} \int_0^{\pi} m_e dt$$

Inlocuind in relatia de mai sus expresia cuplului electromagnetic (2.67) obtinem pentru cuplul asincron :

$$M_a = \frac{1}{2} \left[\psi_d I_q \cos(\beta_d - \alpha_q) - \psi_q I_d \cos(\beta_q - \alpha_d) \right] \quad (2.68)$$

Componenta alternativă m_p poate fi scrisă sub următoarea formă:

$$m_p = \frac{1}{2} \left[\psi_d I_q \cos(2st + \beta_d + \alpha_q) - I_d \psi_q \cos(2st + \beta_q + \alpha_d) \right]$$

$$m_p = M_p \cos(2st + \delta_p) \quad (2.69)$$

unde :

$$M_p = \frac{1}{2} \sqrt{(\psi_d I_q)^2 + (\psi_q I_d)^2 - 2\psi_d \psi_q I_d I_q \cos[\beta_d - \beta_q - (\alpha_d - \alpha_q)]}$$

$$\delta_p = \arctg \frac{\psi_d I_q \sin(\beta_d + \alpha_q) - \psi_q I_d \sin(\beta_q + \alpha_d)}{\psi_d I_q \cos(\beta_d + \alpha_q) - \psi_q I_d \cos(\beta_q + \alpha_d)}$$

Dacă ținem cont de faptul că funcțiile de timp i_d, i_q, ψ_d, ψ_q , se pot scrie în funcție de vectorii complexi și de vectorii complexi conjugați în felul următor:

$$i_d = \frac{1}{2}(\bar{i}_d + \bar{i}_d^*) \quad i_q = \frac{1}{2}(\bar{i}_q + \bar{i}_q^*)$$

$$\psi_d = \frac{1}{2}(\bar{\psi}_d + \bar{\psi}_d^*) \quad \psi_q = \frac{1}{2}(\bar{\psi}_q + \bar{\psi}_q^*)$$

relația generală (2.66) de calcul a cuplului electromagnetic devine:

$$m_e = \frac{1}{4} (\bar{\psi}_d \bar{i}_q + \bar{\psi}_d^* \bar{i}_q^* + \bar{\psi}_d \bar{i}_q^* + \bar{\psi}_d^* \bar{i}_q - \bar{\psi}_q \bar{i}_d - \bar{\psi}_q^* \bar{i}_d^* - \bar{\psi}_q \bar{i}_d^* - \bar{\psi}_q^* \bar{i}_d)$$

$$(2.90)$$

$$m_e = \frac{1}{2} R_e (\bar{\psi}_d \bar{i}_q + \bar{\psi}_d \bar{i}_q^* - \bar{\psi}_q \bar{i}_d - \bar{\psi}_q \bar{i}_d^*)$$

În expresia cuplului electromagnetic (2.90) intră și doi termeni care reprezintă produsul dintre vectorul fluxului magnetic și vectorul complex conjugat al curentului.

Având în vedere expresiile (2.84) ale curentului și ale fluxului, rezultă că cei doi termeni nu depind de timp și deci ei vor reprezenta cuplul asincron al mașinii, adică:

$$M_a = \frac{1}{2} R_e (\overline{\Psi}_d \overline{I}_q^* - \overline{\Psi}_q \overline{I}_d^*) \quad (2.91)$$

Se observă că relația de calcul a cuplului asincron (2.91) este identică cu cea obținută anterior, relația (2.88).

Ceilalți doi termeni ai cuplului electromagnetic dați de relația (2.90) vor reprezenta cuplul pulsatoriu:

$$M_p = \frac{1}{2} R_e (\overline{\Psi}_d \overline{I}_q - \overline{\Psi}_q \overline{I}_d) \quad (2.92)$$

Această expresie este identică cu cea dată de relația (2.89) și reprezintă o funcție cosinusoidală având argumentul egal cu dublul frecvenței tensiunii de alimentare.

2.6.1. Relații de calcul al cuplului asincron pentru mașini de putere mare.

În cazul mașinilor de putere mare, putem considera cu suficientă precizie că rezistența unei faze este neglijabilă, deci putem scrie $r_a = 0$.

În acest caz, relația (2.91) devine:

$$M_a = \frac{1}{2} R_e \left(-\overline{X}_d \frac{\overline{U}_d}{j\overline{X}_d} \cdot \frac{\overline{U}_d^*}{\overline{X}_q^*} - \overline{X}_q \frac{\overline{U}_d}{\overline{X}_q} \cdot \frac{\overline{U}_d^*}{j\overline{X}_d^*} \right) \quad (2.93)$$

Dacă ținem cont de faptul că pentru un număr complex Z se poate scrie relația:

$$R_e \left(\frac{1}{jZ^*} \right) = -I_m \left(\frac{1}{Z} \right)$$

rezultă că relația (2.93) se poate scrie și sub forma următoare:

$$M_a = \frac{U^2}{2} I_m \left(\frac{1}{\overline{X}_d} + \frac{1}{\overline{X}_q} \right) \quad (2.94)$$

Deci momentul asincron " M_a " se poate determina cunoscând, în prealabil reactanțele \overline{X}_d și \overline{X}_q .

Pentru a determina expresia componentei pulsatorii a cuplului electromagnetic, in expresia (2.89) introducem curentii și fluxurile determinati la paragraful 2.5, și anume:

$$\bar{I}_d = \frac{\bar{U}_d}{jX_d} ; \quad j\bar{I}_q = \frac{\bar{U}_d}{jX_q}$$

$$\bar{\Psi}_d = \bar{X}_d \bar{I}_d ; \quad \bar{\Psi}_q = \bar{X}_q \bar{I}_q$$

Obținem astfel pentru cuplul pulsatoriu m_p expresie:

$$m_p = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left(-\bar{X}_d \frac{\bar{U}_d}{jX_d} \cdot \frac{\bar{U}_d}{X_q} + \bar{X}_q \frac{\bar{U}_d}{X_q} \frac{\bar{U}_d}{jX_d} \right)$$

sau:

$$m_p = \frac{U^2}{2} I_m \left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_q} \right) e^{j2(st-\theta_0)}$$

Dacă scriem:

$$\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_q} = \left| \frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_q} \right| e^{j.2.\alpha_x}$$

Obținem:

$$m_p = m_p \cdot \sin 2(st-\theta_0-\alpha_x) \quad (2.95)$$

$$\text{unde: } k_p = \frac{U^2}{2} \left| \frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_q} \right|$$

Rezultă că modulul $m_p(s)$ al cuplului (asincron) pulsatoriu se poate determina ușor dacă se cunosc reactanțele \bar{X}_d și \bar{X}_q .

În regim sincron, pentru $s=0$, avem:

$$\bar{X}_d(s=0) = X_d$$

$$\bar{X}_q(s=0) = X_q$$

$$\alpha_x = 0$$

Cuplul pulsatoriu în acest caz devine;

$$m_p = -\frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_q} \right) \sin \theta_0$$

2.6.2. Cuplul asincron la pornirea masinibisincrone cu rotorul deschis

Considerăm o mașină sincronă cu înfășurarea de excitație deschisă. La conectarea înfășurării incusului la un sistem de tensiuni simetrice trifazat, apare un cuplu asincron T_a a cărui expresie este dată de relația (2.94):

$$T_a = \frac{U^2}{2} I_m \left(\frac{1}{X_{do}} + \frac{1}{X_q} \right)$$

unde reactanțele \bar{X}_{do} și \bar{X}_q au expresiile date de relațiile (2.4c)-(2.49):

$$\bar{X}_{do} = x_d \frac{1 + js T_D \sqrt{V_{dd}}}{1 + js s T_D}$$

$$\bar{X}_q = x_q \frac{1 + js T_Q \sqrt{V_{qq}}}{1 + js s T_Q}$$

Determinăm partea imaginară a inversului acestor reactanțe:

$$\begin{aligned} I_m \left(\frac{1}{\bar{X}_{do}} \right) &= I_m \left(\frac{1}{x_d} \cdot \frac{1 + js s T_D}{1 + js T_D \sqrt{V_{dd}}} \right) = I_m \frac{1 + \sqrt{V_{dd}} (T_D \cdot s)^2 + js T_D (1 - \sqrt{V_{dd}})}{1 + (s T_D \sqrt{V_{dd}})^2} = \\ &= \frac{s T_D (1 - \sqrt{V_{dd}})}{1 + (s T_D \sqrt{V_{dd}})^2} = \left(\frac{1}{x_d \sqrt{V_{dd}}} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{s T_D \sqrt{V_{dd}}}{(1 + s T_D \sqrt{V_{dd}})^2} \quad (2.96) \end{aligned}$$

$$I_m \left(\frac{1}{\bar{X}_q} \right) = I_m \left(\frac{1}{x_q} \cdot \frac{1 + js s T_Q}{1 + js T_Q \sqrt{V_{qq}}} \right) = I_m \left[\frac{1}{x_q} \cdot \frac{1 + \sqrt{V_{qq}} (T_Q \cdot s)^2 + js T_Q (1 - \sqrt{V_{qq}})}{1 + s T_Q \sqrt{V_{qq}}} \right]$$

$$I_m \left(\frac{1}{\bar{X}_q} \right) = \frac{1}{x_q} \cdot \frac{s T_Q (1 - \sqrt{V_{qq}})}{1 + (s T_Q \sqrt{V_{qq}})^2} = \left(\frac{1}{x_q \sqrt{V_{qq}}} - \frac{1}{x_q} \right) \cdot \frac{s T_Q \sqrt{V_{qq}}}{1 + (s T_Q \sqrt{V_{qq}})^2} \quad (2.97)$$

Dacă se introduc următoarele notații:

$$x_q'' = x_q \sqrt{V_{qq}} ; \quad T_q'' = T_Q \sqrt{V_{qq}} ; \quad s_q'' = \frac{1}{T_q''}$$

$$x_d'' = x_d \sqrt{c_{dD}}; \quad T_d'' = T_d \sqrt{c_{dD}}; \quad S_{d0}'' = \frac{1}{T_{d0}''}$$

obținem:

$$I_m \left(\frac{1}{x_{d0}} \right) = \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{S_d''}{1 + (S_d'')^2}$$

$$I_m \left(\frac{1}{x_q} \right) = \left(\frac{1}{x_q''} - \frac{1}{x_q} \right) \frac{S_q''}{1 + (S_q'')^2}$$

ținând cont de relațiile de mai sus, la pornirea cu înfășurarea de excitație deschisă, cuplul asincron devine:

$$M_a = \frac{U_n^2}{2} \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot \frac{S_d''}{1 + (S_d'')^2} + \left(\frac{1}{x_q''} - \frac{1}{x_q} \right) \cdot \frac{S_q''}{1 + (S_q'')^2} \quad (2.98)$$

Dacă exprimăm pe " M_a " ca o sumă de două componente, obținem:

$$M_a = M_q'' + M_{d0}'' \quad (2.99)$$

unde: M_q'' și M_{d0}'' reprezintă cele două componente ale cuplului asincron datorită înfășurărilor de amortizare:

$$M_q'' = \frac{2 M_q'' \max}{\frac{S_q''}{S} + \frac{S}{S_q''}}$$

(2.100)

$$M_{d0}'' = \frac{2 M_{d0}'' \max}{\frac{S_{d0}''}{S} + \frac{S}{S_{d0}''}}$$

$M_q'' \max$ și $M_{d0}'' \max$ reprezintă valorile maxime ale componentelor cuplului asincron după cele două axe iar S_q'' și S_{d0}'' reprezintă alunecările critice corespunzătoare:

Din (2.98) rezultă:

$$M_q'' \max = \frac{U_n^2}{4} \left(\frac{1}{x_q''} - \frac{1}{x_q} \right) = \frac{U_n^2}{4} \frac{\sqrt{c_{qD}}}{\sqrt{c_{qD}}}$$

(2.101)

$$M_{d0}'' \max = \frac{U_n^2}{4} \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d} \right) = \frac{U_n^2}{4} \cdot \frac{\sqrt{c_{dD}}}{\sqrt{c_{dD}}}$$

În fig.2.6. sînt arătate cum variază grafic cele două componente ale cuplului asincron $M_G''(s)$ și $M_{d0}''(s)$ cît și curba rezultantă $M_G(s)$.

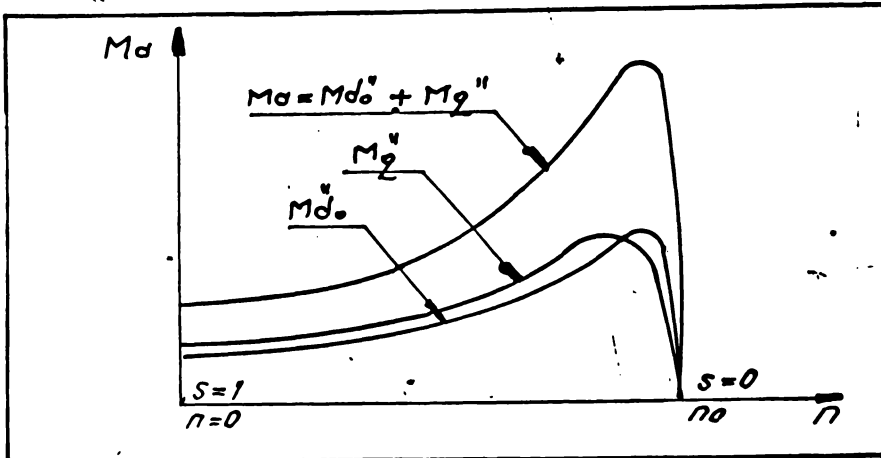


Fig.2.6. Componentele cuplului asincron la pornirea cu infururarea rotorică desensibil.

2.6.3. Cuplul asincron la pornirea mașinii sincrone cu rotorul în scurtcircuit

Dacă infururarea de excitație este scurtcircuitată, pentru calculul cuplului asincron la pornirea directă a mașinii la rețea, utilizăm relația cunoscută:

$$x_d = \frac{j^2}{2} I_m \left(\frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_c} \right)$$

unde, conform (2.69) avem:

$$\frac{1}{X_d} = x_d \frac{s^2 T_f T_D \sqrt{V_{dfD}} - j s (T_f \sqrt{V_{dfD}} + T_D \sqrt{V_{dD}}) - 1}{s^2 T_f T_D \sqrt{V_{fD}} - j s (T_f + T_D) - 1}$$

Dacă calculăm inversul lui X_d obținem:

$$\frac{1}{X_d} = \frac{1}{x_d} \cdot \frac{(1 + j s T_{d0})(1 + j s T_{d0}'')}{(1 + j s T_d')(1 + j s T_d'')} \quad (2.102)$$

unde constantele de timp T_{d0} ; T_{d0}'' ; T_d' ; T_d'' luate cu semn schimbat sînt inversele rădăcinilor numărătorului și a numitorului expre-

siei $\frac{1}{X_d}$, adică:

$$\frac{1}{T_{do}} ; \frac{1}{T_{do}''} = \frac{1}{2\sqrt{fD}} \left[\left(\frac{1}{T_f} + \frac{1}{T_D} \right) \mp \sqrt{\left(\frac{1}{T_f} + \frac{1}{T_D} \right)^2 - \frac{4\sqrt{fD}}{T_f \cdot T_D}} \right] \quad (2.103)$$

$$\frac{1}{T_d''} ; \frac{1}{T_d''} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{T_f \sqrt{f}} - \frac{1}{T_D \sqrt{D}} \right) \mp \sqrt{\left(\frac{1}{T_f \sqrt{f}} + \frac{1}{T_D \sqrt{D}} \right)^2 - \frac{4}{T_f T_D \sqrt{fD}}} \right]$$

Dacă expresiile de sub radical le descompunem în serie Taylor și se păstrează numai primii doi termeni, atunci obținem relații mai simple pentru constantele de timp:

$$\begin{aligned} \sqrt{\left(\frac{1}{T_f} + \frac{1}{T_D} \right)^2 - \frac{4\sqrt{fD}}{T_f \cdot T_D}} &= \left(\frac{1}{T_f} + \frac{1}{T_D} \right) \sqrt{1 - \frac{4\sqrt{fD}}{T_f + T_D}} \approx \\ &\approx \left(\frac{1}{T_f} + \frac{1}{T_D} \right) \left(1 - \frac{2\sqrt{fD}}{T_f + T_D} \right) \end{aligned}$$

deci:

$$T_{do} \approx T_f + T_D \quad (2.104)$$

$$\frac{1}{T_{do}''} \approx \frac{1}{T_f \sqrt{fD}} + \frac{1}{T_D \sqrt{fD}} - \frac{1}{T_f + T_D}$$

În mod analog din relațiile (2.103) obținem:

$$T_d'' \approx T_f \sqrt{df} + T_D \sqrt{dD} \quad (2.105)$$

$$\frac{1}{T_d''} = \frac{1}{T_f \sqrt{f}} + \frac{1}{T_D \sqrt{D}} - \frac{1}{T_f \sqrt{df} + T_D \sqrt{dD}}$$

Determinând părțile imaginare ale expresiilor $\frac{1}{X_d}$ și $\frac{1}{X_q}$ obținem relația cuplului asincron "M_a" care în acest caz

care ca o sumă de 3 componente fig.2.7 :

$$M_a = M_q'' + M_d' + M_d'' \quad (2.106)$$

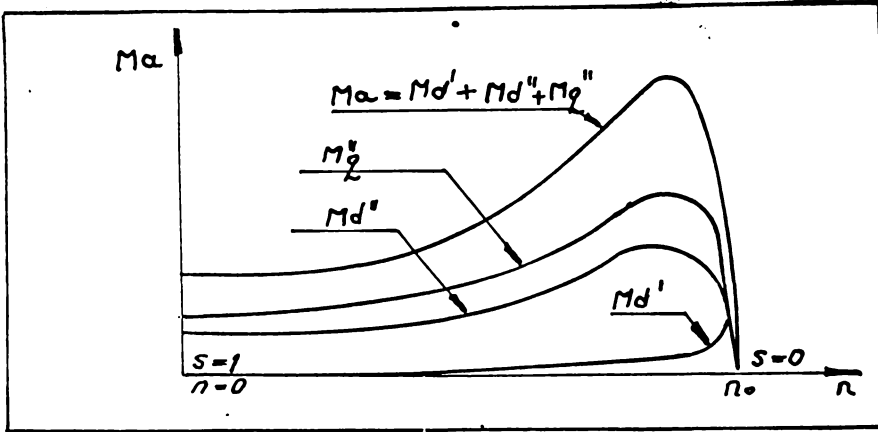


Fig.2.7. Componentele cuplului asincron la pornirea cu infășurarea rotorică scurtcircuitată.

Componenta M_q'' este aceeași ca și la pornirea cu infășurarea de excitație în rol.

Celelalte două componente se pot pune la fel sub forma cunoscută de exprimare clasică a cuplului asincron:

$$M_d'' = \frac{2n_d'' \cdot \text{max}}{s_d'' + \frac{s}{s_d''}} \quad ; \quad M_d' = \frac{2n_d' \cdot \text{max}}{\frac{s}{s_d'} + s_d'} \quad (2.107)$$

În aceste două relații $n_d'' \text{ max}$ și $n_d' \text{ max}$ reprezintă valorile maxime ale celor două componente asincrone, iar s_d'' și s_d' reprezintă alunecările critice corespunzătoare, pentru care rezultă relațiile de calcul:

$$n_d'' \text{ max} = \frac{U^2}{4} \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) = \frac{U^2}{4x_d''} \left(\frac{\int \frac{df}{\sqrt{g_d''}} - 1}{\int \frac{df}{\sqrt{g_d''}}} \right)$$

$$n_d' \text{ max} = \frac{U^2}{4} \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) = \frac{U^2}{4x_d'} \left(\frac{\int \frac{df}{\sqrt{g_d'}}}{\int \frac{df}{\sqrt{g_d'}}} \right) \quad (2.108)$$

$$s_d'' = \frac{1}{r_d''} \quad ; \quad s_d' = \frac{1}{r_d'} \quad (2.109)$$

C A P I T O L U L III

METODE DE DETERMINARE A UNOR PARAMETRI SI A CARACTERIS-
TISTICILOR DE FUNCTIONARE IN REGIM ASINCRON LA MASINA
SINCRONA [36] [38] [40] [53] [54] [55] [56] [57] [58] [59]
[60] [64] [72] [83] [84]

Studiul comportării maşinii sincrone în diverse regimuri de funcţionare necesită cunoaşterea unui număr relativ mare de parametri a căror determinare este legată de dificultăţi în general cunoscute. Încercarea depăşirii acestor dificultăţi, a dus la apariţia a numeroase metode de determinare a parametrilor, fiecare metodă fiind aplicată în anumite condiţii de stare a maşinii.

În ultimul timp, pentru analiza proceselor fizice din maşina sincronă şi stabilirea parametrilor care le caracterizează, s-a impus tot mai mult ideea utilizării caracteristicilor de frecvenţă.

Ridicarea directă a acestora este însă legată de o serie de inconveniente dintre care: dificultatea separării parametrilor după axa "d" şi "q" la maşinile cu rotor nesimetric şi menţinerea constantă a vitezei de rotaţie la alunecările mici, sînt dintre cele mai însemnate.

Pentru evitarea acestor neajunsuri, s-a propus ridicarea caracteristicilor de frecvenţă pe baza unor determinări statice care constau în analizarea proceselor tranzitorii din maşină provocate de variaţia curentului în circuitul indusului cînd rotorul este fix.

Propunerea este justificată de analogia existentă între totalitatea proceselor ce au loc în maşină la funcţionarea în regim asincron şi procesele ce apar în timpul regimurilor tranzitorii amintite.

Pornindu-se de la astfel de determinări statice, în lucrarea de faţă se propun două metode de stabilire a parametrilor interni ai maşinii sincrone în regim asincron, fără ridicarea prealabilă a caracteristicilor de frecvenţă.

3.1. Metoda răspunsului tranzitoriu în curent după cele două axe la variația în treaptă a tensiunii de alimentare

Pentru obținerea parametrilor de funcționare ai mașinii sincrone conform acestei metode, se procedează la analizarea proceselor tranzitorii provocate în mașină de variația curentului în circuitul indusului când înfășurarea rotorică este în gol sau scurtcircuitată, sau provocate de variația curentului în înfășurarea rotorică, când înfășurarea statorului este în gol sau scurtcircuitată.

Se determină cu această ocazie constantele de timp ale înfășurărilor mașinii, coeficienții de dispersie și de cuplaj magnetic ale acestora, stabilindu-se în final expresiile reactanțelor operaționale ale mașinii după cele două axe.

Cu ajutorul acestor parametri determinați din analiza răspunsului tranzitoriu, prin utilizarea relațiilor de calcul obținute pentru cuplul mediu asincron și curent, se obțin în final caracteristicile de pornire în regim asincron ale mașinii sincrone.

Determinările experimentale se fac pentru două poziții ale rotorului: după axa d și după axa q.

O altă metodă de determinare a caracteristicii cuplului în regim asincron se bazează pe alimentarea înfășurării statorice cu o tensiune alternativă monofazată de frecvență variabilă, rotorul fiind în stare blocată și așezat pe rând în cele două poziții: după axa longitudinală și după axa transversală. Rezultă astfel impedanța echivalentă a mașinii cu care apoi se calculează componenta asincronă a cuplului electromagnetic.

3.1.1. Atenuarea curentului continuu în înfășurarea statorică după axa transversală

Se alimentează cu o tensiune continuă două faze ale indusului conectate în serie, a treia fază rămânând liberă. Inductorul fiind în stare de repaus, se așază într-o astfel de poziție încât axa transversală să coincidă cu axa cîmpului creat de înfășurarea alimentată (fig.3.1.a).

În aceste condiții avem:

$$i_a = 0 ; i_b = -i_c$$

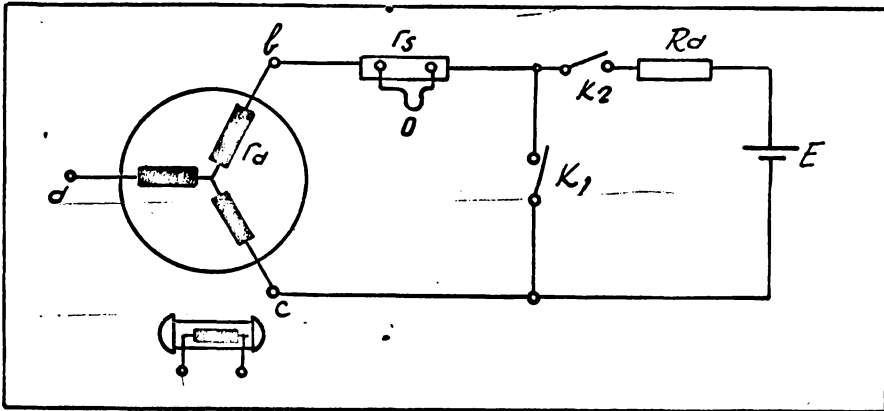


Fig. 3.1.a. Schema de principiu de montaj pentru stabilirea curentului după axa transversală.

În sistemul de axe d,q, curentii devin:

$$i_d = 0$$

$$i_q = -\frac{2}{3} \left[i_b \sin\left(-\frac{2\pi}{3}\right) - i_c \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \right] = \frac{2}{\sqrt{3}} i_b$$

Deci în această situație curentul măsurat i_p este proporțional cu componenta transversală a curentului i_q .

Dacă la un moment dat, cînd curentul prin circuitul inductiv are o anumită valoare constantă ($i_q = i_{q0}$) se conectează brusc un rezistor la bornele b,c ale înfășurării statorului, cu o anumită rezistență R_s , curentul i_q se va atenua de la valoarea inițială i_{q0} pînă la zero.

Apare astfel un regim tranzitoriu pentru care putem scrie următoarea ecuație diferențială sub formă operațională:

$$p \tilde{\Psi}(p) + r'_a \tilde{I}_q(p) = \tilde{\Psi}_q(t=0)(p) \quad (3.1)$$

r'_a reprezintă rezistența activă totală pe fază

$$r'_a = r_a + \frac{r_s}{2}$$

unde: r_a este rezistența activă pe fază a înfășurării statorului.

r_s este rezistența rezistorului conectat în serie cu înfășurarea statorului.

Dacă în ecuația (3.1) introducem:

$$\tilde{\Psi}(p) = \tilde{I}_q(p) \tilde{X}_q(p)$$

obținem:

$$(p\tilde{X}_q(p) + r_a')\tilde{I}_q(p) = \tilde{X}_q(p)\tilde{I}_{q0} \quad (3.2)$$

unde: $\tilde{X}_q(p)$ este reactanța operațională după axa transversală;

\tilde{I}_{q0} reprezintă valoarea inițială a curentului statoric i_q .

Din ecuația (3.2) obținem expresia operațională a curentului $\tilde{I}_q(p)$ raportat la valoarea inițială:

$$\tilde{I}_q(p) = \frac{\tilde{I}_{q0}}{I_{q0}} = \frac{\tilde{X}_q(p)}{p\tilde{X}_q(p) + r_a'} \quad (3.3)$$

Curentul statoric i_q se înregistrează prin intermediul unei bucle de oscilograf și se obține curba de atenuare în timp: $i_q=f(t)$ a curentului după axa transversală care se amortizează de la valoarea inițială $i_{q0}=1$ pînă la zero.

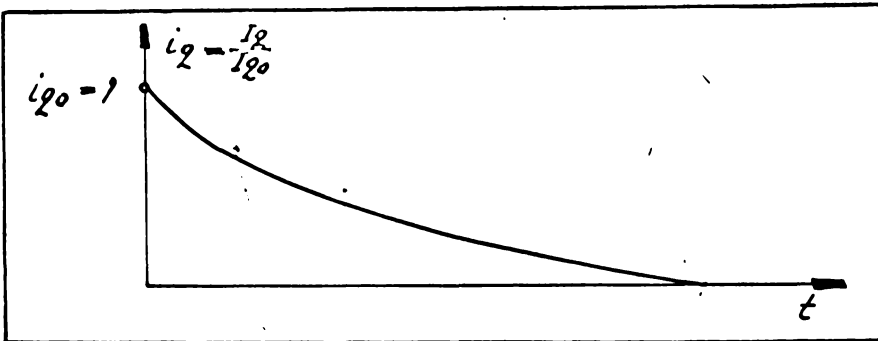


Fig.3.1.b. Atenuarea curentului după axa transversală.

Dacă se reprezintă această variație $i_q=f(t)$ în coordonate semilogaritmice se obține o curbă ca în fig.3.1.c.

Curba de variație a curentului statoric $i_q=f(t)$ se poate reprezenta ca o sumă de mai multe componente exponențiale:

$$i_q(t) = \sum_{i=1}^n I_{qi} e^{-\frac{t}{T_{qi}}}$$

unde I_{qi} reprezintă valorile inițiale ale componentelor exponențiale, iar T_{qi} reprezintă constantele de timp corespunzătoare acestor componente.

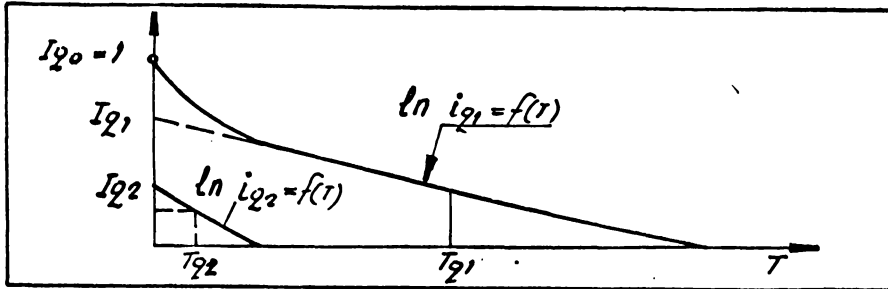


Fig.3.1.c. Variația curentului i_q în coordonate semilogaritmice.

Dacă presupunem că expresia $i_q(t)$ reprezintă o sumă de două exponențiale, obținem:

$$i_q(t) = i_{q1}(t) + i_{q2}(t) = I_{q1} e^{-\frac{t}{T_{q1}}} + I_{q2} e^{-\frac{t}{T_{q2}}} \quad (3.4)$$

Scriem relația (3.4) sub formă operațională și obținem:

$$\tilde{i}_q(p) = I_{q1} \frac{1}{pT_{q1} + 1} + I_{q2} \frac{1}{pT_{q2} + 1} =$$

$$= \frac{pT_{q1} \cdot T_{q2} (I_{q1} + I_{q2}) + I_{q1} \cdot T_{q1} + I_{q2} \cdot T_{q2}}{p^2 T_{q1} \cdot T_{q2} + p(T_{q1} + T_{q2}) + 1}$$

Luînd cont de faptul că $I_{q1} + I_{q2} = 1$, obținem pentru curentul $i_q(p)$ expresia:

$$\tilde{i}_q(p) = \frac{p \cdot T_{q1} \cdot T_{q2} + I_{q1} \cdot T_{q1} + I_{q2} \cdot T_{q2}}{p^2 \cdot T_{q1} \cdot T_{q2} + p(T_{q1} + T_{q2}) + 1} \quad (3.5)$$

În același timp, dacă relația (3.3) se introduce în ecuația operațională, $\tilde{x}_q(p)$:

$$\tilde{x}_q(p) = x_q \frac{pT_{q0} \sqrt{a_0} + 1}{pT_{q0} + 1}$$

obținem pentru curentul $\tilde{i}_q(p)$ următoarea expresie:

$$\tilde{i}_q(p) = \frac{x_q (pT_u \sqrt{q\omega} + 1)}{p^2 x_q T_u \sqrt{q\omega} + p x_q + pT_u R_a' + R_a'}$$

Împărțim atât numitorul cât și numărătorul expresiei de mai sus prin R_a' și obținem:

$$i_q(p) = \frac{pT_{mq} T_u \sqrt{q\omega} + T_{mq}}{p^2 T_{mq} T_u \sqrt{q\omega} + p(T_{mq} + T_u) + 1} \quad (3.6)$$

unde s-a notat:

$$T_{mq} = \frac{x_q}{R_a'} \quad (3.7)$$

Comparând expresiile (3.5) și (3.6) putem identifica mărimile necunoscute T_{mq} ; T_{qc} ; T_u în funcție de mărimile ce se pot determina experimental: T_{q1} ; T_{q2} ; I_{q1} ; I_{q2} ; R_a' .

Prin identificarea coeficienților lui "p" din expresiile (3.5) și (3.6) rezultă:

$$T_{mq} = I_{q1} \cdot T_{q1} + I_{q2} T_{q2} \quad (3.8.a)$$

$$T_u = T_{q1} + T_{q2} - T_{mq} \quad (3.8.b)$$

$$\sqrt{q\omega} = \frac{T_{q1} I_{q2}}{T_u T_{mq}} \quad (3.8.c)$$

Cunoscând constanta de timp T_{mq} rezultă reactanța

$$x_q = R_a' \cdot T_{mq} \quad (3.9)$$

Dacă funcția $i_q(t)$ conține mai mult de două componente exponențiale ($n+1 < 2$), atunci din reprezentarea grafică în coordonate semilogaritmice vor rezulta componentele de timp T_{qi} și valorile inițiale I_{qi} ale acestor componente, unde $i=1,2,\dots,(n+1)$.

În acest caz funcția de timp a curentului apare ca o sumă de $(n+1)$ exponențiale:

$$i_q(t) = \sum_{i=1}^{n+1} I_{qi} e^{-\frac{t}{T_i}}$$

Sub formă operațională, expresia curentului va fi:

$$\tilde{I}_q(p) = \sum_{l=1}^{n+1} \frac{T_{qi}}{pT_{qi}+1} I_{qi} \quad (3.10)$$

Tinând cont de relația (3.3) obținem:

$$\tilde{i}_q(p) = \sum_{l=1}^{n+1} \frac{T_{qi}}{pT_{qi}+1} = \frac{\tilde{X}_q(p)}{p\tilde{X}_q(p) + r'_a} \quad (3.11)$$

Dacă în ecuația (3.12) în locul variabilei "p" introducem variabila "js" iar în locul mărimilor operaționale $\tilde{X}_q(p)$ și $\tilde{i}_q(p)$ introducem vectorii complexi \bar{X}_q și \bar{i}_q și rezolvăm ecuația în raport cu \bar{X}_q , obținem:

$$\bar{X}_q = \frac{R'_a \bar{I}_q}{1 - js \bar{I}_q} \quad (3.12)$$

Pentru $S=0$, obținem din (3.12) și (3.11):

$$X_q(S=0) = x_q = r'_a \sum_{l=1}^{n+1} I_{qi} T_{qi} \quad (3.13)$$

Pentru $S = \infty$ relația (3.13) este nedeterminată prin a cărei ridicare se obține:

$$\frac{\frac{d}{ds} r'_a I_q}{\frac{d}{ds} (1 - js I_q)} = \frac{-r'_a \sum_{l=1}^{n+1} I_{qi} \frac{jT_{qi}^2}{(1 + jsT_{qi})^2}}{\sum_{l=1}^{n+1} I_{qi} \frac{jT_{qi}}{(1 + jsT_{qi})^2}}$$

$$X_q(S=\infty) = \frac{r'_a}{\sum_{l=1}^{n+1} \frac{T_{qi}}{I_{qi}}} \quad (3.14)$$

Cu ajutorul relațiilor (3.13) și (3.14) se pot determina valorile limită ale reactanței X_q în cazul în care curba curentului "i_q" se descompune în mai multe componente exponențiale.

3.1.2. Atenuarea curentului continuu în înfășurarea statorică după axa longitudinală, înfășurarea de excitație fiind deschisă.

Înfășurarea de excitație fiind deschisă, se alimentează fazele b și c inseriate din stator, de la o sursă de curent continuu ca în fig.3.2.a.

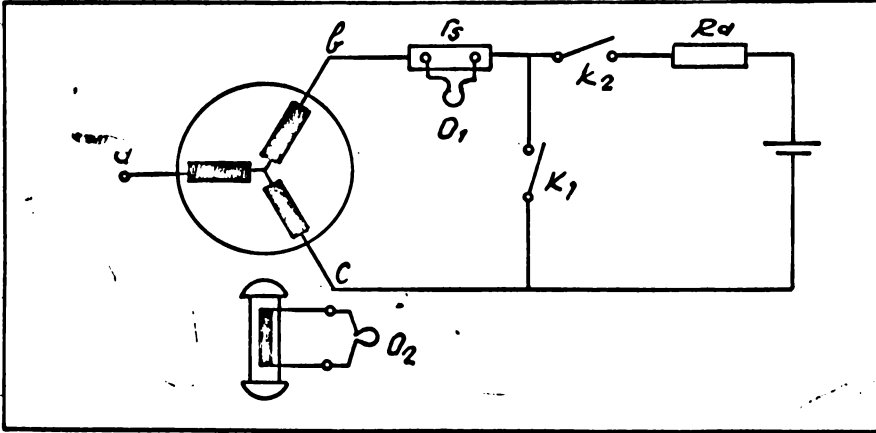


Fig.3.2.a. Schema de principiu de montaj pentru atenuarea curentului după axa d.

Inductorul fiind în stare de repaus, se așează într-o astfel de poziție încât axa longitudinală să coincidă cu axa cîmbului crest de înfășurarea alimentată.

În aceste condiții, dacă scriem componentele după axele "d" și "q" ale curentului, obținem:

$$i_q = 0 \quad (3.15)$$

$$i_d = \frac{2}{3} \left[i_b \cos\left(-\frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{2}\right) - i_c \cos\left(\frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{2}\right) \right] = \frac{2}{\sqrt{3}} i_b$$

Deci curentul după axa longitudinală " i_d " este proporțional cu valoarea curentului din fazele inseriate "b" și "c".

Dacă la un moment dat cînd curentul prin circuitul inductorului are o anumită valoare constantă ($i_d = i_{d0}$) se scurtcircuitează brusc bornele "b" și "c" ale înfășurării statorului curentul i_d se va atenua de la valoarea inițială i_{d0} pînă la zero (fig.3.2.b).

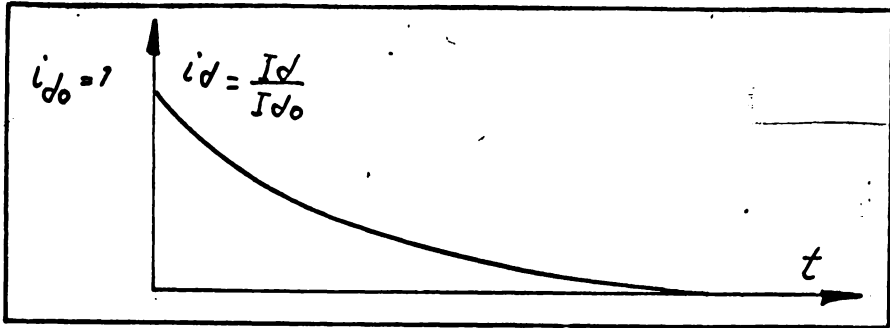


Fig. 3.2.b. Atenuarea curentului după axa d.

Apare astfel un regim tranzitoriu de amortizare a curentului longitudinal pentru care putem scrie următoarea ecuație diferențială sub formă operațională

$$p \tilde{\Psi}_{d0}(p) + r'_a \tilde{I}_d(p) = \tilde{\Psi}_{d0}(t=0)(p) \quad (3.16)$$

unde prin $\tilde{\Psi}_{d0}(p)$ s-a notat fluxul statoric după axa longitudinală pentru cazul cînd înfășurarea de excitație este în gol.

Dacă în ecuația (3.16) introducem:

$$\tilde{\Psi}_{d0}(p) = \tilde{I}_d(p) \tilde{X}_{d0}(p)$$

obținem:

$$\begin{aligned} p \tilde{I}_d(p) \tilde{X}_{d0}(p) + r'_a \tilde{I}_d(p) &= \tilde{X}_{d0}(p) I_{d0} \\ \tilde{I}_d(p) &= \frac{\tilde{X}_{d0}(p)}{p \tilde{X}_{d0}(p) + r'_a} I_{d0} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Împărțind expresia de mai sus prin " I_{d0} " obținem curentul raportat la valoarea inițială I_{d0} :

$$\tilde{i}_d(p) = \frac{\tilde{X}_{d0}(p)}{p \tilde{X}_{d0}(p) + r'_a} \quad (3.18)$$

Dacă în relația (3.18) se înlocuiește $\tilde{X}_{d0}(p)$ cu valoarea ea dată de expresia (2.49) se obține:

$$\tilde{i}_d(p) = \frac{p x_d \tilde{V}_{dD} + x_d}{p^2 x_d \tilde{V}_{dD} + p(x_d + T_d r'_a) + r'_a}$$

Împărțim numitorul și numărătorul expresiei de mai sus prin " r'_d " și obținem:

$$\tilde{i}_d(p) = \frac{p T_{md} T_D \sqrt{\sigma_{dD}} + T_{md}}{p^2 T_{md} \sqrt{\sigma_{dD}} T_D + p(T_{md} + T_D) + 1} \quad (3.19)$$

unde s-a introdus notația $T_{md} = \frac{x_d}{r'_d}$ (3.20)

În același timp, considerînd curba curentului ce se atenuează $i_d(t)$ se poate reprezenta ca o sumă de două componente exponențiale avînd constantele de timp T_{d1} , T_{d2} și valorile inițiale I_{d1} , I_{d2} obținem:

$$i_d(t) = I_{d1} e^{-\frac{t}{T_{d1}}} + I_{d2} e^{-\frac{t}{T_{d2}}} \quad (3.21)$$

Scriem expresia curentului sub formă operațională:

$$\tilde{i}_d(p) = I_{d1} \frac{T_{d1}}{pT_{d1} + 1} + I_{d2} \frac{T_{d2}}{pT_{d2} + 1}$$

$$\tilde{i}_d(p) = \frac{pT_{d1}T_{d2} + I_{d1}T_{d1} + I_{d2}T_{d2}}{p^2 T_{d1}T_{d2} + p(T_{d1} + T_{d2}) + 1} \quad (3.22)$$

Comparînd expresiile (3.19) și (3.22) ale curentului $\tilde{i}_d(p)$ și indentificînd coeficienții lui p obținem următoarele relații de calcul pentru constantele de timp T_{md} , T_D și coeficientul de dispersie $\sqrt{\sigma_{dD}}$:

$$T_{md} = I_{d1}T_{d1} + I_{d2}T_{d2} \quad (3.23)$$

$$T_D = T_{d1} + T_{d2} - T_{md} \quad (3.24)$$

$$\sqrt{\sigma_{dD}} = \frac{T_{d1} \cdot T_{d2}}{T_D \cdot T_{md}} \quad (3.25)$$

Avînd aceste mărimi rezultă pe baza notației (3.20) valoarea reactanței sincrone x_d

$$x_d = r'_d \cdot T_{md} \quad (3.26)$$

Descompunerea grafică a variației curentului în componente exponențiale este arătată în fig.3.2.c.

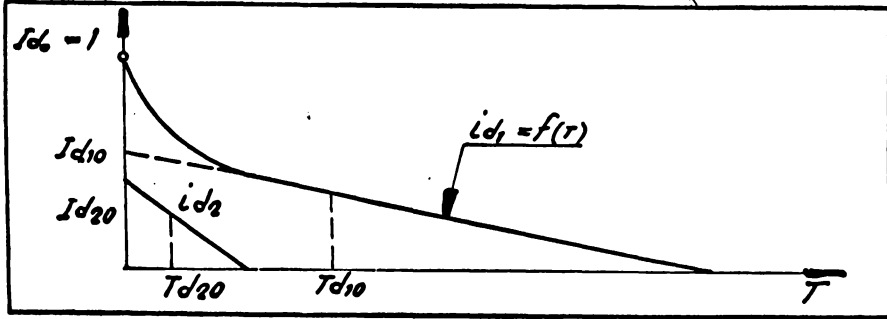


Fig.3.2.c. Variația curentului i_d în coordonate semilogaritmice.

În timpul procesului tranzitoriu de atenuare a curentului longitudinal i_d , la bornele înfășurării de excitație care este deschisă, apare o tensiune U_f care are o variație ca în fig. 3.2.d.

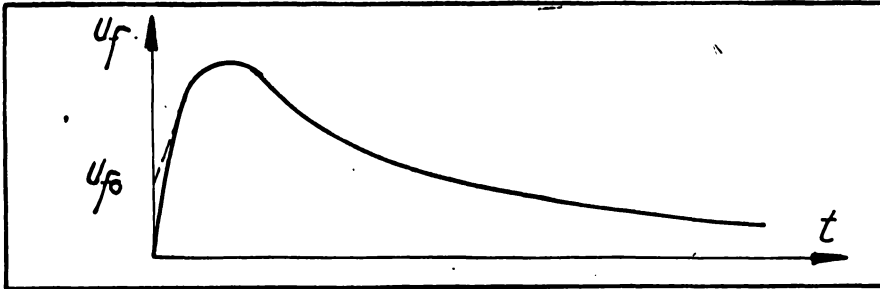


Fig.3.2.d. Variația tensiunii la bornele de excitație.

Dacă scriem ecuația de tensiuni pentru circuitul de excitație, obținem:

$$\tilde{U}_f(p) = p \tilde{\Psi}_{df}(p) - \tilde{\Psi}_{dfo}(p) \quad (3.27)$$

unde: $\tilde{\Psi}_{df}(p) = \tilde{X}_{df}(p) \tilde{I}_d(p)$

$$\tilde{\Psi}_{dfo}(p) = \tilde{X}_{df}(p) I_{d0}$$

I_{d0} reprezintă valoarea inițială a curentului din înfășurarea statorică.

Ecuația (3.27) se poate scrie și sub forma:

$$\tilde{U}_f(p) = \tilde{X}_{df} [p \tilde{I}_d(p) - I_{d0}]$$

Împărțind ambii membri ai ecuației prin I_{d0} obținem

tensiunea raportată la valoarea inițială a curentului static, sub formă operațională:

$$\tilde{u}_f(p) = \frac{\tilde{U}_f(p)}{I_{d0}} = \tilde{X}_{df}(p) \left[p \tilde{I}_d(p) - 1 \right] \quad (3.28)$$

Tinând cont de relația (3.1b) obținem pentru tensiunea rotorică $\tilde{u}_f(p)$ următoarea expresie:

$$\tilde{u}_f(p) = \tilde{X}_{df}(p) \left[\frac{p \tilde{X}_{do}(p)}{p \tilde{X}_{do}(p) + r_d^i} - 1 \right]$$

$$\tilde{u}_f(p) = \tilde{X}_{df}(p) \frac{r_d^i}{p \tilde{X}_{do}(p) + r_d^i} \quad (3.29)$$

Înlocuind în (3.29) reactanțele $X_{do}(p)$ și $X_{df}(p)$ cu expresiile lor date de relațiile (2.34) și (2.37) obținem următoarea expresie operațională pentru tensiunea la bornele înfășurării de excitație:

$$u_f(p) = x_{ad} \cdot \frac{p T_D \mu_D + 1}{p^2 r_{md} T_D (\mu_D + p(T_{md} + T_D) + 1)} \quad (3.30)$$

La rîndul ei, curba tensiunii de excitație se poate de asemenea descompune într-o sumă de componente exponențiale. Dacă se consideră doar două componente exponențiale obținem:

$$u_f(t) = U_{f1} e^{-\frac{t}{T_{d1}}} - U_{f2} e^{-\frac{t}{T_{d2}}} \quad (3.31)$$

Constantele de timp T_{d1} , T_{d2} sînt aceleași cu constantele de timp ale componentelor exponențiale ce aproximează curba curentului $i_d(t)$, ele fiind deja determinate din amortizarea curentului static.

Valorile inițiale U_{f1} , U_{f2} ale componentelor tensiunii, satisfac următoarea relație:

$$U_{f1} = U_{f2} = U_{f0} \quad (3.32)$$

unde U_{f0} reprezintă limita la dreapta a funcției $u_f(t)$ în punctul $t=0$.

$$U_{f0} = \lim_{t \rightarrow 0^+} u_f(t)$$

Pentru determinarea practică a valorilor U_{f1} și U_{f2} se procedează în felul următor:

- se prezintă în coordonate semilogaritmice curba $u_f(t)$ și se extrapolează pînă la $t=0$ prelungindu-se porțiunea liniară și se obține astfel componenta $U_{f1}(t)$ care reprezintă o linie dreaptă (fig.3.2.e).

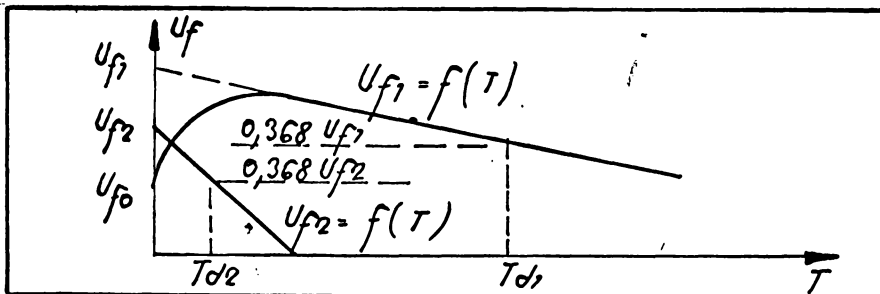


Fig.3.2.e. Varietia tensiunii rotorice in coordonate semilogaritmice.

Din componenta $U_{f1}(t)$ se scade curba $u_f(t)$ și se obține componenta $u_{f2}(t)$:

$$u_{f2}(t) = u_{f1}(t) - u_f(t) \quad (3.33)$$

Corespunzător constantei de timp T_{d2} se determină diferența:

$$U_{f2} = U_{f1} - U_f$$

Valoarea inițială a componentei u_{f2} va fi:

$$U_{f2} = \frac{u_{f2}(t=T_{d2})}{0,368}$$

unde $0,368 = \frac{1}{e}$.

Avînd determinate U_{f1} și U_{f2} rezultă:

$$U_{f0} = U_{f1} - U_{f2}$$

Dacă expresia (3.25) a tensiunii de excitație se scrie sub formă operațională, obținem:

$$\tilde{U}_f(p) = \frac{U_{f1} T_{d1}}{p T_{d1} + 1} - \frac{U_{f2} T_{d2}}{p T_{d2} + 1}$$

sau:

$$\tilde{U}_f(p) = \frac{D \cdot T_{d1} \cdot T_{d2} \cdot U_{fo} + U_{f1} \cdot T_{d1} - U_{f2} \cdot T_{d2}}{p^2 \cdot T_{d1} \cdot T_{d2} + p(T_{d1} + T_{d2}) + 1} \quad (3.34)$$

Din relațiile (3.30) și (3.34) se determină raportul k_1 dintre coeficienții termenilor care înmulțesc pe "p" și termenii liberi:

$$k_1 = \frac{T_{d1} \cdot T_{d2} \cdot U_{fo}}{U_{f1} \cdot T_{d1} - U_{f2} \cdot T_{d2}} = \frac{x_{ad} U_D^1 D}{x_{ad}} \quad (3.35)$$

Rezultă astfel o relație de calcul pentru coeficientul μ_D :

$$\mu_D = \frac{1}{T_D} \cdot \frac{U_{fo}}{\frac{U_{f1}}{T_{d2}} - \frac{U_{f2}}{T_{d1}}} \quad (3.36)$$

3.1.3. Atenuarea curentului continuu în înfășurarea rotorică, înfășurarea statorică fiind deschisă

Înfășurarea statorică fiind deschisă iar rotorul fiind așezat în axa longitudinală în raport cu fazele "b" și "c", se alimentează înfășurarea de excitație de la o sursă de curent continuu (fig.3.3.a).

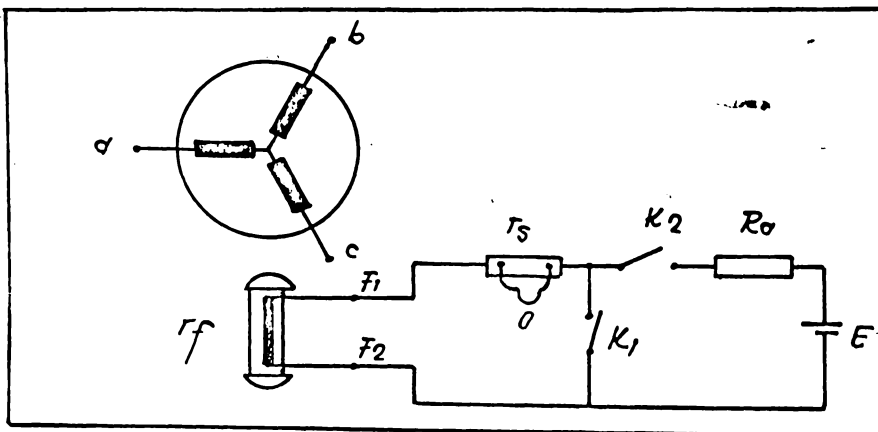


Fig.3.3.a. Scheme de principiu de montaj pentru atenuarea curentului în rotor.

În această situație, dacă se scurtcircuitază bornele înfășurării de excitație printr-un întrerupător K curentul prin rotor se va atenua începând de la valoarea inițială i_{f0} până la zero.

Dacă se scrie ecuația diferențială operațională ce caracterizează procesul tranzitoriu de atenuare a curentului cu considerarea condițiilor inițiale, obținem:

$$p \tilde{\Psi}_f(p) + r_f^i \tilde{i}_f(p) = \tilde{\Psi}_f(t=0)(p) \quad (3.37)$$

$$\text{unde: } \tilde{\Psi}_f(p) = \tilde{X}_{f0}(p) \cdot \tilde{i}_f(p)$$

$$r_f^i = r_f + r_s$$

r_f fiind rezistența înfășurării de excitație redusă la stator ;

r_s rezistența șuntului pentru măsurarea curentului de excitație.

Din ecuația diferențială operațională (3.37) obținem:

$$\tilde{i}_f(p) = \frac{\tilde{i}_f(0)}{i_{f0}} = \frac{\tilde{X}_{f0}(p)}{p \tilde{X}_{f0}(p) + r_f^i} \quad (3.38)$$

Reactanța $\tilde{X}_{f0}(p)$ este dată de relația (2.39).

Introducând pe $\tilde{X}_{f0}(p)$ în relația (3.37) obținem:

$$\tilde{i}_f(p) = \frac{p x_f T_D \sqrt{\sigma_{fD}} + x_f}{p^2 x_f T_D \sqrt{\sigma_{fD}} + p(x_f + r_f^i T_D) + r_f^i}$$

Dacă se introduce notația:

$$T_{mf} = \frac{x_f}{r_f^i} \quad (3.39)$$

expresia operațională a curentului devine:

$$\tilde{i}_f(p) = \frac{p T_{mf} T_D \sqrt{\sigma_{fD}} + T_{mf}}{p^2 T_{mf} T_D \sqrt{\sigma_{fD}} + p(T_{mf} + T_D) + 1} \quad (3.40)$$

În același timp curba curentului $i_f(t)$ se poate scrie ca

o sumă de componente exponențiale (fig. 3.3.b).

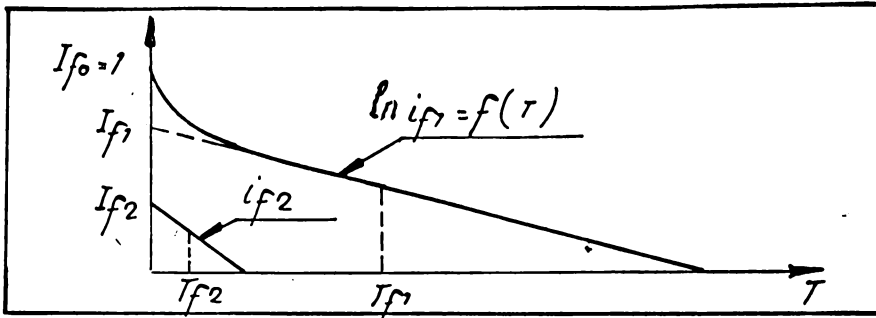


Fig. 3.3.b. Variația curentului în coordonate semilogaritmice.

Dacă presupunem, doar două componente avînd constantele de timp T_{f1} ; T_{f2} și valorile inițiale I_{f1} ; I_{f2} funcția $i_f(t)$ se scrie sub forma:

$$i_f(t) = I_{f1} e^{-\frac{t}{T_{f1}}} + I_{f2} e^{-\frac{t}{T_{f2}}} \quad (3.41)$$

În formă operațională, expresia curentului de excitație care se amortizează devine:

$$\tilde{i}_f(p) = \frac{pT_{f1} \cdot T_{f2} + I_{f1} \cdot T_{f1} + I_{f2} \cdot T_{f2}}{p^2 T_{f1} \cdot T_{f2} + p(T_{f1} + T_{f2}) + 1} \quad (3.42)$$

Dacă se compară relațiile (3.40) (3.42) și se identifică coeficienții termenilor în p , obținem pentru mășinile necunoscute: T_{mf} ; T_D ; $\sqrt{T_{fD}}$; x_f următoarele relații de calcul:

$$T_{mf} = I_{f1} \cdot T_{f1} + I_{f2} \cdot T_{f2} \quad (3.43)$$

$$T_D = T_{f1} + T_{f2} - T_{mf} \quad (3.44)$$

$$\sqrt{T_{fD}} = \frac{T_{f1} \cdot T_{f2}}{T_D \cdot T_{mf}} \quad (3.45)$$

$$x_f = r_f^i \cdot T_{mf} \quad (3.46)$$

3.1.4. Atenuarea curentului continuu în înfășurarea statorului, înfășurarea de excitație fiind scurtcircuitată

Înfășurarea de excitație fiind scurtcircuitată se alimentează înfășurările fazelor b și c înseriate, de la o sursă de curent continuu (fig.3.4.a).

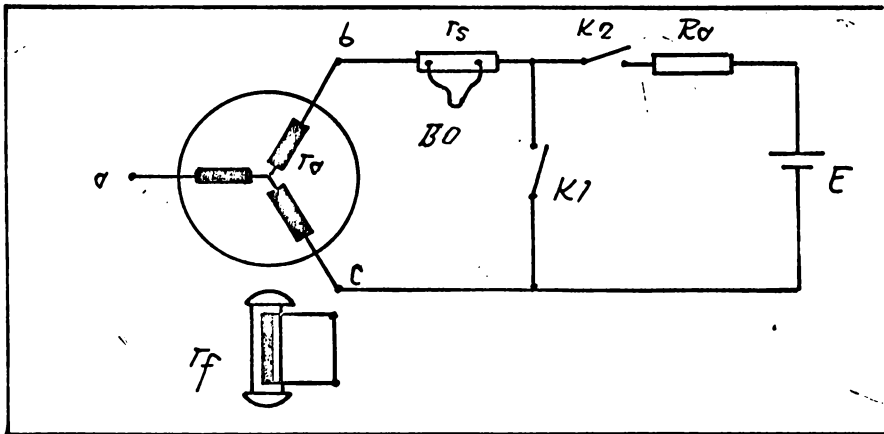


Fig.3.4.a. Schema de principiu de montaj pentru atenuarea curentului după axa d.

Motorul mașinii se așază în acest caz în axa longitudinală în raport cu fazele "b" și "c".

În această situație, curentul fazei b poate fi considerat proporțional cu curentul longitudinal, conform relațiilor (3.15) din paragraful 3.2.

Dacă la un moment dat când curentul prin circuitul indușului are o anumită valoare constantă ($i_d = I_{d0}$) se scurtcircuitază brusc bornele "b" și "c" ale înfășurării statorice, curentul i_d se va atenua de la valoarea inițială I_{d0} pînă la 0.

În același timp și I_r rotor se stabilește un curent care crește pînă la o valoare maximă după care se amortizează pînă la zero (fig.3.4.b).

Dacă scriem ecuația diferențială ce caracterizează procesul tranzitoriu de amortizare a curentului prin înfășurarea statorului, rotorul fiind scurtcircuitat, obținem:

$$p \tilde{\psi}_d(p) + r_a' \tilde{I}_d(p) = \tilde{\psi}_d(t=0)(p) \quad (3.47)$$

unde:

$$\begin{aligned}\tilde{\psi}_d(p) &= \tilde{i}_d(p) \cdot \tilde{x}_d(p) \\ \tilde{\psi}_d(t=0)(n) &= i_{d0} \tilde{x}_d(p)\end{aligned}$$

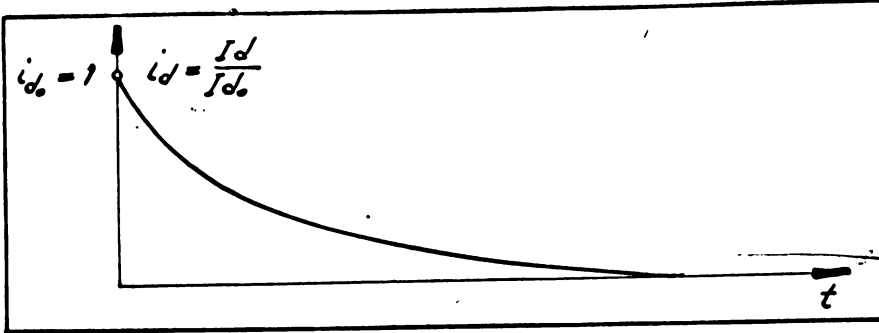


Fig.3.4.b. Atenuarea curentului în stator după axa d.

Din ecuația (3.47) obținem:

$$\tilde{i}_d(n) = \frac{\tilde{i}_d(p)}{i_{d0}} = \frac{\tilde{x}_d(p)}{p \tilde{x}_d(p) + r'_a} \quad (3.48)$$

Reactanța operațională după axa longitudinală $\tilde{x}_d(p)$ se obține din relația (2.6b):

$$\tilde{x}_d(p) = x_d \frac{p^2 T_r T_D \tilde{v}_{drD} + p(T_r \tilde{v}_{dr} + T_D \tilde{v}_{dD}) + 1}{p^2 T_r T_D \tilde{v}_{rD} + p(T_r + T_D) + 1}$$

Înlocuind expresia reactanței $\tilde{x}_d(p)$ în relația (3.48) obținem în final pentru curentul longitudinal i_d următoarea expresie:

$$\tilde{i}_d(n) = \frac{x_d [p^2 T_r T_D \tilde{v}_{drD} + p(T_r \tilde{v}_{dr} + T_D \tilde{v}_{dD}) + 1]}{p^3 x_d T_r T_D \tilde{v}_{drD} + p^2 (T_r T_D \tilde{v}_{rD} + x_d T_r \tilde{v}_{dr} + x_d T_D \tilde{v}_{dD}) - p r'_a (T_r + T_D) + r'_a} \quad (3.49)$$

În același timp, putem considera că funcția care reprezintă variația curentului prin înfășurarea statorului este o sumă de trei componente exponențiale; și reprezentăm această funcție în coordonate semilogaritmice (fig.3.4.c):

$$i_d(t) = I_{d1} \cdot e^{-\frac{t}{T_{d1}}} + I_{d2} \cdot e^{-\frac{t}{T_{d2}}} + I_{d3} \cdot e^{-\frac{t}{T_{d3}}} \quad (3.50)$$

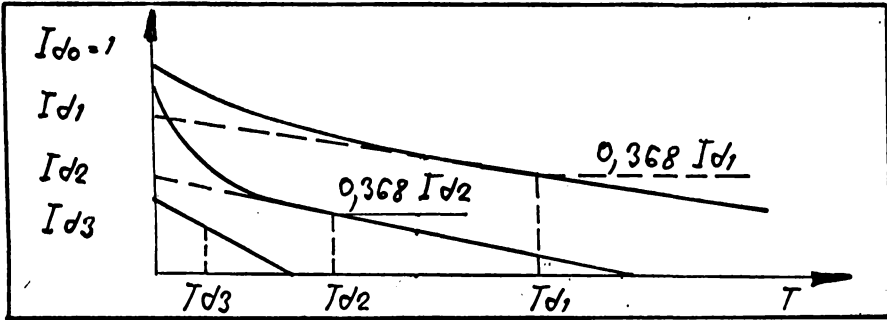


Fig. 3.4.c. Variația curentului i_d în coordonate semilogaritmice.

Scrisă sub formă operațională, această funcție devine:

$$\tilde{i}_d(p) = I_{d1} \frac{T_{d1}}{pT_{d1}+1} + I_{d2} \frac{T_{d2}}{pT_{d2}+1} + I_{d3} \frac{T_{d3}}{pT_{d3}+1} \quad (3.51)$$

Aducînd la același numitor și ordonînd numitorul și numărătorul după puterile lui p obținem expresia finală a curentului:

$$\tilde{i}_d(p) = \frac{p^2 T_{d1} T_{d2} T_{d3} + p T_{d1} T_{d2} (1 - I_{d3}) + T_{d2} T_{d3} (1 - I_{d1}) + T_{d3} T_{d1} (1 - I_{d2})}{p^3 T_{d1} T_{d2} T_{d3} + p^2 (T_{d1} T_{d2} + T_{d1} T_{d3} + T_{d2} T_{d3}) + p (T_{d1} + T_{d2} + T_{d3}) + 1} + \frac{I_{d1} T_{d1} + I_{d2} T_{d2} + I_{d3} T_{d3}}{p^3 T_{d1} T_{d2} T_{d3} + p^2 (T_{d1} T_{d2} + T_{d1} T_{d3} + T_{d2} T_{d3}) + p (T_{d1} + T_{d2} + T_{d3}) + 1} \quad (3.52)$$

Împărțim membrul drept al ecuației (3.49) atât la numărător cît și la numitor prin r'_a și notăm:

$$\frac{x_d}{r'_a} = T_{\omega d}$$

obținem astfel următoarea relație pentru curentul i_d :

$$\tilde{i}_d(p) = \frac{p^2 T_{\omega d} T_{\omega d} T_{\omega d} \tilde{V}_{dFD} + p T_{\omega d} (T_{\omega d} \tilde{V}_{dF} + T_{\omega d} \tilde{V}_{dD}) + T_{\omega d}}{p^3 T_{\omega d} T_{\omega d} T_{\omega d} \tilde{V}_{dFD} + p^2 (T_{\omega d} T_{\omega d} + T_{\omega d} T_{\omega d} + T_{\omega d} T_{\omega d}) + p (T_{\omega d} + T_{\omega d} + T_{\omega d}) + 1} \quad (3.53)$$

Comparând relațiile (3.49) și (3.52) următoarele relații de calcul pentru mărimile necunoscute T_{md} ; T_f ; $\sqrt{d_f}$; $\sqrt{d_{fd}}$ în funcție de mărimile determinate experimental: T_{d1} ; T_{d2} ; T_{d3} ; I_{d1} ; I_{d2} ; I_{d3} :

$$T_{md} = I_{d1}T_{d1} + I_{d2}T_{d2} + I_{d3}T_{d3} \quad (3.54)$$

$$T_f = T_{d1} + T_{d2} + T_{d3} - T_{md}^{-1} \quad (3.55)$$

$$\sqrt{d_f} = \frac{T_{d1}T_{d2}(1-I_{d3}) + T_{d2}T_{d3}(1-I_{d1}) + T_{d3}T_{d1}(1-I_{d2}) - \sqrt{d_{fd}}T_{md}}{T_{md}T_f} \quad (3.56)$$

$$\sqrt{d_{fd}} = \frac{T_{d1}T_{d2}T_{d3}}{T_fT_{md}} \quad (3.57)$$

Pentru obținerea unor rezultate concludente este necesară o determinare grafică cât mai exactă a componentelor exponențiale ale curbei de atenuare a curentului.

3.2. Determinarea caracteristicilor de pornire în asincron a mașinii sincrone prin metoda alimentării infășurării statoreice de la o sursă cu tensiune alternativă monofazată. [15] [18] [22] [54] [56] [66] [70] [91] [101] [102]

3.2.1. Generalități

Conform acestei metode, încercările se execută pe mașina în stare de repaus, prin alimentarea infășurării statorului de la o sursă de tensiune alternativă monofazată avind frecvența variabilă în limite foarte largi, practic de la $f=0$ pînă la $f=50$ Hz.

Pentru diferite valori ale frecvenței tensiunii de alimentare se determină impedanța schemei echivalente a mașinii de încercat în stare de repaus, corespunzătoare componentei de succesiune directă a curentului statoric.

Pe baza acestor mărimi determinate experimental se determină impedanța schemei echivalente a mașinii de încercat în stare de rotație în regia asincron, infășurarea statorică fiind ali-

mentată de la un sistem trifazat de tensiuni cu frecvența $f_n = 50$ Hz și avind în rotor o alunecare egală cu frecvența relativă a tensiunii de alimentare a mașinii în stare de repaus, adică:

$$S = \frac{f}{f_n}$$

Avind impedanța de intrare corespunzătoare schemei echivalente a mașinii de încercat în stare de rotație în regim asincron se poate determina curentul și cuplul asincron în funcție de alunecarea S a rotorului.

Aceste determinări se fac pentru cele două poziții de așezare a rotorului: după axa transversală și după axa longitudinală.

3.2.2. Stabilirea principalelor relații de calcul

Considerăm o mașină sincronă la care înfășurarea statorică este conectată la o sursă de tensiune alternativă monofazată de frecvență variabilă "f", iar rotorul avind înfășurarea de excitație scurtcircuitată este așezat în axa longitudinală sau cea transversală în raport cu axa cîmpului magnetic creat de curentul ce trece prin înfășurarea statorică.

Cîmpul magnetic pulsatoriu care se stabilește în mașină în acest caz se poate descompune, în general, în două cîmpuri magnetice învîrtitoare (unul de succesiune directă și altul de succesiune inversă) și un cîmp de succesiune nulă. Cîmpul magnetic de succesiune directă determină în mașină un sistem trifazat de tensiuni și curenți de frecvență egală cu frecvența tensiunii de alimentare f .

Dacă raportăm frecvența variabilă f a tensiunii de alimentare a mașinii în stare de repaus la frecvența nominală $f_n = 50$ Hz, obținem frecvența relativă: $f^* = \frac{f}{f_n}$.

Față de sistemul trifazat simetric de n tensiuni, mașina cu rotorul în stare de repaus are o impedanță echivalentă $Z_p(f^*)$ care va fi dependentă de frecvența relativă a tensiunii de alimentare f^* .

Această impedanță echivalentă poate fi determinată experimental pentru cele două poziții de așezare a rotorului: după axa transversală și după axa longitudinală.

Dacă presupunem în continuare că mașina se rotește și

funcționează în regim asincron cu o alunecare S astfel încât frecvența tensiunii din rotor să fie egală cu frecvența f a tensiunii de alimentare a mașinii în stare de repaus, atunci rezultă pentru alunecare valoarea:

$$S = \frac{f}{f_n} = r^2 \quad (3.58)$$

Deci în acest caz alunecarea rotorului la funcționarea în asincron a mașinii va fi egală cu frecvența relativă a tensiunii de alimentare a mașinii cu rotorul în stare de repaus.

La funcționarea în asincron cu alunecarea S , considerăm pentru simplificare o colivie echivalentă în rotor. Mașina are o impedanță echivalentă Z_e corespunzătoare schemei din fig.3.5.

Parametrii r_{fe} r_{fe} echivalează global rotorul mașinii

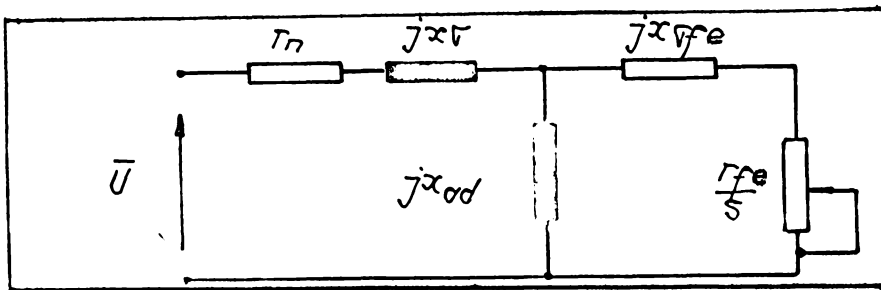


Fig.3.5. Schema echivalentă a unei mașini sincrone la funcționarea în asincron.

În schema echivalentă din fig.3.5 parametrii corespund frecvenței nominale a tensiunii de alimentare ($f_n=50$ Hz).

Pentru mașina în stare de repaus când frecvența tensiunii de alimentare este egală cu frecvența f a tensiunii rotorice a mașinii în stare de rotație, parametrii schemei echivalente se modifică în sensul că reactanțele se înmulțesc cu raportul frecvențelor $\frac{f}{f_n}$, iar alunecarea rotorului devine egală cu unitatea.

Schema echivalentă a mașinii în stare de repaus va fi deci cea dată în fig.3.6.

Dacă ținem cont de faptul că $\frac{f}{f_n} = r^2 = S$, unde S reprezintă alunecarea rotorului corespunzătoare funcționării în asincron a mașinii, schema echivalentă din fig.3.6, devine (fig.3.7).

Impedanța echivalentă a mașinii în stare de rotație $Z_e(S)$ ca în fig.3.5, la funcționarea în asincron cu alunecarea S , este dată de relația:

$$\overline{Z}_e(s) = r_n + jx_{\sigma} + \frac{j \frac{x_{ad} r_{fe}}{s} - x_{ad} x_{fe}}{\frac{r_{fe}}{s} + j(x_{fe} + x_{ad})} \quad (3.59)$$

unde r_n reprezintă rezistența activă a înfășurării electrice corespunzătoare frecvenței nominale a tensiunii de alimentare a mașinii în stare de rotație.

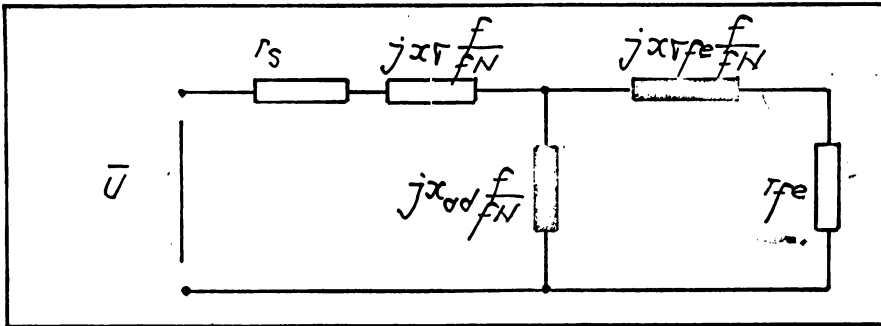


Fig. 3.6. Schema echivalentă a mașinii în stare de repaus.

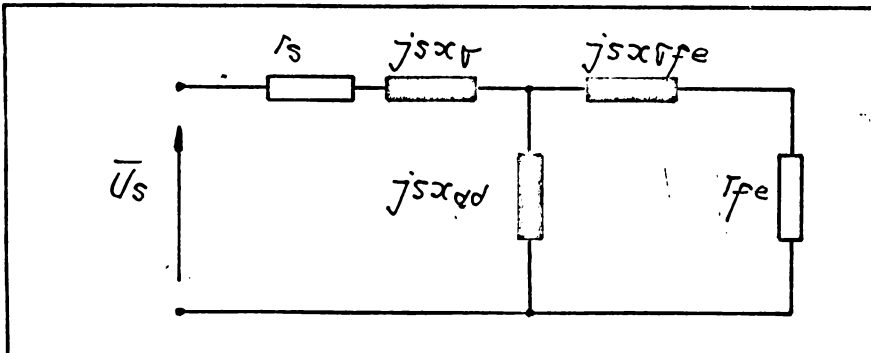


Fig. 3.7. Schema echivalentă a mașinii în stare de repaus în funcție de alunecare s.

Impedanța echivalentă a mașinii în stare de repaus $\overline{Z}_r(s)$, cu rotorul fixat într-o anumită poziție, spre exemplu după axa longitudinală, conform schemei echivalente din fig. 3.7 este dată de relația:

$$\overline{Z}_r(s) = r_s + jsx_{\sigma} + s \frac{j \frac{x_{ad} r_{fe}}{s} - x_{ad} x_{fe}}{\frac{r_{fe}}{s} + j(x_{fe} + x_{ad})} \quad (3.60)$$

unde r_s reprezintă rezistența activă a înfășurării electrice

corespunzătoare frecvenței f^* , care este frecvența relativă de alimentare a mașinii în stare de repaus.

Comparând între ele expresiile (3.59) și (3.60) putem determina o relație de legătură între impedanța echivalentă $\overline{Z}_e(S)$ a mașinii în stare de rotație în regim asincron cu alunecarea S , și impedanța echivalentă $\overline{Z}_r(S)$ a mașinii în stare de repaus având frecvența tensiunii de alimentare f egală cu frecvența tensiunii din rotor a mașinii în stare de rotație.

Astfel, din relația (3.51) rezultă:

$$\overline{Z}_e(S) - r_n = jx \overline{\varphi} + \frac{j \frac{x_{ad} r_{fe}}{S} - x_{ad} x \overline{\varphi} r_{fe}}{\frac{r_{fe}}{S} + j(x \overline{\varphi} r_{fe} + x_{ad})} \quad (3.61)$$

Din relația (3.52) rezultă:

$$\frac{\overline{Z}_r(S) - r_s}{S} = j x \overline{\varphi} + \frac{j \frac{x_{ad} r_{fe}}{S} - x_{ad} x \overline{\varphi} r_{fe}}{\frac{r_{fe}}{S} + j(x \overline{\varphi} r_{fe} + x_{ad})} \quad (3.62)$$

Comparând între ele expresiile (3.61) și (3.62) rezultă relația de legătură căutată dintre $\overline{Z}_e(S)$ și $\overline{Z}_r(S)$ de forma:

$$\overline{Z}_e(S) = \frac{\overline{Z}_r(S)}{S} - \frac{r_s}{S} + r_n \quad (3.63)$$

În acest fel, prin intermediul relației de legătură (3.63) putem obține impedanța echivalentă a mașinii în stare de rotație în regim asincron cu alunecarea S și alimentată în stator cu o tensiunea de frecvență f_n , în funcție de impedanța echivalentă a mașinii în stare de repaus $\overline{Z}_r(S)$ având frecvența tensiunii de alimentare în stator egală cu frecvența f a tensiunii din rotorul mașinii în stare de rotație.

Dacă se presupune că valoarea rezistenței active a înfășurării statorice rămâne constantă în funcție de frecvența tensiunii de alimentare adică $r_s = r_n$, atunci relația (3.63) devine:

$$\overline{Z}_e(S) = \frac{\overline{Z}_r(S)}{S} - r_s \left(\frac{1-S}{S} \right) \quad (3.64)$$

In general, rezistența activă a înfășurării statorice depinde de frecvența tensiunii de alimentare și în literatura de specialitate [19] sînt date diferite funcții care aproximează această dependență.

Astfel, dacă notăm cu r_0 valoarea rezistenței înfășurării statorice în curent continuu deci la $f=0$, iar cu r_{50} valoarea rezistenței înfășurării statorice corespunzătoare frecvenței nominale : $f_n=50$ Hz, pentru rezistența r_f corespunzătoare unei anumite frecvențe f se poate scrie relația conf. [49]:

$$r_f = r_0 \left[1 + \Delta r \left(\frac{f}{f_n} \right)^2 \right] \quad (3.65)$$

unde: $\Delta r = r_{50} - r_0$

De asemenea dependența rezistenței înfășurării statorului, de frecvența tensiunii de alimentare se poate determina și dintr-o probă de alimentare a înfășurării statorice în curent alternativ de frecvență variabilă, rotorul mașinii fiind scos.

În acest fel problema determinării parametrilor mașinii în stare de rotație se reduce la aceea a determinării lor din datele obținute la probele ce se execută asupra mașinii în stare de repaus.

Impedanța echivalentă $\bar{Z}_p(S)$ a mașinii în stare de repaus poate fi determinată experimental prin metoda alimentării înfășurării statorice cu o tensiune alternativă monofazată de frecvență variabilă f , rotorul fiind calat și poziționat pe rînd în axa longitudinală respectiv în cea transversală în raport cu axa cîmpului magnetic creat de curentul ce trece prin înfășurarea statorică.

Conectarea înfășurării statorice la sursa de tensiune alternativă monofazată se poate face în trei moduri:

a) Conectarea unei singure faze la sursa de tensiune alternativă monofazată, celelalte două faze rămînînd libere conf. fig. 3.8.a.

b) Conectarea a două faze înseriate, a treia rămînînd liberă, conform fig. 3.8.b.

c) Conectarea tuturor celor trei faze la sursa de tensiune prin inserierea unei faze cu celelalte două conectate în paralel, conform fig. 3.8.c.

Prin alimentarea cu o tensiune alternativă monofazată

de frecvență f a înfășurării statorice conectată într-unul din cele trei moduri de conectare prezentate, în mașină se produce un câmp magnetic pulsatoriu care se descompune în două câmpuri magnetice învârtitoare: unul de succesiune directă, altul de succesiune inversă și un câmp de succesiune nulă.

În fiecare dintre cele trei cazuri de conectare a înfășurării statorice, se poate determina pe cale experimentală o impedanță corespunzătoare schemei de alimentare, notată cu $\bar{Z}_m(S)$, și obținem:

$$\bar{Z}_m(S) = \frac{U_a}{I_a} \quad (3.66)$$

unde: U_a este tensiunea de alimentare a mașinii în stare de repaus în regim monofazat utilizând una din schemele de conectare menționate mai sus.

I_a este curentul absorbit.

Față de câmpul magnetic învârtitor de succesiune directă, mașina prezintă o impedanță $\bar{Z}_1(S)$ care este tocmai impedanța echivalentă $\bar{Z}_e(S)$ a mașinii în stare de rotație.

Pentru a determina relația de legătură dintre impedanța măsurată experimental $\bar{Z}_m(S)$ și impedanța $\bar{Z}_e(S)$ se poate recurge la metoda descompunerii în componente simetrice pentru fiecare dintre cele trei scheme de conectare a înfășurării statorului.

3.2.3. Conectarea monofazată

Această schemă de conectare poate fi considerată ca un caz particular al schemei de alimentare simetrice când două dintre faze sînt intrerupte:

$$i_b = i_c = 0 \quad (3.67)$$

Schema echivalentă a mașinii corespunzătoare acestui regim de funcționare este dată în fig. 3.8.a.

Curentul de fază I_a se poate descompune în două componente simetrice și o componentă homopolară:

$$\bar{I}_a = \bar{I}_{a1} + \bar{I}_{a2} + \bar{I}_{a0} \quad (3.68)$$

Deoarece în acest caz avem:

$$\bar{I}_{a1} = \bar{I}_{a2} = \bar{I}_{a0}$$

rezultă: $\bar{I}_a = 3\bar{I}_{a1}$

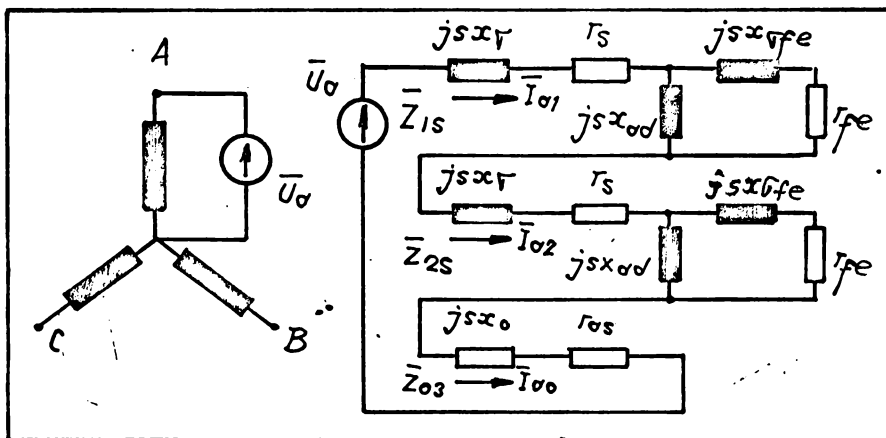


Fig. 3.6.a. Schema echivalentă de funcționare la conectarea monofazată.

Față de componentele simetrice ale curentului: \bar{i}_{a1} și \bar{i}_{a2} , mașina va avea impedanța $\bar{Z}_1(s)$ respectiv impedanța $\bar{Z}_2(s)$.

În cazul conectării monofazate a înfășurării statorice avem însă: $\bar{Z}_1(s) = \bar{Z}_2(s)$.

Impedanța de succesiune homopolară va fi:

$$\bar{Z}_0(s) = r_s + j x_0$$

Curentul de succesiune directă va fi deci:

$$\bar{i}_{a1} = \frac{\bar{U}_a}{\bar{Z}_1(s) + \bar{Z}_2(s) + \bar{Z}_0(s)} = \frac{\bar{U}_a}{2\bar{Z}_1(s) + \bar{Z}_0(s)} \quad (3.69)$$

Curentul total absorbit \bar{I}_a se obține astfel:

$$\bar{I}_a = 3\bar{i}_{a1} = \frac{3\bar{U}_a}{2\bar{Z}_1(s) + \bar{Z}_0(s)} \quad (3.70)$$

Rezultă astfel impedanța de succesiune directă $\bar{Z}_1(s)$:

$$\bar{Z}_1(s) = \frac{3 \frac{\bar{U}_a}{\bar{I}_a} - \bar{Z}_0(s)}{2} = \frac{3\bar{Z}_M(s) - \bar{Z}_0(s)}{2} \quad (3.71)$$

unde: $\bar{Z}_M(s) = \frac{\bar{U}_a}{\bar{I}_a}$ reprezintă impedanța totală a circuitului de măsură, care se poate determina prin măsurarea directă a tensiunii aplicate \bar{U}_a și a curentului absorbit \bar{I}_a .

Impedanța echivalentă a mașinii cu rotorul în stare de repaus $\bar{Z}_{er}(s)$ este:

$$\bar{Z}_{er}(s) = \bar{Z}_1(s) = \frac{3\bar{Z}_m(s) - \bar{Z}_0(s)}{2} \quad (3.72)$$

Rezultă că în cazul conexiunii monofazate a înfășurării statorului, impedanța echivalentă $\bar{Z}_{er}(s)$ se determină pe baza impedanței determinate experimental $\bar{Z}_m(s)$ și a impedanței de succesiune homopolară $\bar{Z}_0(s)$ care se consideră cunoscută pentru o mașină dată.

5.2.4. Conexiunea bifazată a înfășurării statorului cu două faze inseriate și a treia liberă

Schema echivalentă corespunzătoare acestei conexiuni a înfășurării statorice este arătată în fig.3.6.b.

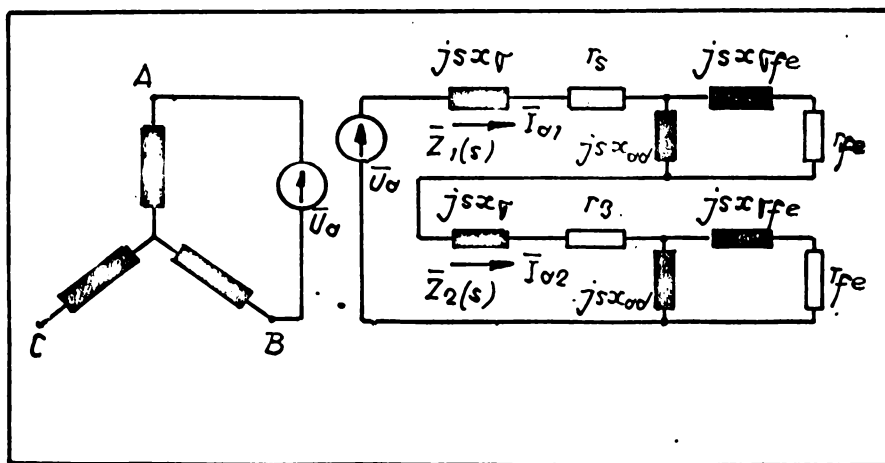


Fig.3.6.b. Schema echivalentă de funcționare la conectarea bifazată.

Utilizând metoda descompunerii în componente simetrice și ținând cont de faptul că în acest caz componenta homopolară lipsște, obținem pentru curentul prin faze întregutate:

$$\bar{I}_a = \bar{I}_{a1} + \bar{I}_{a2} = 0 \quad (3.73)$$

Rezultă deci:

$$\bar{I}_{a1} = -\bar{I}_{a2}$$

Pentru fazele inseriate rezultă:

$$|\bar{I}_b| = |\bar{I}_c| = \sqrt{3} |I_{a1}|$$

Componenta de succesiune directă a curentului I_{a1} va fi:

$$\bar{I}_{a1} = \frac{\bar{I}_b}{\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\bar{U}_a}{2Z_1} = \frac{\bar{U}_1}{2Z_1} \quad (3.74)$$

unde: $U_1 = \frac{U}{\sqrt{3}}$ reprezintă tensiunea de fază a înfășurării statorice.

Rezultă pentru impedanța de succesiune directă o expresie de forma:

$$\bar{Z}_1 = \frac{\bar{U}_a}{2\bar{I}_b} = \frac{\bar{Z}_{m2}}{2}$$

unde Z_{m2} reprezintă impedanța totală conectată la bornele sursei de tensiune alternativă monofazată.

Impedanța echivalentă a mașinii cu rotorul în stare de repaus în cazul conectării bifazate a înfășurării statorice este:

$$\bar{Z}_r(s) = \bar{Z}_1(s) = \frac{\bar{Z}_{m2}}{2} \quad (3.75)$$

3.2.5. Conectarea trifazătă a înfășurării statorice la o sursă de tensiune monofazătă

Această conectare se realizează conform fig.3.d.c două faze în paralel în serie cu a treia fază.

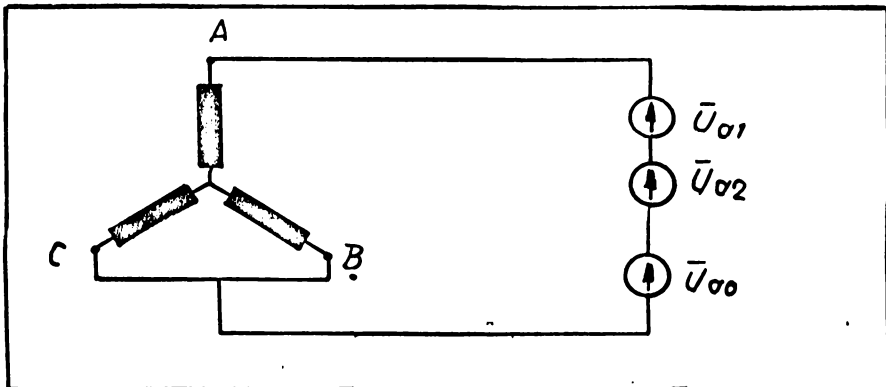


Fig.3.d.c. Schema echivalentă de funcționare la conectarea trifazătă.

Aplicind metoda descompunerii in componente simetrice in acest caz, obținem pentru componentele tensiunii fazei statorice.

$$\overline{U}_{a1} = \overline{U}_{a2} = \overline{U}_{a0} = \frac{1}{3} \overline{U}_a \quad (3.76)$$

Pentru mașina in stare de repaus, in acest caz de conexiuni, obținem:

$$\overline{Z}_1(S) = \overline{Z}_2(S)$$

respectiv : $\overline{I}_{a1} = \overline{I}_{a2} = \frac{\overline{I}_a}{2}$

Intru-cit componenta homopolară a curentului lipsește, obținem pentru componenta de succesiune directă a curentului:

$$\overline{I}_{a1} = \frac{\overline{U}_{a1}}{\overline{Z}_1(S)}$$

Impedanța de succesiune directă $\overline{Z}_1(S)$ este:

$$\overline{Z}_1(S) = \frac{\overline{U}_{a1}}{\overline{I}_{a1}} = \frac{\frac{1}{3} \overline{U}_a}{\frac{1}{2} \overline{I}_a} = \frac{2}{3} \frac{\overline{U}_a}{\overline{I}_a}$$

$$\overline{Z}_1(S) = \frac{2}{3} \overline{Z}_{m3}(S) \quad (3.77)$$

unde $\overline{Z}_{m3}(S)$ reprezintă impedanța totală a circuitului conectat la bornele sursei de tensiune alternativă monofazată.

Impedanța echivalentă $\overline{Z}_r(S)$ a mașinii in stare de repaus in cazul conectării trifazate conf. fig. 3.8.e, a înfășurării statorice este:

$$\overline{Z}_r(S) = \overline{Z}_1(S) = \frac{2}{3} \overline{Z}_{m3}(S) \quad (3.78)$$

Rezultă că in fiecare din cele 3 cazuri de conectare a înfășurării statorice se poate determina impedanța echivalentă $\overline{Z}_m(S)$ conectată la bornele sursei de tensiune alternativă monofazată, pe baza căreia se determină apoi impedanța echivalentă $\overline{Z}_r(S)$ a mașinii in stare de repaus.

Avind determinată impedanța echivalentă a mașinii în stare de repaus $\bar{Z}_r(S)$ din (3.65) rezultă impedanța echivalentă a mașinii în stare de rotație.

Avind determinată această mărime putem calcula în continuare componenta asincronă a cuplului electromagnetic în funcție de alunecare. Componenta asincronă a cuplului electromagnetic în unități relative este dată de relația cunoscută conf. [49] :

$$m_a = \left[\frac{\bar{u}}{\bar{Z}_e(S)} \right]^2 R_e \left[\bar{Z}_e(S) - r_n \right] \quad (3.79)$$

unde: \bar{u} - este tensiunea de alimentare ;

r_n - rezistența activă a înfășurării statorice la $f_n = 50\text{Hz}$

$\bar{Z}_e(S)$ - impedanța echivalentă a mașinii în stare de rotație.

Dacă se modifică frecvența f a tensiunii de alimentare alternative monofazate și se determină impedanța $\bar{Z}_e(S)$ corespunzătoare fiecărei valori a frecvenței f , începînd de la $f=0$ pînă la $f=50$ deci de la $S=0$ pînă la $S=1$, cu relația (3.79) se poate obține caracteristicile cuplului asincron funcție de alunecare:

$$m_a = f(S)$$

Această caracteristică se determină pentru cele două poziții distincte ale rotorului: după axa longitudinală și după axa transversală obținîndu-se astfel cele două componente ale cuplului asincron: după axa longitudinală m_{ad} și după axa transversală (m_{aq}) funcție de alunecare.

Caracteristica resultantă a cuplului asincron se obține făcînd medie aritmetică a celor două componente: m_{ad} și m_{aq} :

$$m_a = \frac{m_{sd} + m_{sq}}{2} \quad (3.80)$$

Pentru obținerea unor rezultate cît mai concludente este necesar ca determinarea caracteristicii cuplului asincron prin metoda alimentării cu tensiune alternativă monofazată să se facă cu mașina de încercat în stare magnetizată.

Premagnetizarea circuitului magnetic se realizează prin

stabilirea infăgurării circuitului rotoric a unui curent de magnetizare egal cu curentul de excitație de mers în gol al mașinii sincrone, corespunzător tensiunii nominale la borne.

În aceste condiții de premagnetizare a circuitului magnetic, valorile obținute pentru impedanța echivalentă $\bar{Z}_{es}(S)$ nu depind de mărimea curentului alternativ utilizat în timpul încercărilor.

Valorile obținute pentru impedanța echivalentă $Z_{es}(S)$ sînt valori nesaturate.

Dacă notăm cu $\bar{Z}_{es}(S)$ impedanța echivalentă în condiții de saturație a circuitului magnetic obținem:

$$\bar{Z}_{es}(S) = r_{es}(S) + j x_{es}(S) \quad (3.81)$$

unde: r_{es} și x_{es} sînt valorile saturate ale rezistenței și reactanței echivalente ale mașinii de încercat.

În general, valorile saturate $r_{es}(S)$ și $x_{es}(S)$ ale rezistenței și reactanței echivalente diferă de mărimile corespunzătoare nesaturate $r_e(S)$ și $x_e(S)$ și se pot defini următorii coeficienți de saturație:

$$k_r = \frac{r_{es}(S)}{r_e(S)} \quad \text{și} \quad k_x = \frac{x_{es}(S)}{x_e(S)} \quad (3.82)$$

Coefficienții de saturație k_r și k_x rămîn aproape constanți cînd alunecarea variază într-un domeniu foarte mare (de la $S=1$ pînă la $S=0,2$) ceea ce crează posibilitatea determinării experimentale a acestor coeficienți, dacă se cunosc valorile saturate și nesaturate ale parametrilor $r_e(S)$ și $x_e(S)$ corespunzătoare unei singure valori a alunecării. Astfel valorile saturate ale parametrilor $r_{es}(S)$ și $x_{es}(S)$ se pot determina prin metoda pornirii directe la rețea a mașinii de încercat iar valorile nesaturate se determină prin metoda alimentării de la o sursă cu tensiune alternativă monofazată.

În concluzie se poate afirma că metoda descrisă de determinare a caracteristicilor de pornire în asincron prin metoda alimentării infăgurării statorice a mașinii în stare de repaus cu o tensiune alternativă monofazată de frecvență variabilă, permite obținerea unor rezultate suficient de precise și se poate aplica la încercarea tuturor mașinilor sincrone indiferent de putere sau tip constructiv.

C A P I T O L U L IV

APLICAREA PRACTICĂ A METODELOR DE DETERMINARE A
CARACTERISTICILOR DE PORNIRE A MOTORILOR SIN-
CRONE. REZULTATE SUPPLEMENTARE.

Aplicarea practică a metodelor de determinare a caracteristicilor de pornire a motoarelor sincrone, descrise în cap.3, a avut loc pe standul de încercări Mașini Electrice al Intreprinderii Constructoare de Mașini din Reșița.

În lucrare se prezintă rezultatele experimentale obținute la încercarea unui hidrogenerator destinat să funcționeze atât în regim de generator cât și în regim de motor sincron, având următoarele caracteristici principale:

- Tipul mașinii: Generator-motor tip : "GROSC 440/132-48"
- Puterea nominală: aparentă $S=14.250$ kVA
- Tensiunea nominală: $U_n=6300$ V
- Curentul nominal: $I_n=1306$ A
- Turatia nominală: $n = 125$ r.p.m.

Mașina de încercat având în total o greutate de cca.120 tone a fost montată pe standul de probă și antrenată în regim de generator cu un motor de antrenare de curent continuu de 2700 kW prin intermediul unui reductor de turatie. Pentru această mașină, în vederea determinării tuturor parametrilor de funcționare au fost aplicate metodele clasice de încercare prevăzute în normativele în vigoare: STAS 1893-86, STAS 2211-86.

În același timp, aceiași parametri au fost determinați și prin aplicarea metodelor descrise în cap.3, din prezenta lucrare: metodele bazate pe atenuarea unui curent continuu prin înfășurările mașinii cât și metoda alimentării cu frecvență variabilă.

4.1. Rezultate experimentale obținute prin metoda atenuării unui curent continuu stabilit în înfășurările mașinii sincrone

Mașina de încercat fiind în stare de repaus, rotorul a

fiind așezat pe rând în cele două axe: axa transversală și axa longitudinală în vederea determinării parametrilor după cele două axe.

4.1.1. Determinarea parametrilor după axa transversală din proba de atenuare a curentului continuu prin infăgurarea statorică

Mașina fiind în stare de repaus iar rotorul așezat în axa transversală în raport cu infăgurarile fazelor b-c, se alimentează infăgurarea statorică la bornele b-c cu un curent continuu I_0 , faza c rămânând liberă.

Schema de principiu a instalației folosite pentru încercare este dată în fig. 3.1.

Elementele componente ale acestei scheme au următoarele caracteristici:

- Rezistența infăgurării statorice pe fază:

$$R_1 = 0,020407$$

- Rezistența șuntului de măsură:

$$R_{sh} = 0,00559$$

- Sursa de alimentare E este un generator de curent continuu având tensiunea nominală: $U_n = 110$ V și curentul nominal $I_n = 600$ A.

- Întrerupătoarele K_1 și K_2 având curentul nominal 2500 A au posibilitatea acționării lor automate de la distanță.

Închizând întrerupătorul K_2 , întrerupătorul K_1 fiind deschis, se stabilește prin infăgurarile inseriate b-c ale mașinii de încercat, un curent continuu de valoare constantă I_0 . Prin intermediul întrerupătorului K_1 se scurtcircuitază bornele b-c ale infăgurării statorice, iar prin închiderea lui K_1 se dă automat comanda de deschidere a întrerupătorului K_2 .

Cu ajutorul unui oscilograf se înregistrează variația curentului din infăgurarea scurtcircuitată.

Considerându-se în anumit număr de puncte pe abscisă se citește valorile corespunzătoare ale ordonatelor din oscilograma atenuării curentului, rezultatele trecându-se în tabelul 4.1.

Ordonatele Y_i ale curbei curentului se atenuiază și citețesc în mm și apoi prin înmulțirea cu constanta de etalonare în curent K_s a buclei de oscilograf se obțin valorile în Amperi.

Tabelul 4.1

Atenuarea curentului în stator după axa α

Nr. crt.	Timp	Y	J _A	y/y ₀	In y
	sec	mm	A		
1.	0	104,9	443	1	4,653
2.	0,003	102,1	431,2	0,973	4,626
3.	0,006	99,9	421,9	0,952	4,604
4.	0,009	97,9	413,4	0,933	4,584
5.	0,012	96	405,4	0,915	4,564
6.	0,015	94,3	398,2	0,899	4,546
7.	0,018	92,2	391,4	0,879	4,524
8.	0,021	91	384,3	0,867	4,511
9.	0,024	89,5	378	0,853	4,494
10.	0,027	88,1	372	0,84	4,476
11.	0,032	86,2	364	0,822	4,457
12.	0,037	84,5	356,6	0,806	4,436
13.	0,042	83	350,5	0,791	4,419
14.	0,047	81,7	345	0,779	4,403
15.	0,052	80,2	338,7	0,765	4,384
16.	0,057	78,9	333,2	0,752	4,366
17.	0,062	77,8	328,5	0,742	4,354
18.	0,067	76,1	321,4	0,725	4,332
19.	0,072	75	316,8	0,715	4,317
20.	0,077	73,8	311,7	0,704	4,301
21.	0,087	71,4	301,5	0,681	4,266
22.	0,097	69	291,4	0,658	4,234
23.	0,107	67	282,8	0,639	4,205
24.	0,117	64,9	271,4	0,619	4,173
25.	0,127	63	266	0,601	4,143
26.	0,147	59	249,2	0,562	4,076
27.	0,167	55,2	233,1	0,526	4,011
28.	0,187	51,9	219,2	0,495	3,949
29.	0,207	48,7	205,7	0,464	3,886
30.	0,227	45,7	193	0,436	3,822
31.	0,277	39	164,7	0,372	3,664
32.	0,327	33,2	140,2	0,316	3,503
33.	0,377	28,7	121,2	0,273	3,357
34.	0,427	24,2	102,2	0,231	3,186
35.	0,477	20,8	87,8	0,198	3,035
36.	0,527	17,7	74,7	0,169	2,874

Tabelul 4.1 (Continuare)

Nr. crt.	Time	y	J_A	y/y_0	$\ln y$
	sec	mm	A		
37.	0,577	15,1	63,8	0,144	2,715
38.	0,627	13	54,9	0,124	2,565
39.	0,677	11,1	46,9	0,106	2,407
40.	0,727	9,8	41,4	0,093	2,282
41.	0,827	7	29,6	0,067	1,946
42.	0,927	5,2	22	0,05	1,649
43.	1,027	3,9	16,5	0,037	1,361
44.	1,127	2,8	11,8	0,027	1,030
45.	1,227	2,1	8,9	0,02	0,742

În fig.4.1 este dată reprezentarea grafică a funcției curentului în unități relative.

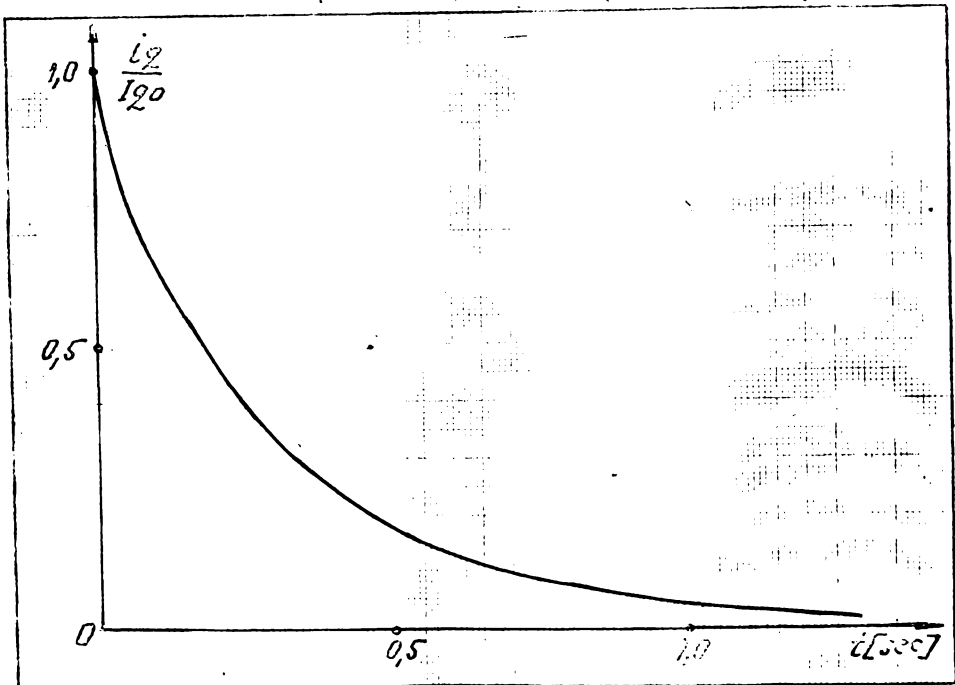


Fig.4.1. Atenuarea curentului în stator după axa q.

În general, această funcție este o sumă de componente exponențiale: $y = \sum_{i=1}^n Y_i \cdot e^{-t/T_i}$.

Pentru determinarea expresiei analitice a funcției curent-

tului ce se amortizează prin înfăgurarea scurtcircuitată, se logaritizează valorile ordonatelor curentului Y_1 și se reprezintă aceste valori în funcție de timp (fig.4.2.a-4.2.b). Se observă că pentru $t \rightarrow \infty$, funcția devine o linie dreaptă. Reprezentând această dreaptă și extrapolând-o până la $t=0$, obținem prima componentă exponențială logaritimată de forma:

$$Y_{1L} = A_1 \cdot t + B_1 \quad (4.1)$$

Din reprezentarea grafică rezultă: (fig.4.2.a):

- pentru $t=0$ se obține: $Y_{1L} = B_1 = 4,525$

- pentru $Y_L = 0$ se obține $A_1 = -3,117$.

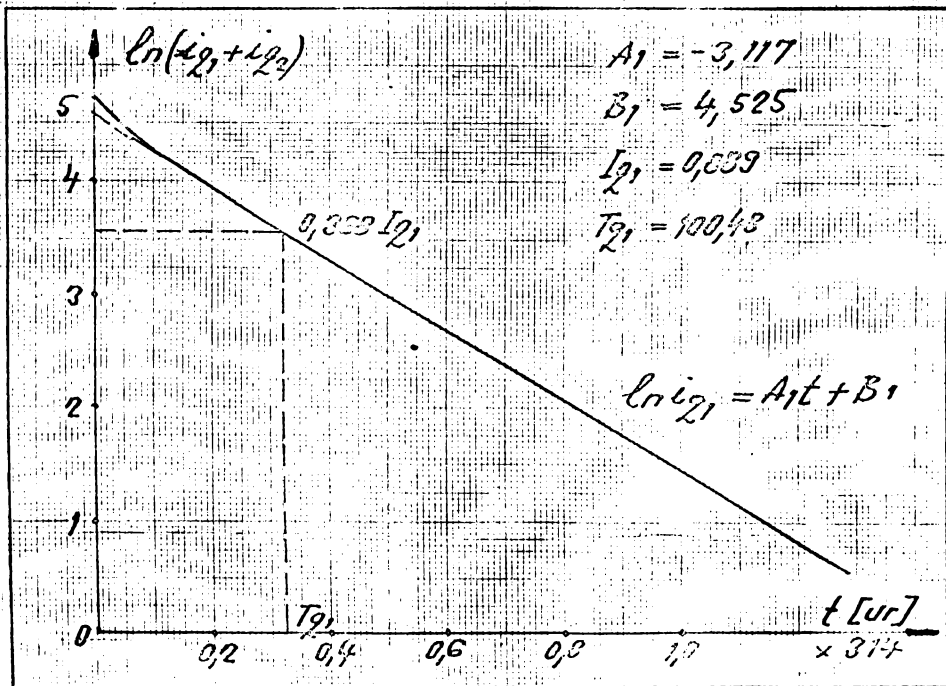


Fig.4.2.a. Separarea primei componente exponențiale.

Cu ajutorul acestor parametri determinați grafic se poate scrie expresia analitică a primei componente exponențiale sub forma:

$$Y_1 = Y_{1L} \cdot e^{-\frac{t}{T_1}}$$

unde: $Y_1 = e^{\frac{B_1}{Y_0}} \cdot \frac{1}{Y_0} = 0,889 \text{ u.r.}$

$$T_1 = -\frac{C}{A_1} = 100,43 \text{ u.r.}$$

Pentru separarea grafică a celei de-a doua componente exponențiale se face diferența între curba inițială $y(t)$ și prima componentă exponențială $y_1(t)$ și rezultă:

$$y_2(t) = y(t) - y_1(t)$$

Prin logaritizarea acestei curbe și reprezentarea acestor valori în funcție de timp obținem o variație dată în fig.4.2.b. Se observă că această curbă este o funcție liniară de forma:

$$Y_{2L} = A_2 t + B_2$$

$$\text{unde : } B_2 = 2,45$$

$$- \frac{B_2}{A_2} = 0,0426$$

$$A_2 = -56,92$$

Cea de-a doua componentă exponențială se reprezintă printr-o funcție analitică de forma:

$$y_2(t) = Y_2 e^{-t/T_2}$$

$$\text{unde: } Y_2 = e^{B_2} \cdot \frac{1}{y_0} = 0,111 \text{ u.r.}$$

$$T_2 = - \frac{\omega}{A_2} = 5,526 \text{ u.r.}$$

Rezultă că funcția $y(t)$ care reprezintă atenuarea curentului continuu după axa transversală este o sumă de două componente exponențiale de forma:

$$y(t) = Y_1 \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} + Y_2 \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} = 0,889 \cdot e^{-\frac{t}{100,48}} + 0,111 \cdot e^{-\frac{t}{5,526}}$$

Dacă introducem notațiile corespunzătoare axei transversale, obținem pentru curentul transversal expresia:

$$i_q(t) = I_{q1} \cdot e^{-\frac{t}{T_{q1}}} + I_{q2} \cdot e^{-\frac{t}{T_{q2}}}$$

$$\text{unde: } I_{q1} = Y_1 = 0,889 ; I_{q2} = Y_2 = 0,111$$

$$T_{q1} = T_1 = 100,48 ; T_{q2} = T_2 = 5,526$$

Pe baza acestor rezultate putem determina parametrii mașinii după axa transversală după cum urmează:

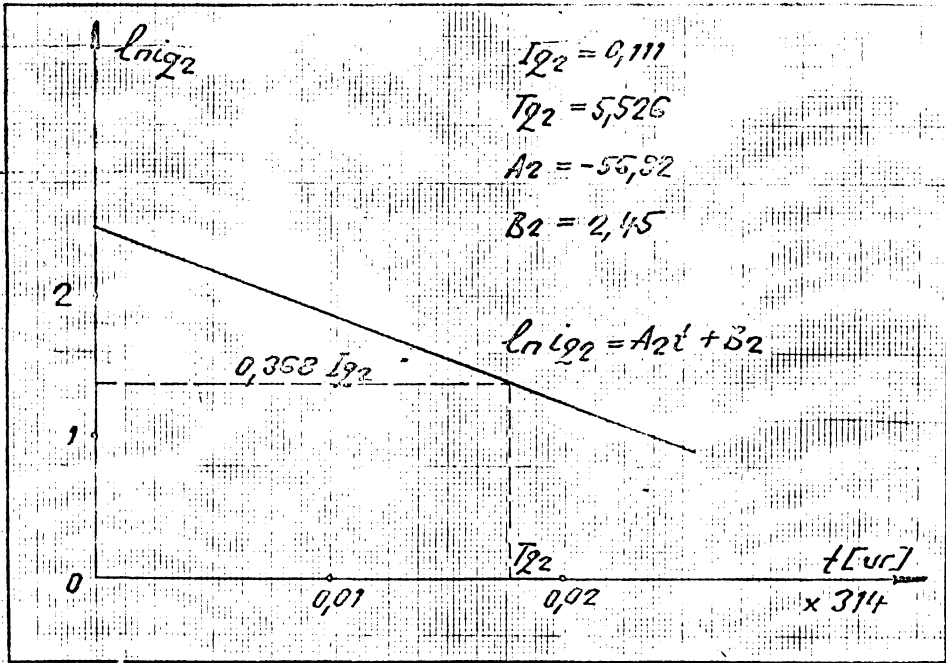


Fig.4.2.b. Separarea celei de-a doua componente exponentiale.

1. Constanta de timp a infuzării de amortizare T_Q :
(rezultă din relațiile (3.6))

$$T_Q = T_{q1} + T_{q2} - (I_{q1} T_{q1} + I_{q2} T_{q2}) = 100,48 + 5,526 - (0,889 \cdot 100,48 + 0,111 \cdot 5,526) = 16,07$$

$$T_Q = 16,07$$

2. Coeficientul de dispersie: $\tilde{\sigma}_{qQ}$

Rezultă din relația (3.8)

$$\tilde{\sigma}_{qQ} = \frac{T_{q1} \cdot T_{q2}}{T_Q (T_{q1} \cdot I_{q1} + T_{q2} \cdot I_{q2})}$$

$$\tilde{\sigma}_{qQ} = \frac{100,48 \cdot 5,526}{16,07 (0,889 \cdot 100,48 + 0,111 \cdot 5,526)} = 0,385$$

$$\tilde{\sigma}_{qQ} = 0,385$$

3. Reactanța sincronă după axa transversală X_q

Rezultă din relația:

$$x_q = r_a' \cdot T_{mq} = r_a' (T_{q1} \cdot I_{q1} + T_{q2} \cdot I_{q2})$$

$$\text{unde : } r_a' = r_1 + \frac{r_s R}{2} = 0,006669 \text{ u.r.}$$

Rezultă pentru reactanța sincronă valoarea:

$$x_q = 0,006669(0,329 \cdot 100,48 + 0,111 \cdot 5,526) = 0,797$$

$$x_q = 0,797$$

Reactanța operațională $X_q(p)$

Introducem în expresia (2.31) a reactanței operaționale $X_q(p)$ determinată în cap.2, valorile parametrilor obținuți mai sus și obținem:

$$\tilde{x}_q(p) = x_q \frac{pT_q \sqrt{q\omega} + 1}{pT_q + 1} = \frac{p \cdot 16 \cdot 07 \cdot 0,365 + 1}{p \cdot 16,07 + 1} x_q$$

$$\tilde{x}_q(p) = \frac{p \cdot 6,167 + 1}{p \cdot 16,07 + 1} \cdot 0,797$$

valorile limită ale reactanței operaționale $X_q(p)$ sînt:

- pentru regimul staționar aceasta devine:

$$X_q(t = \infty) = X_q(p=0) = x_q = 0,797$$

care este reactanța sincronă

- pentru regimul supratranzitoriu obținem:

$$X_q(t=0) = X_q(p=\infty) = x_q \cdot \sqrt{q\omega} = 0,797 \cdot 0,365$$

care este tocmai reactanța supratranzitorie după axa transversală.

Rezultă astfel:

$$x_q'' = x_q \cdot \sqrt{q\omega} = 0,3066$$

4.1.2. Determinarea parametrilor după axa longitudinală

din proba de atenuare a curentului continuu în înfăsurarea statorică, cu înfășurarea rotorică deschisă.

Schema de principiu a instalației utilizate pentru încercare

este dată în fig.3.2.

Elementele componente ale schemei de încercare au aceleași caracteristici ca cele prezentate în cazul schemei din fig.3.1.

Închizând întrerupătorul K_2 , întrerupătorul K_1 fiind deschis, se stabilește prin înfășurările inseriate b-c ale mașinii de încercat un curent continuu de valoare constantă I_0 . Prin intermediul întrerupătorului K_1 se scurtcircuitează bornele b-c ale înfășurării statorice, în același timp întrerupătorul K_2 se deschide și se înregistrează cu oscilografal variația curentului în timp care este o funcție de forma:

$$i_d(t) = \sum_{i=1}^n I_{di} \cdot e^{-\frac{t}{T_{di}}}$$

Pentru a determina grafic această funcție care este o sumă de componente exponențiale, se prelucreză oscilograma citindu-se valorile curentului în [mm] în funcție, de timp și rezultatele obținute se trec în tabelul 4.2.

Tabelul 4.2.

Atenuarea curentului în stator cu rotorul în gol

Nr. crt.	Timp sec	y mm	y_A A	y/y_0	$\ln y$
1	0	69	504,997	1	4,234
2	0,002	66,2	499,142	0,988	4,222
3	0,007	66,2	484,505	0,959	4,193
4	0,012	64,03	468,623	0,928	4,159
5	0,017	63,36	463,719	0,918	4,149
6	0,022	62,6	458,157	0,907	4,137
7	0,027	61,5	450,106	0,891	4,119
8	0,032	60,8	444,983	0,881	4,108
9	0,037	59,7	436,932	0,865	4,089
10	0,042	59	431,809	0,855	4,078
11	0,047	58,1	425,222	0,842	4,062
12	0,052	57,45	420,465	0,833	4,051
13	0,057	56,8	415,708	0,823	4,04
14	0,067	55,5	406,193	0,804	4,016
15	0,077	54,3	397,411	0,787	3,995
16	0,087	53	387,896	0,768	3,97
17	0,097	51,83	379,333	0,751	3,948
18	0,107	50,7	371,063	0,735	3,926
19	0,117	49,6	363,012	0,719	3,904

Tabelul 4.2. (Continuare)

Nr. crt.	Tim sec	y mm	y _A A	y/y ₀	Iay
20	0,127	46,42	354,376	0,702	3,68
21	0,137	47,37	346,692	0,687	3,658
22	0,147	46,24	338,421	0,67	3,634
23	0,157	45,24	331,103	0,656	3,612
24	0,177	43,3	316,904	0,626	3,766
25	0,197	41,26	301,974	0,596	3,72
26	0,217	39,45	288,727	0,572	3,675
27	0,237	37,7	275,919	0,546	3,63
28	0,257	36	263,477	0,522	3,584
29	0,277	34,5	252,499	0,5	3,541
30	0,279	33	241,52	0,476	3,497
31	0,327	30,9	226,151	0,448	3,431
32	0,357	28,84	211,074	0,418	3,362
33	0,387	26,97	197,368	0,391	3,295
34	0,417	25,02	183,116	0,363	3,22
35	0,447	23,45	171,626	0,34	3,155

În fig.4.3 se reprezintă grafic variația curentului în funcție de timp, curentul fiind exprimat în unități relative.

În fig.4.4.a se reprezintă variația funcției curentului logaritmată. Se observă că pentru $t \rightarrow \infty$ valorile curentului se înscriu pe o linie dreaptă. Extrapolând această dreaptă pînă la $t=0$ obținem prima componentă exponențială logaritmată a funcției curentului după axa longitudinală de forma:

$$i_{d1L} = A_1 \cdot t + B_1$$

Din reprezentarea grafică a acestei drepte rezultă coeficienții A_1 și B_1 , avînd valorile:

$$A_1 = -2,27$$

$$B_1 = 4,16$$

Rezultă astfel pentru prima componentă exponențială a curentului după axa longitudinală, expresia:

$$i_{d1}(t) = i_{d10} e^{-t/T_{d1}}$$

unde: $I_{d01} = \frac{1}{T_0} \cdot e^{B_1} = 0,94$; $T_{d01} = -\frac{1}{A_1} \cdot = 138,3$

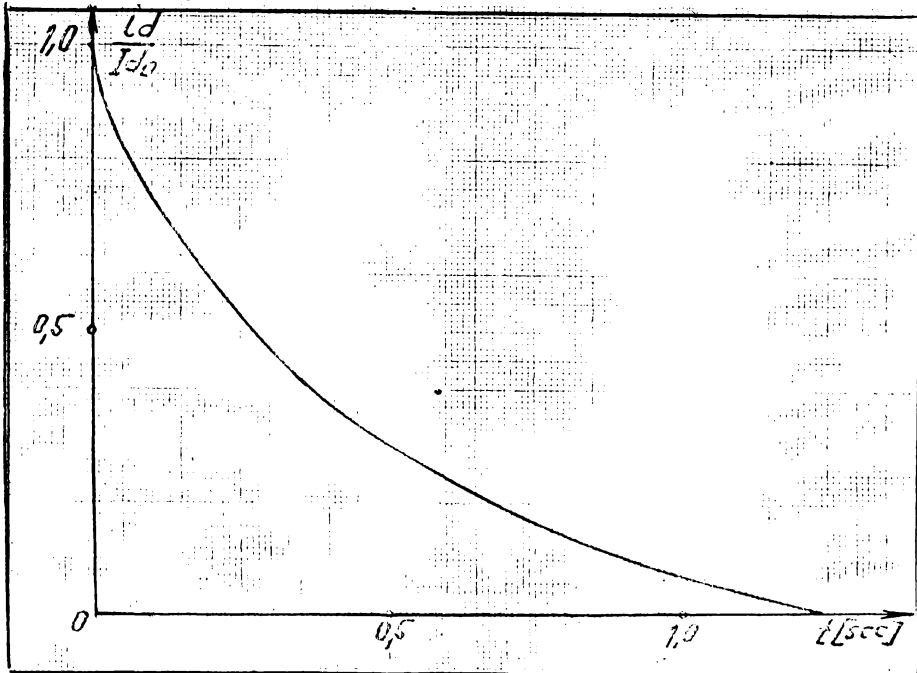


Fig.4.3. Atenuarea curentului în stator cu înfășurarea rotorică deschisă

Pentru separarea grafică a următoarei componente exponențiale se face diferența dintre curba $I_d(t)$ a curentului și prima componentă exponențială $i_{d1}(t)$ și se obține o curbă care se logaritmează din nou care apoi se reprezintă grafic în fig.4.4.b. Se observă că această funcție este o linie dreaptă și ea se va reprezenta a doua componentă exponențială logaritmată a curbei curentului avînd forma:

$$i_{d2L} = A_2 \cdot t + B_2$$

Din reprezentarea grafică a acestei drepte rezultă valorile coeficienților A_2 și B_2 :

$$A_2 = -31,1$$

$$B_2 = 1,48$$

Rezultă astfel pentru a doua componentă exponențială a curentului după axa longitudinală expresia:

$$i_{d2}(t) = I_{d2} \cdot e^{-t/T_{d2}}$$

unde : $T_{do2} = \frac{1}{I_0} \cdot e^{B_2} = 0,06$; $T_{do2} = -\frac{1}{A_2} \cdot = 3,87$

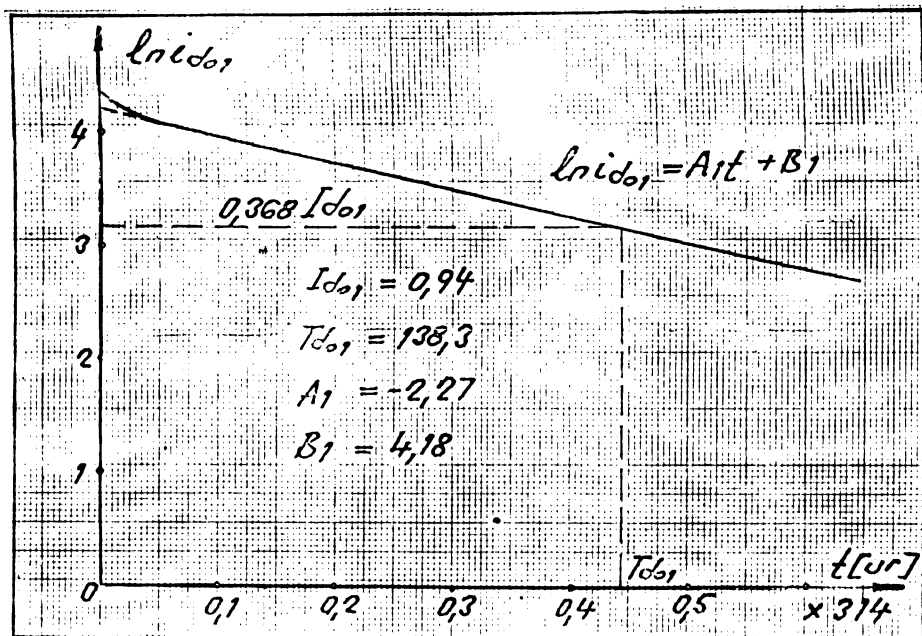


Fig.4.4.a. Separarea primei componente exponențiale.

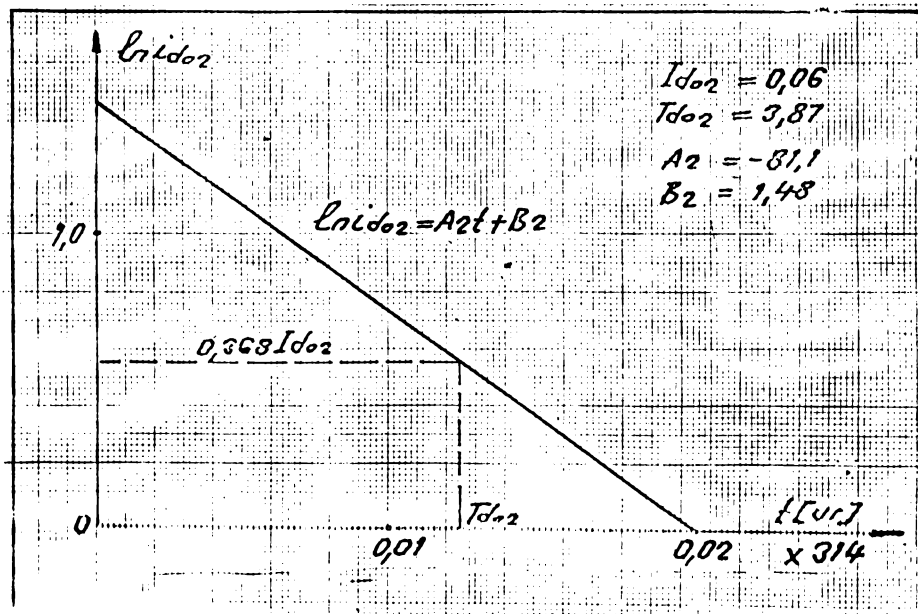


Fig.4.4.b. Separarea celei de-a doua componente exponențiale.

In concluzie, funcția $i_d(t)$ a curentului după axa longitudinală reprezintă o sumă de două componente exponențiale:

$$i_d(t) = I_{d01} \cdot e^{-\frac{t}{T_{d1}}} + I_{d02} \cdot e^{-\frac{t}{T_{d2}}}$$

Utilizând relațiile de calcul (3.23)-(3.25) stabilite în cap.3, rezultă următorii parametri după axa longitudinală în condițiile în care înfășurarea statorică este deschisă:

Constanta de timp a înfășurării de amortizare după axa d: T_D :

Se calculează cu relația (3.24):

$$T_D = T_{d1} + T_{d2} - (I_{d1} \cdot T_{d1} + I_{d2} \cdot T_{d2}) = 138,3 + 3,87 - (138,3 \cdot 0,94 + 3,87 \cdot 0,06) =$$

$$T_D = 142,17 - 130,23 = 11,94$$

$$T_D = 11,94$$

Coefficientul de dispersie $\sqrt{\sigma_{dD}}$

Se calculează cu relația (3.25):

$$\sqrt{\sigma_{dD}} = \frac{T_{d1} \cdot T_{d2}}{T_D \cdot (I_{d1} \cdot T_{d1} + I_{d2} \cdot T_{d2})} = \frac{138,3 \cdot 3,87}{11,94 (138,3 \cdot 0,94 + 3,87 \cdot 0,06)} = 0,344$$

$$\sqrt{\sigma_{dD}} = 0,344$$

Reactanța sincronă după axa longitudinală x_d

Se calculează cu relația

$$x_d = r_a' (I_{d1} \cdot T_{d1} + I_{d2} \cdot T_{d2}) T$$

unde $r_a' = 0,007986$ u.r. (din datele schemei de încercare)

Rezultă:

$$x_d = 0,007986 (138,3 \cdot 0,94 + 3,87 \cdot 0,06) = 1,04 \text{ u.r.}$$

$$x_d = 1,04 \text{ u.r.}$$

Reactanța operațională longitudinală $\tilde{X}_{d0}(\rho)$

Introducând în relația (2.34) valorile parametrilor determinați anterior, obținem expresia reactanței operaționale după axa

longitudinală $X_{d0}(p)$, pentru cazul fiind înfășurarea rotorului este deschisă:

$$\tilde{X}_{d0}(p) = x_d \frac{p \cdot \sqrt{dD}^2 + 1}{p \cdot T_D + 1} = 1,04 \frac{p \cdot 0,344 \cdot 11,94 + 1}{p \cdot 0,344 + 1}$$

$$\tilde{X}_{d0}(p) = \frac{4,271 \cdot p + 1}{0,344 \cdot p + 1}$$

valorile limită ale reactanței operaționale longitudinale cu înfășurarea rotorului în gol, vor fi:

- pentru regimul staționar ($p=0$; $t=\infty$)

$$X_{d0}(t=\infty) = X_{d0}(p=0) = x_d = 1,04$$

- pentru regimul supratranzitoriu ($p=\infty$; $t=0$)

$$X_{d0}(t=0) = X_{d0}(p=\infty) = x_d \cdot \sqrt{dD} = x_d''$$

Rezultă reactanța supratranzitorie x_d'' a mașinii cu înfășurarea de excitație deschisă:

$$x_d'' = 0,357$$

4.1.3. Determinarea parametrilor după axe longitudinală din probe de atenuare a curentului continuu în înfășurarea rotoricea, cu înfășurarea statorică deschisă.

Schema de principiu a instalației utilizate pentru încercare este dată în fig.3.3.

Elementele componente ale schemei de încercare au următoarele caracteristici:

- Rezistența înfășurării rotorice:

$$R_r = 0,6059$$

- Rezistența ghintului de măsură:

$$R_{sh} = 0,006317$$

- Sursă de alimentare E este un generator de curent continuu avînd tensiunea nominală $U_n = 220$ V și curentul nominal $I_n = 250$ A.

- intrerupătoarele K_1 și K_2 avînd curentul nominal $I_n = 2500$ A au posibilitatea acționării lor automate de la distanță.

Se stabilește prin circuitul rotorului un curent I_{f0} . Prin intermediul intrerupătorului K_1 se scurtcircuitează bornele înfășurării de excitație în același timp intrerupătorul K_2 deschizîndu-se în mod automat contactele.

Se înregistrează cu ajutorul oscilografului variația curentului în timp care este în acest caz o funcție de forma:

$$i_f(t) = \sum_1^2 I_{fi} \cdot e^{-\frac{t}{T_{fi}}} = I_{f1} \cdot e^{-\frac{t}{T_{f1}}} + I_{f2} \cdot e^{-\frac{t}{T_{f2}}}$$

Se prelucrează oscilograma curentului ce se atenuează și valorile corespunzătoare citite se trec în tabelul 4.3.

În fig.4.5. se reprezintă variația curentului de excitație în funcție de timp, curentul fiind exprimat în unități relative.

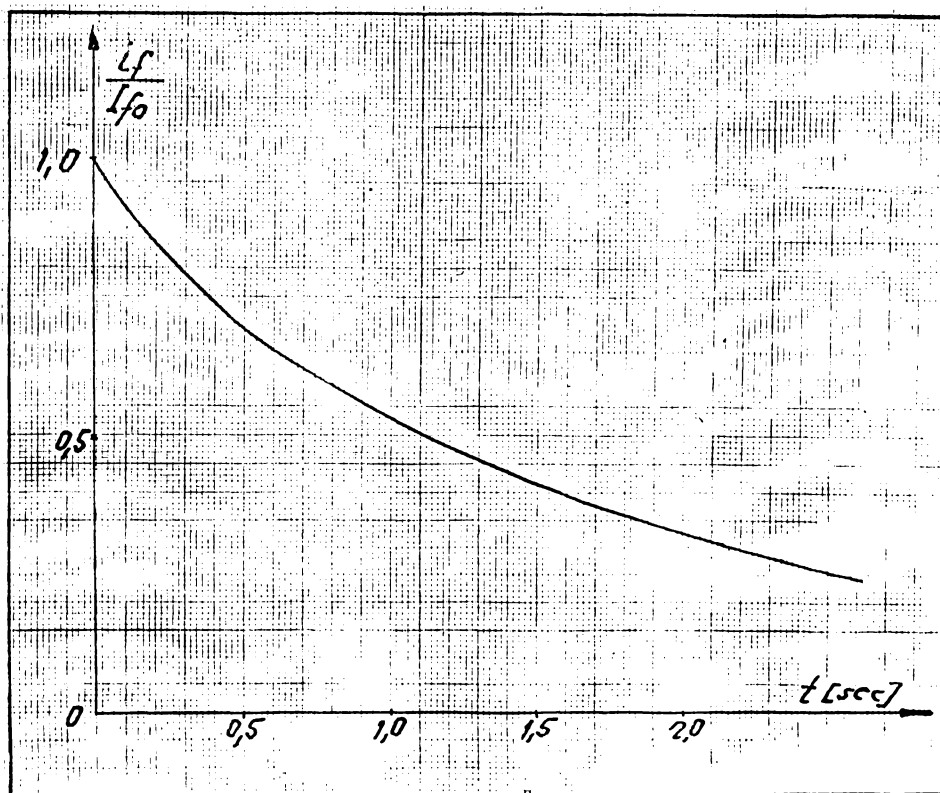


Fig.4.5

Tabelul 4.3

Atenuarea curentului în rotor cu statorul în gol.

Nr. crt.	Timp		Curent rotor		
	sec	mm	A	y/ye	In
1	0	102,1	194,5	1	4,626
2	0,02	100,4	191,262	0,983	4,609
3	0,04	98,3	187,261	0,963	4,588
4	0,06	96,9	184,594	0,949	4,574
5	0,08	95,4	181,737	0,934	4,558
6	0,1	93,8	178,689	0,919	4,541
7	0,12	92,3	175,831	0,904	4,525
8	0,14	90,87	173,107	0,889	4,509
9	0,21	86,5	164,782	0,847	4,46
10	0,26	83,7	159,448	0,82	4,427
11	0,31	81	154,305	0,793	4,394
12	0,36	78,8	141,16	0,726	4,305
13	0,46	70	138,35	0,686	4,248
14	0,61	68	129,54	0,666	4,22
15	0,66	66,2	126,111	0,648	4,193
16	0,71	64,8	123,444	0,635	4,171
17	0,76	63	120,05	0,617	4,143
18	0,81	61,5	117,157	0,602	4,119
19	0,86	60	114,3	0,588	4,094
20	0,91	58,5	111,442	0,573	4,069
21	0,96	57	108,585	0,558	4,043
22	1,01	55,5	105,727	0,544	4,016
23	1,06	54,2	103,251	0,531	3,993
24	1,26	49	93,345	0,48	3,892
25	1,46	44,9	85,534	0,44	3,804
26	1,66	40,8	77,724	0,4	3,709
27	1,86	37	70,486	0,362	3,611
28	2,06	34	64,77	0,333	3,526
29	2,26	31	59,055	0,304	3,434
30	2,66	25,9	49,339	0,254	3,254

În fig.4.6.a se reprezintă grafic variația funcției curentului în coordonate semilogaritmice. Pentru valori mari a lui t ($t \rightarrow \infty$) curba tinde spre o linie dreaptă. Extrapolând dreapta obținută până la $t=0$ obținem prima componentă de forma:

$$i_{r1L} = A_1 t + B_1$$

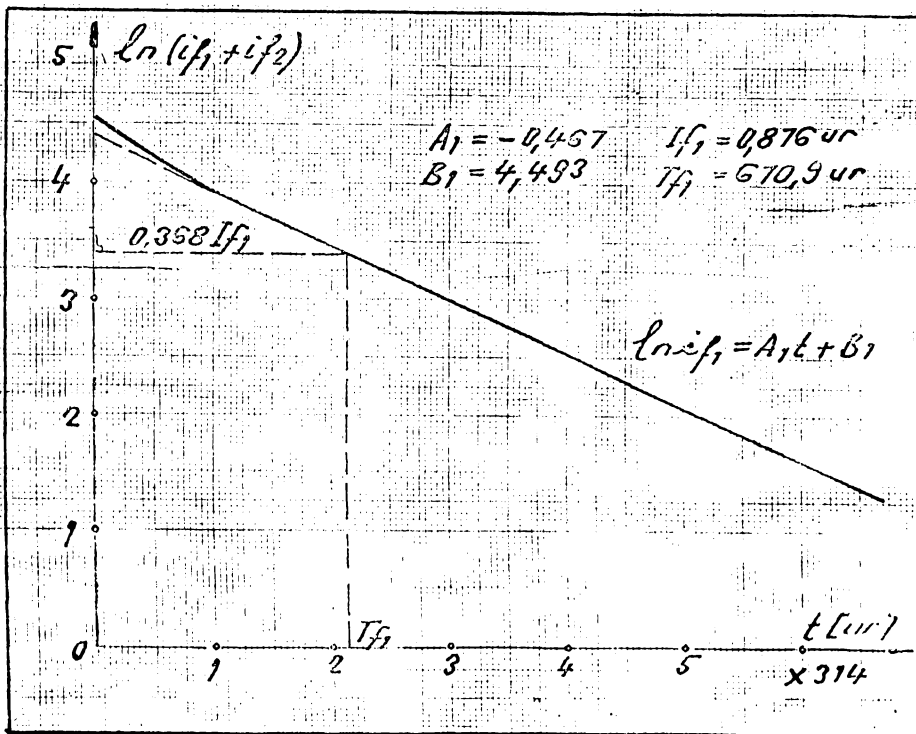


FIG.4.6.a. Separarea primei componente exponențiale.

Din curba inițială a funcției $i_f(t)$ se scade prima componentă exponențială exponențială obținută care este de forma:

$$i_{f1}(t) = I_{f1} \cdot e^{-\frac{t}{T_{f1}}}$$

$$\text{unde: } I_{f1} = \frac{1}{I_{f0}} \cdot B_1 = \frac{1}{102,1} \cdot 4,493 = 0,076$$

$$T_{f1} = -\frac{1}{A_1} \cdot \omega = -\frac{1}{-0,467} \cdot 314 = 670,9$$

Funcția diferență obținută:

$$i_{f2}(t) = i_f(t) - i_{f1}(t)$$

se reprezintă grafic în coordonate semilogaritmice. Punctele reprezentate se înscriu pe o dreaptă de forma:

$$i_{f2L} = A_2 t + B_2$$

unde A_2 și B_2 rezultă din fig.4.6.b.

Deci funcția $i_f(t)$ se descompune în două componente exponențiale.

A doua componentă exponențială este:

$$i_{f2} = I_{f2} \cdot e^{-\frac{t}{T_{f2}}}$$

unde:

$$I_{f2} = \frac{1}{I_{f0}} \cdot B_2 = \frac{1}{102,1} \cdot 2,53 = 0,124$$

$$T_{f2} = -\frac{1}{A_2} \cdot \omega = -\frac{1}{-4,104} \cdot 314 = 76,51$$

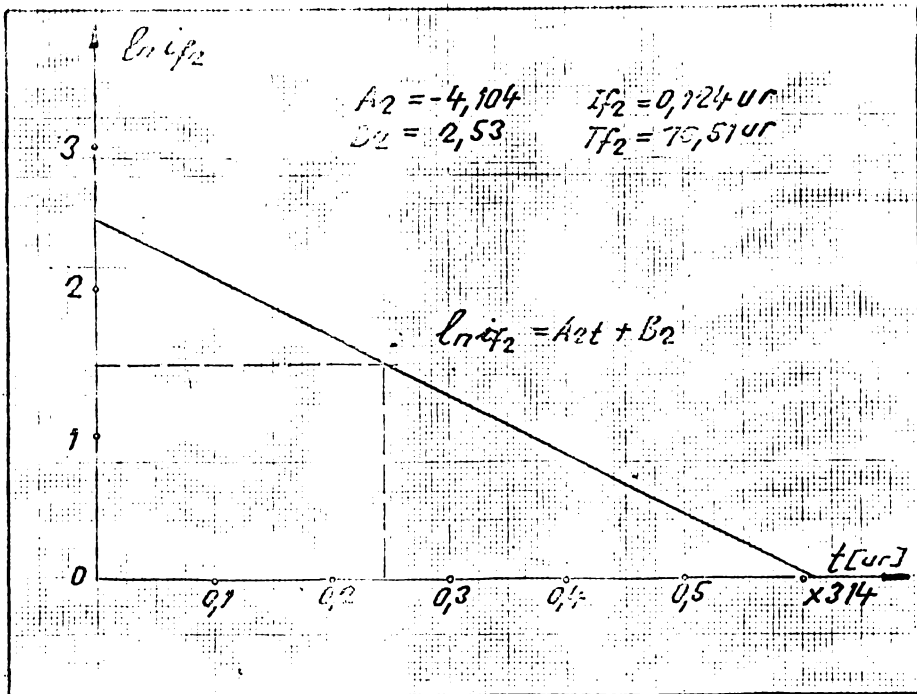


Fig.4.6.b. Separarea celei de a doua componente exponențiale.

În concluzie funcția $i_f(t)$ care reprezintă variația curentului de excitație prin înfășurarea scurtcircuitată a rotorului este o sumă de două componente exponențiale:

$$i_f(t) = I_{f1} \cdot e^{-\frac{t}{T_{f1}}} + I_{f2} \cdot e^{-\frac{t}{T_{f2}}}$$

Utilizând relațiile de calcul stabilite în capitolul 3

obținerea următorii parametri după axa longitudinală pentru înfășurarea de excitație, înfășurarea statorică fiind deschisă.

Coefficientul de dispersie $\sqrt{f_D}$ al înfășurării de excitație față de înfășurarea de amortizare

Utilizând relația (3.45) obținem pentru coeficientul de dispersie $\sqrt{f_D}$ valoarea:

$$\sqrt{f_D} = \frac{T_{f1} \cdot T_{f2}}{[(T_{f1} + T_{f2}) - (l_{f1} T_{f1} + l_{f2} T_{f2})] (l_{f1} \cdot T_{f1} + l_{f2} \cdot T_{f2})}$$

$$\sqrt{f_D} = \frac{670,9 \cdot 76,51}{[(670,9 + 76,51) - (0,876 \cdot 670,9 + 0,124 \cdot 76,51)] \cdot 597,18}$$

$$\sqrt{f_D} = 0,572.$$

Reactanța înfășurării de excitație : x_f

Utilizând relația 3.46 obținem:

$$x_f = r_f^i \cdot T_{f1} \cdot l_{f1} + T_{f2} \cdot l_{f2}$$

unde: $r_f^i = r_f + r_{sh} = 0,2198$ u.r.

Rezultă:

$$x_f = 0,2198(0,876 \cdot 670,9 + 0,124 \cdot 76,51) = 0,2198 \cdot 597,18 = 130,8 \%$$

$$x_f = 130,8 \%$$

4.1.4. Determinarea parametrilor după axa longitudinală din proba de atenuare a curentului continuu prin înfășurarea statorului, înfășurarea rotorului fiind scurtcircuitată.

Schema de principiu a instalației utilizate pentru încercare este dată în fig.3.4. Elementele componente ale schemei de încercare au aceleași caracteristici ca cele din scheme din fig.

De la sursa E se stabilește prin circuitul format de fazele b și c inseriate un curent I_{d0} . Prin intermediul intrerupă-

terului K_1 se scurtcircuitează bornele b-c ale înfășurării statoreice în același timp întrerupându-se circuitul de alimentare prin intermediul întrerupătorului K_2 .

Se înregistrează cu ajutorul oscilografului variația curentului în timp care va fi o funcție de forma:

$$i_d(t) = \sum_{i=1}^n I_{di} \cdot e^{-\frac{t}{T_{di}}}$$

După prelucrarea oscilogramei se obține tabelar funcția $i_d(t)$, datele fiind trecute în tabelul 4.4., reprezentarea grafică fiind dată în fig.4.7.

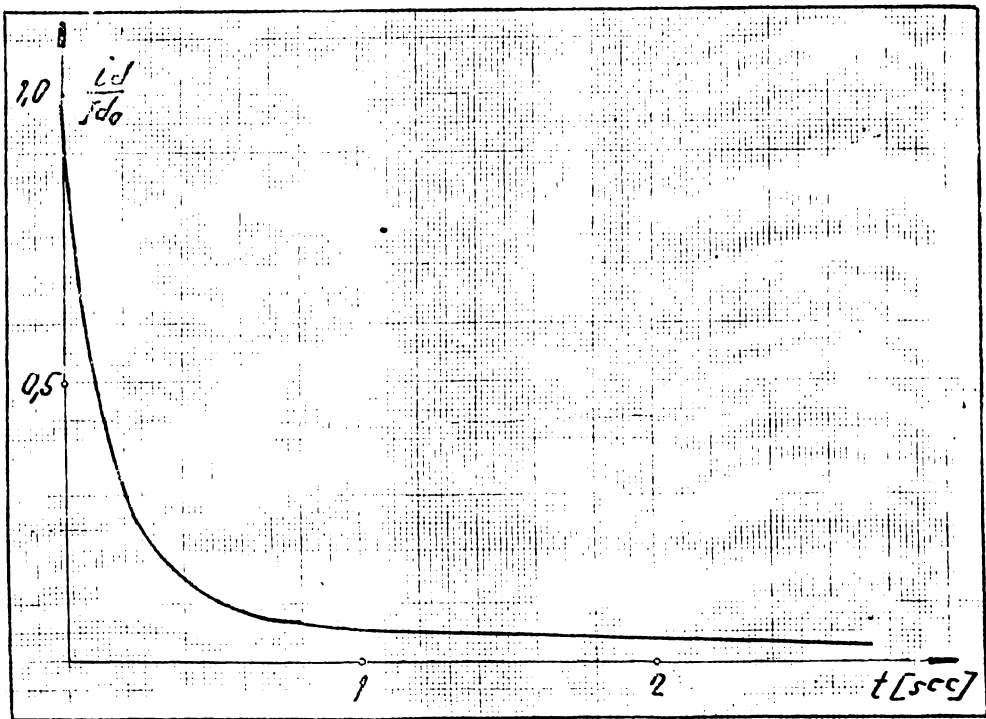


Fig.4.7. Atenuarea curentului în stator cu rotorul în scurtcircuit după axa d.

Se reprezintă la scară semilogaritmică această funcție și se determină componentele exponențiale care intră în expresia funcției curentului.

Tabel nr.4.4

Stingera cimpului in stator cu rotorul in scurtcircuit axa d

Nr. crt.	Timp sec	Curent stator			Curent rotor		
		mm	A	y/yo	In	mm	A
1	0	99,5	414	1	4,6	0	0
2	0,0033	97	406,1	0,981	4,581	1,7	2,1
3	0,0067	94,8	394,5	0,953	4,552	5	6,3
4	0,01	92,8	386,1	0,933	4,53	6,5	8,2
5	0,0133	90,9	378,2	0,913	4,51	8,8	11,1
6	0,0167	88,9	369,9	0,893	4,487	10,9	13,7
7	0,02	86,3	359,1	0,867	4,458	13	16,4
8	0,0233	85	353,7	0,854	4,443	14,6	18,4
9	0,0267	83,3	346,6	0,837	4,422	16,1	20,3
10	0,03	81,1	337,4	0,815	4,396	18,4	23,2
11	0,035	79	328,7	0,794	4,369	21	26,5
12	0,04	76,4	317,9	0,768	4,336	23,8	30
13	0,045	74	307,9	0,744	4,304	26,2	33
14	0,05	72,2	300,4	0,726	4,279	28,5	35,9
15	0,055	70,1	291,7	0,704	4,25	31	39,1
16	0,06	68,5	285	0,688	4,227	33	41,6
17	0,065	66,1	275	0,664	4,191	35,4	44,6
18	0,07	64,4	267,9	0,647	4,165	37	46,6
19	0,075	62,5	260,1	0,628	4,135	39,1	48,75
20	0,08	60,7	252,6	0,61	4,106	40,9	51,5
21	0,11	51,4	213,9	0,516	3,34	50,8	64
22	0,14	43,9	182,7	0,441	3,782	58,3	73,4
23	0,17	37,4	155,6	0,376	3,622	64,6	81,4
24	0,20	32,2	139,9	0,324	3,472	68,1	85,8
25	0,23	28	116,5	0,281	3,332	72,9	91,8
26	0,26	24,1	100,3	0,242	3,182	76	95,7
27	0,29	21,2	88,2	0,213	3,054	78,1	98,4
28	0,32	18,8	78,2	0,189	2,934	80	100,8
29	0,42	13,7	57	0,138	2,617	81,8	103,1
30	0,52	10,2	42,4	0,102	2,322	82	103,3
31	0,62	8,5	35,4	0,085	2,14	80,1	100,9
32	0,72	7,2	29,9	0,072	1,974	78,2	98,5
33	0,82	6,5	28,7	0,069	1,931	75,4	95
34	1,02	5,9	24,5	0,059	1,775	70,2	88,4
35	1,22	5,4	21,6	0,052	1,649	64,9	81,8

Tabelul 4.4 (continuare)

Nr. crt.	Timp sec	Curent stator			Curent rotor		
		mm	A	y/y ₀	In	100%	A
36	1,42	4,9	20,8	0,05	1,609	60,7	76,5
37	1,62	4,6	19,5	0,047	1,547	56,2	70,8
38	1,82	4,3	17,5	0,042	1,435	52,4	66
39	2,02	3,9	16,6	0,04	1,386	48,9	61,6
40	2,22	3,6	15,8	0,038	1,335	46,6	58,7
41	2,42	3,3	13,7	0,033	1,194	42,5	53,5
42	2,62	3,1	12,9	0,031	1,131	39,6	49,9
43	2,82	2,8	12,1	0,029	1,065	36,9	46,5
44	3,02	2,6	11,2	0,027	0,993	34,5	43,5
45	3,22	2,45	10,8	0,026	0,955	32,1	40,4
46	3,42	2,3	10,4	0,025	0,916	30	37,8
47	3,62	2,1	8,7	0,021	0,742	28	35,3
48	3,82	1,9	8,3	0,020	0,693	26,2	33

In fig.4.8.a este reprezentata prima componentă exponentială logaritmică care este o funcție liniară de forma:

$$i_{d1L} = A_1 \cdot t + B_1$$

unde:

$$A_1 = -0,402$$

$$B_1 = 2,178$$

Rezultă astfel pentru prima componentă $i_{d1}(t)$ o expresie de forma:

$$i_{d1} = I_{d1} \cdot e^{-\frac{t}{T_{d1}}}$$

$$\text{unde: } I_{d1} = \frac{1}{I_{d0}} e^{B_1} = \frac{1}{99,5} \cdot e^{2,178} = 0,0283$$

$$T_{d1} = -\frac{1}{A_1} \cdot \omega = -\frac{1}{-0,402} \cdot 314 = 781,1$$

In fig.4.8.b este reprezentată a doua componentă exponentială logaritmică care este o funcție liniară de forma:

$$i_{d2L} = A_2 t + B_2$$

unde : $A_2 = -6,4935$

$$B_2 = 4,475$$

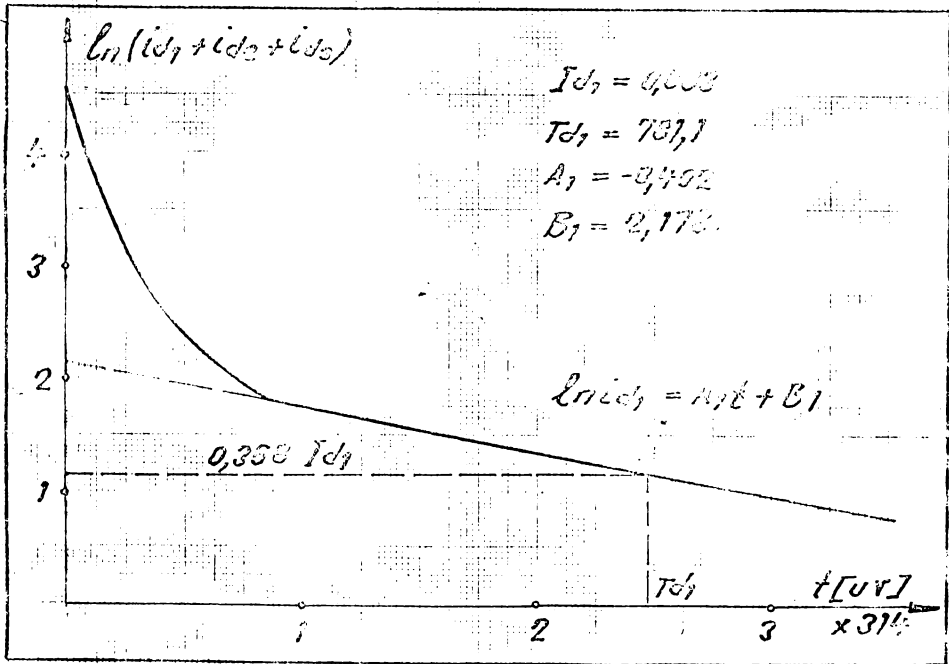


Fig.4.8.a. Separarea primei componente exponențiale.

Rezultă pentru a doua componentă exponențială $i_{d2}(t)$ o expresie de forma:

$$i_{d2}(t) = I_{d2} \cdot e^{-\frac{t}{T_{d2}}}$$

unde: $I_{d2} = \frac{1}{I_{d0}} \cdot B_2 = \frac{1}{99,5} \cdot 4,475 = 0,045$

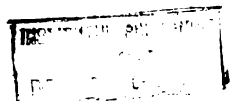
$$T_{d2} = -\frac{1}{A_2} \cdot 314 = -\frac{1}{-6,4935} \cdot 314 = 48,356$$

În fig.4.8.c este reprezentată a treia componentă exponențială logaritmică care este o funcție liniară de forma:

$$i_{d3L} = A_3 \cdot t + B_3$$

unde: $A_3 = -55,55$

$$B_3 = 1,05$$



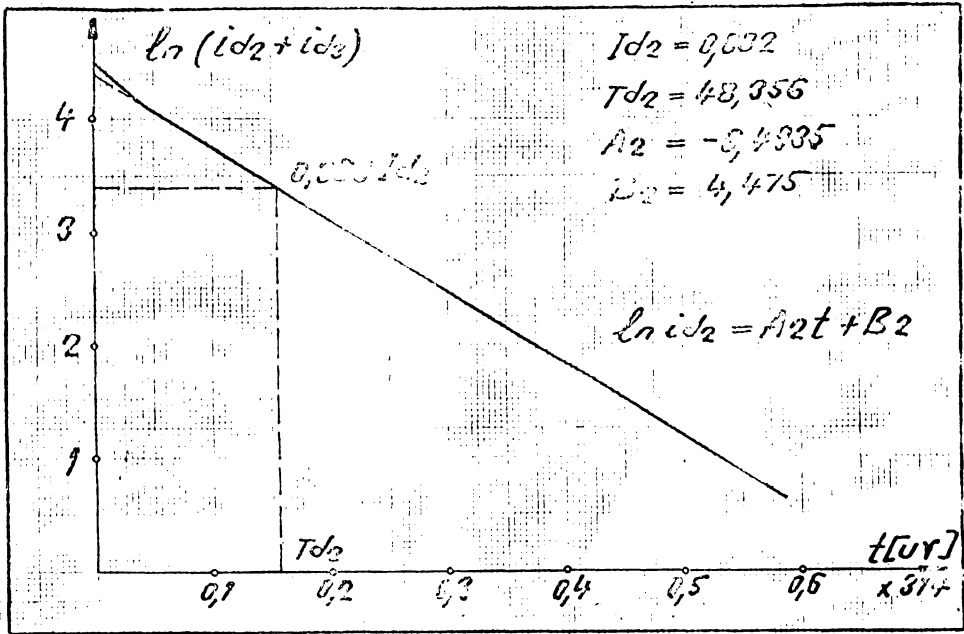


Fig.4.8.b. Separarea celei de a doua componente exponentiale.

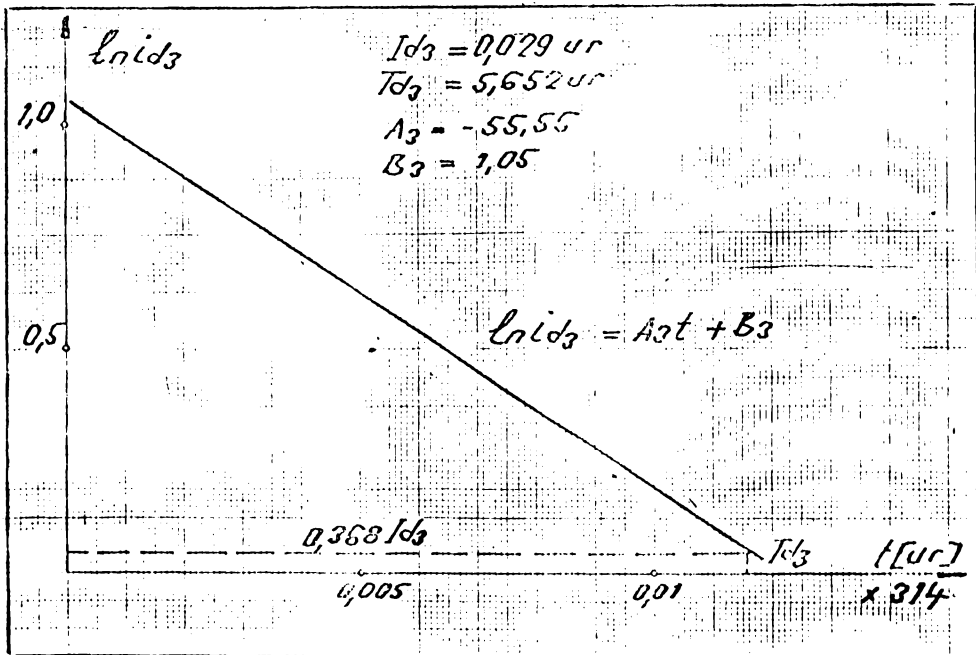


Fig.4.8.c. Separarea celei de a treia componente exponentiale.

Rezultă deci pentru a treia componentă exponențială o expresie de forma:

$$i_{d3}(t) = i_{d3} \cdot e^{-\frac{t}{T_{d3}}}$$

$$\text{unde: } i_{d3} = \frac{1}{I_{d0}} \cdot \dots = \frac{1}{99,5} \cdot e^{1,05} = 0,029$$

$$T_{d3} = -\frac{1}{A_3} \cdot 314 = 5,652$$

Prin urmare funcția care reprezintă curba curentului ce se atenuează prin înfășurarea statorului cu înfășurarea rotorică scurt-circuitată este o funcție care se descompune în trei componente exponențiale:

$$i_d(t) = i_{d1} \cdot e^{-\frac{t}{T_{d1}}} + i_{d2} \cdot e^{-\frac{t}{T_{d2}}} + i_{d3} \cdot e^{-\frac{t}{T_{d3}}}$$

Utilizând relațiile de calcul stabilite în cap.3 putem determina parametrii după axa longitudinală în condițiile în care înfășurarea rotorului este scurtcircuitată.

1. Constanta de timp T_{md}

Aceasta este o mărime teoretică care intră în expresia parametrilor ce urmează a fi calculați:

- conform relației (3.54) obținem:

$$T_{md} = I_{d1} \cdot T_{d1} + I_{d2} \cdot T_{d2} + I_{d3} \cdot T_{d3} =$$

$$= 0,0283 \cdot 781,1 + 0,882 \cdot 48,356 + 0,029 \cdot 5,652 = 111,8$$

$$T_{md} = 111,8$$

Constanta de timp a înfășurării de excitație T_F

Utilizând relația (3.55) se obține pentru constanta de timp T_F :

$$T_F = T_{d1} + T_{d2} + T_{d3} - T_{dm} - T_D = 781,1 + 48,356 + 5,66 - 111,8 - 11,94 = 710,28$$

$$T_F = 710,28$$

Coefficientul de dispersie ν_{d2} dintre înfășurarea de excitație și înfășurarea statorică după axa d

Pentru calculul coeficientului de dispersie \tilde{V}_{df} aplicăm relația (3.56):

$$\tilde{V}_{df} = \frac{T_{d1} \cdot T_{d2} (1 - I_{d3}) + T_{d2} \cdot T_{d3} (1 - I_{d1}) + T_{d3} \cdot T_{d1} (1 - I_{d2}) - \tilde{V}_{dD} T_D T_{dm}}{T_{dm} \cdot T_f} =$$

$$= \frac{761,1 \cdot 48,356 (1 - 0,029) + 48,356 \cdot 4,56 (1 - 0,083) + 4,56 \cdot 761,1 (1 - 0,882)}{111,8 \cdot 710,28}$$

$$= \frac{0,344 \cdot 11,94 \cdot 111,8}{111,8 \cdot 710,28} = 0,464$$

$$\tilde{V}_{df} = 0,464$$

Coeficientul de dispersie global \tilde{V}_{dfD}

Pentru determinarea coeficientului de dispersie \tilde{V}_{dfD} se aplică relația de calcul (3.57) și rezultă:

$$\tilde{V}_{dfD} = \frac{T_{d1} \cdot T_{d2} \cdot T_{d3}}{T_f \cdot T_D \cdot T_{dm}} = \frac{761,1 \cdot 48,356 \cdot 4,56}{710,28 \cdot 11,94 \cdot 111,8} = 0,1816$$

$$\tilde{V}_{dfD} = 0,1816$$

Reactanța operațională longitudinală $\tilde{X}_d(p)$

Înlocuind parametrii determinați experimental în expresia reactanței $\tilde{X}_d(p)$ dată de relația (2.68) obținem:

$$\tilde{X}_d(p) = x_d \frac{p^2 T_f \cdot T_D \tilde{V}_{dfD} + p(T_f \cdot \tilde{V}_{df} + T_D \tilde{V}_{dD}) + 1}{p^2 T_f \cdot T_D \tilde{V}_{fD} + p(T_f + T_D) + 1} =$$

$$= \frac{p^2 \cdot 710,28 \cdot 11,94 \cdot 0,1816 + p(710,28 \cdot 0,464 + 11,94 \cdot 0,344) + 1}{p^2 \cdot 710,28 \cdot 11,94 \cdot 0,572 + p(710,28 + 11,94) + 1}$$

$$\tilde{X}_d(p) = 1,04 \frac{p^2 \cdot 1540 + p \cdot 333,7 + 1}{p^2 \cdot 4851 + p \cdot 722,1 + 1}$$

Reactanța în complex după axa longitudinală $\bar{X}_d(jS)$

Expresia reactanței în complex se obține prin înlocuirea în expresia reactanței operaționale $\tilde{X}_d(p)$ a operatorului "p" cu variabila complexă "jS":

$$\bar{X}_d(jS) = \frac{1,04(S^2 \cdot 1540 - jS \cdot 333,7 - 1)}{S^2 \cdot 4851 - jS \cdot 722,2 - 1}$$

Pentru valori mici ale lui "S", putem neglija termenii în "S²" și în acest caz obținem pentru reactanța în complex după axa longitudinală o expresie de forma:

$$\bar{X}_{d1}(jS) = \frac{1 + jS \cdot 333,7}{1 + jS \cdot 722,2} \cdot 1,04$$

La limită, când $S \rightarrow \infty$, obținem valoarea reactanței tranzitorii după axa longitudinală:

$$x_d^* = \bar{X}_{d1}(jS)_{S \rightarrow \infty} = 1,04 \frac{333,7}{722,2} = 0,462$$

Pentru valori mari ale alunecării "S" în expresia reactanței în complex $\bar{X}_d(jS)$ se poate neglija termenul "-1" atât la numitor cât și la numărător.

În acest caz obținem pentru reactanța în complex după axa longitudinală următoarea expresie (relația 2.71):

$$X_{d2}(jS) = x_d^* \frac{1 + jS \cdot T_D \sqrt{D}^{\parallel}}{1 + jS \cdot T_D \sqrt{r_D}}$$

$$\text{unde: } \sqrt{D}^{\parallel} = \frac{\sqrt{d_{df}}}{\sqrt{r_D}} = \frac{0,1816}{0,464} = 0,391$$

La limită, când $S \rightarrow \infty$, obținem reactanța suverstranzitorie după axa longitudinală:

$$\bar{x}_d^* = x_{d2}(js)_{s \rightarrow \infty} = x_d^* \frac{\int_D^{\parallel}}{\int_{FD}} = 0,462 \frac{0,391}{0,572} = 0,316$$

4.1.5. Determinarea curentului de pornire în regim asincron pe baza parametrilor determinați prin probele de atingere a cîmbului.

Pentru determinarea curentului la pornirea în regim asincron a mașinii sincrone, se utilizează relațiile (2.78); (2.79) cu considerarea ipotezei simplificatorii că rezistența înfășurării de fază este neglijabilă. În aceste condiții, curenții după axele d și q vor fi:

$$\bar{I}_d = \frac{\bar{U}_d}{j\bar{X}_d}$$

$$j\bar{I}_q = \frac{\bar{U}_q}{j\bar{X}_q}$$

Reactanțele \bar{X}_d și \bar{X}_q au fost determinate pe baza parametrilor obținuți din probele de atingere a cîmbului:

$$\bar{X}_d(js) = 1,04 \frac{s^2 \cdot 1540 - js \cdot 333,7 - 1}{s^2 \cdot 4851 - js \cdot 722,2 - 1}$$

$$\bar{X}_q(js) = 0,797 \frac{js \cdot 6,187 + 1}{js \cdot 16,07 + 1}$$

Pe baza acestora, calculăm expresiile $\frac{1}{j\bar{X}_d}$ și $\frac{1}{j\bar{X}_q}$ și obținem:

$$\frac{1}{j\bar{X}_d} = \frac{1}{1,04} \frac{s^2 \cdot 4851 - js \cdot 722,2 - 1}{s \cdot 333,7 - j(1 - s^2 \cdot 4851)} =$$

$$\frac{1}{j\bar{X}_d} = \frac{1}{1,04} \frac{s^2 \cdot 4851 - js \cdot 722,2 - 1}{s^2 \cdot 333,7 + (1 - s^2 \cdot 4851)^2} =$$

$$= \frac{s^3 \cdot 5,06 \cdot 10^5 + s \cdot 388,5}{s^4 \cdot 2,466 \cdot 10^6 + s^2 \cdot 11,254 \cdot 10^4 + 1,06} - j \frac{s^4 \cdot 7,4705 \cdot 10^6 + 23,36 \cdot 10^2 s^2 + 1}{s^3 \cdot 2,466 \cdot 10^6 + s^2 \cdot 11,254 \cdot 10^4 + 1,06}$$

Pentru valorile limită ale lui S obținem:

$$\frac{1}{j\bar{X}_G(S \rightarrow \infty)} = -j \cdot \frac{7,4705}{2,466} = -j \cdot 3,029$$

$$\frac{1}{j\bar{X}_G(S=0)} = -j \frac{1}{1,04}$$

În mod asemănător pentru componenta după axa transversală a curentului obținem:

$$\begin{aligned} \frac{1}{j\bar{X}_G} &= \frac{jS \cdot 16,07 + 1}{0,797(-s \cdot 6,1e7 + j)} = \frac{(jS \cdot 16,07 + 1)(-s \cdot 6,1e7 - j)}{0,797(s^2 \cdot 6,1e7^2 + 1)} = \\ &= \frac{S \cdot 9,68}{s^2 \cdot 30,5 + 0,797} - j \frac{s^2 \cdot 99,42 + 1}{s^2 \cdot 30,5 + 0,797} \end{aligned}$$

Pentru valorile limită ale lui S obținem:

$$\frac{1}{j\bar{X}_G(S \rightarrow \infty)} = -j \cdot \frac{99,42}{30,5} = -j \cdot 3,25$$

$$\frac{1}{j\bar{X}_G(S=0)} = -j \frac{1}{0,797} = -j \cdot 1,254$$

Caracteristica curentului rezultat este dată în anexă.

4.1.6. Determinarea caracteristicii cuplului la pornirea în asincron a mașinii sincrone.

În cap.2 au fost deduse, relațiile de calcul pentru componenta asincronă a cuplului electromagnetic pentru cazul când înfășurarea rotorului este deschisă în timpul pornirii și pentru cazul când înfășurarea este scurtcircuitată.

Pe baza parametrilor obținuți din probele de stingere a cimpului, determinăm componentele asincrone ale cuplului elec-

tromagnetic pentru cele două cazuri.

4.1.6.1. Determinarea componentei asincronă a cuplului electromagnetic la pornirea cu înfășurarea rotorului deschisă.

Componenta asincronă a cuplului electromagnetic la pornirea în asincron a mașinii sincrone, înfășurarea rotorului fiind deschisă, este dată de relația 2.99 :

$$M_{a0} = M_q'' + M_{d0}'' = \frac{2 \cdot i_{d0}'' \max}{\frac{S_q''}{S} + \frac{S}{S_{d0}''}} + \frac{2 \cdot i_{q0}'' \max}{\frac{S_q''}{S} + \frac{S}{S_q''}}$$

Utilizând parametrii determinați anterior din probele de stingere a cimpului putem determina toate mărimile ce intervin în expresia cuplului asincron. Conform relațiilor (2.101) obținem

$$i_{q0}'' \max = \frac{U_n^2}{4} \left(\frac{1}{X_q''} - \frac{1}{X_q} \right) = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{0,3068} - \frac{1}{0,797} \right) = 0,50135$$

$$i_{d0}'' \max = \frac{U_n^2}{4} \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d} \right) = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{0,357} - \frac{1}{1,04} \right) = 0,4602$$

$$S_{d0}'' = \frac{1}{T_d \sqrt{\sigma_{dD}}} = \frac{1}{11,94 \cdot 0,344} = 0,2434$$

$$S_q'' = \frac{1}{T_a \cdot \sqrt{\sigma_{qk}}} = \frac{1}{16,07 \cdot 0,385} = 0,1616$$

Componenta asincronă a cuplului electromagnetic este de forma:

$$M_a = \frac{2 \cdot 0,50135}{\frac{0,1616}{S} + \frac{S}{0,1616}} + \frac{2 \cdot 0,4602}{\frac{0,2434}{S} + \frac{S}{0,2434}}$$

Pentru diferite valori date alunecării S , obținem curba cuplului asincron la pornirea cu rotorul deschis. Rezultatele sînt trecute în tabelul 4.5.

Tabelul nr.4.5.

Determinarea componentei asincrone a cuplului la pornirea cu rotorul în gol.

Nr. crt.	S	M_q''	M_{d0}''	$M_o'' = M_q'' + M_{d0}''$
1	1	0,1580	0,211	0,369
2	0,9	0,1740	0,232	0,406
3	0,8	0,1950	0,256	0,451
4	0,7	0,220	0,286	0,506
5	0,6	0,252	0,321	0,573
6	0,5	0,293	0,362	0,655
7	0,4	0,342	0,408	0,756
8	0,3	0,419	0,450	0,869
9	0,2434	0,462	0,460	0,922
10	0,2	0,490	0,451	0,941
11	0,1616	0,501	0,424	0,925
12	0,1	0,442	0,324	0,772
13	0,05	0,283	0,181	0,464
14	0,01	0,062	0,032	0,100

Caracteristica $M_a = f(S)$ este reprezentată în fig.4.9.

4.1.6.2. Determinarea componentei asincrone a cuplului electromagnetic la pornirea cu infășurarea rotorului scurtcircuitată.

Componenta asincronă a cuplului electromagnetic la pornirea cu infășurarea rotorului scurtcircuitată se calculează cu relația (2.104):

$$M_a = M_q'' + M_{d0}'' + M_d''$$

unde: M_q'' este aceeași ca și la pornirea cu infășurarea de excitație în gol.

$$M_d'' = \frac{2 M_d'' \max}{\frac{S_d''}{S} + \frac{S}{S_d''}} \quad M_d' = \frac{2 M_d' \max}{\frac{S_d'}{S} + \frac{S}{S_d'}}$$

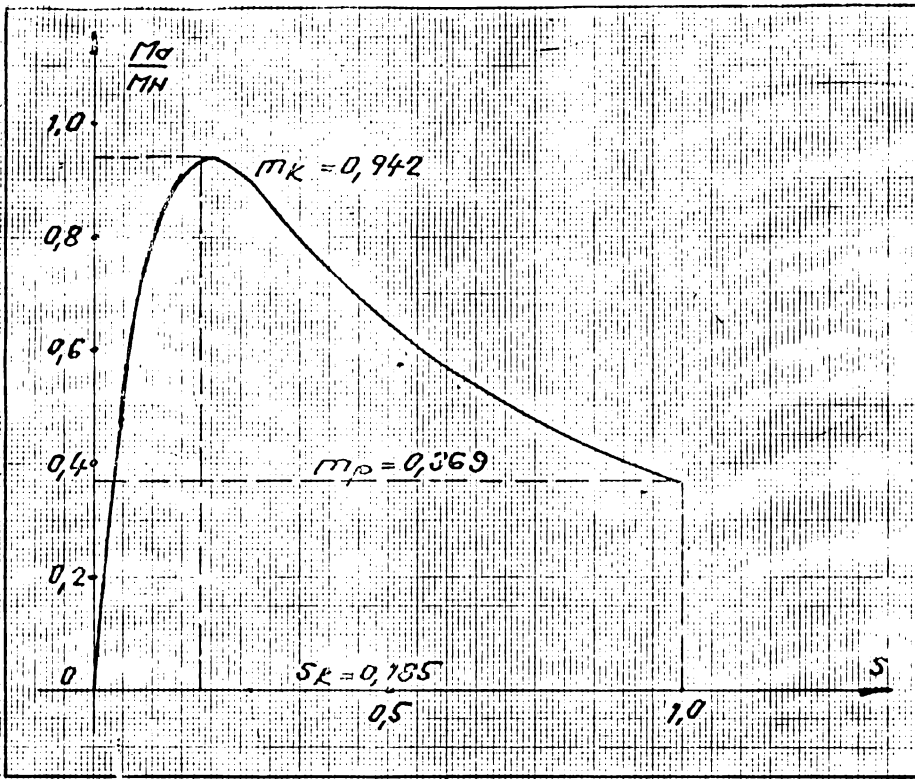


Fig.4.9. Caracteristica cuplului la pornirea în asincron cu înfășurarea rotorului deschisă.

Utilizând parametrii determinați din probele de stingere a cîmblui, cu ajutorul relațiilor (2.106)-(2.107) putem calcula toate mărimile ce intervin în expresia componentei asincrone a cuplului:

$$L_q^* \max = \frac{U^2}{4} \left(\frac{1}{x_q^*} - \frac{1}{x_q} \right) = 0,50135$$

$$M_d^* \max = \frac{U^2}{4} \left(\frac{1}{x_d^*} - \frac{1}{x_d} \right) = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{0,316} - \frac{1}{0,462} \right) = 0,25$$

$$M_d^* \max = \frac{U^2}{4} \left(\frac{1}{x_d^*} - \frac{1}{x_d} \right) = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{0,462} - \frac{1}{1,04} \right) = 0,3007$$

$$S_d^* = \frac{1}{T_d^*} = \frac{1}{T_r \sqrt{f}} + \frac{1}{T_D \sqrt{D}} - \frac{1}{T_r \sqrt{d_r} + T_D \sqrt{d_D}} =$$

$$= \frac{1}{710,28 \cdot 0,5279} + \frac{1}{11,94 \cdot 0,391} -$$

$$- \frac{1}{710,28 \cdot 0,464 + 11,94 \cdot 0,344} = 0,21367$$

$$S_d'' = 0,21367$$

$$S_d' = \frac{1}{T_d'} = \frac{1}{T_r \sqrt{dr} + T_d \sqrt{dd}} = \frac{1}{710,28 \cdot 0,464 + 11,94 \cdot 0,344}$$

$$S_d^i = 0,00299$$

Înlocuind mărimile calculate în relația de calcul (2.104) obținem pentru componenta asincronă a cuplului electromagnetic la pornirea cu înfășurarea rotorului scurtcircuitată, o expresie de forma:

$$M_a = \frac{2 \times 0,50135}{\frac{0,1616}{S} + \frac{S}{0,1616}} + \frac{2 \times 0,25}{\frac{0,21367}{S} + \frac{S}{0,21367}} + \frac{2 \times 0,3007}{\frac{0,00299}{S} + \frac{S}{0,00299}}$$

Pentru diferite valori date alunecării S, obținem curba cuplului asincron la pornirea cu înfășurarea rotorului scurtcircuitată.

Rezultatele obținute sînt trecute în tabelul 4.6.

Tabelul nr.4.6.

Determinarea componentei asincrone la pornirea cu rotorul în scurtcircuit

Nr. crt.	S	M_a''	S_d''	T_d'	M_a
1	1	0,1520	0,102	0,0012	0,2616
2	0,9	0,1740	0,1124	0,00199	0,22879
3	0,8	0,1946	0,1246	0,00254	0,321
4	0,7	0,220	0,1532	0,00257	0,37577
5	0,6	0,252	0,152	0,00299	0,41299
6	0,5	0,293	0,1806	0,00359	0,47719
7	0,4	0,348	0,208	0,00449	0,56049
8	0,3	0,419	0,236	0,00599	0,66099

Tabelul 4.6. (continuare)

Nr. crt.	S	M_q^m	M_d^m	k_d^o	M_a^o
9	0,21367	0,462	0,252	0,00041	0,72041
10	0,2	0,490	0,249	0,00896	0,74796
11	0,1616	0,501	0,241	0,0112	0,7532
12	0,1	0,446	0,192	0,0179	0,6579
13	0,05	0,283	0,111	0,0356	0,4296
14	0,01	0,062	0,0233	0,165	0,2503

Caracteristica $k_g = f(S)$ este reprezentată în fig.4.10.

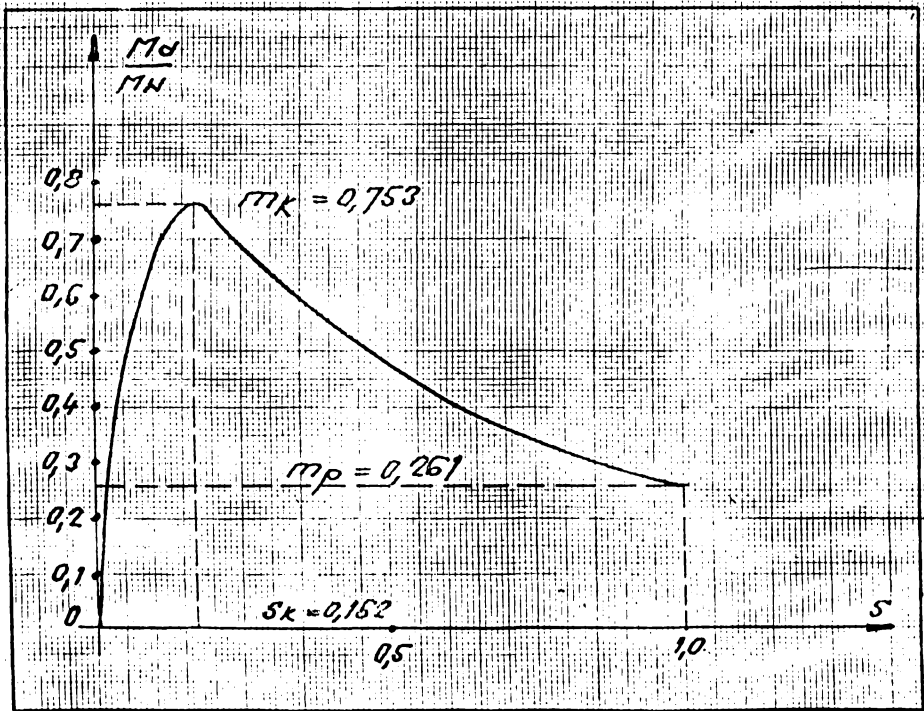


Fig.4.10. Caracteristica cuplului la pornirea în asinerea cu înfășurarea rotorului scurtcircuitată.

4.2. Rezultate experimentale obținute prin metoda
alimentării înfășurării statorului cu o ten-
siune alternativă monofazată.

Metoda descrisă în cap.3 a fost aplicată la încercarea de determinare a caracteristicii cuplului asincron la pornirea în asincron a unei mașini sincrone pe stândul de probă de la I.C.M. Beșta.

Mașina de încercat fiind în stare de repaus, rotorul a fost așezat pe rând în cele două axe: axa transversală și axa longitudinală în vederea determinării parametrilor după cele două axe.

De la o sursă de tensiune alternativă monofazată se alimentează două faze înseriate ale înfășurării statorului, a treia fază rămânând liberă.

Dacă măsurătorile se efectuează după axa longitudinală, atunci axa magnetică a rotorului urmează să fie așezată paralel cu axa cîmpului magnetic resultant al celor două faze care sînt conectate în circuit, adică perpendicular pe axa celei de a treia fază care nu intervine în montajul de măsurare. Verificarea așezării rotorului în axa longitudinală se face cu ajutorul unui voltmetru conectat la bornele înfășurării de excitație, cînd pe rechea de faze conectate în circuit este alimentată în curent alternativ.

Valoarea tensiunii indicată de voltmetru este maxima cînd rotorul este în axa longitudinală.

Dacă măsurătorile se efectuează după axa transversală, atunci axa magnetică a rotorului urmează să fie așezată perpendicular pe axa magnetică a cîmpului resultant a celor două faze conectate în circuit, adică paralel cu axa magnetică a celei de a treia fază.

La o astfel de poziție a rotorului, valoarea indicată de voltmetru conectat la bornele înfășurării de excitație va fi minimă, practic zero.

Schema de principiu a instalației de încercat este dată în fig.4.11. Ca sursă de tensiune alternativă de frecvență variabilă se folosește un generator sincron GS antrenat de o mașină de curent continuu m.c.c. de turație variabilă.

Mașina de antrenare m.c.c. este alimentată în rotor de la un generator sincron G.S.1. prin intermediul unei punți redre-

soare Rd.

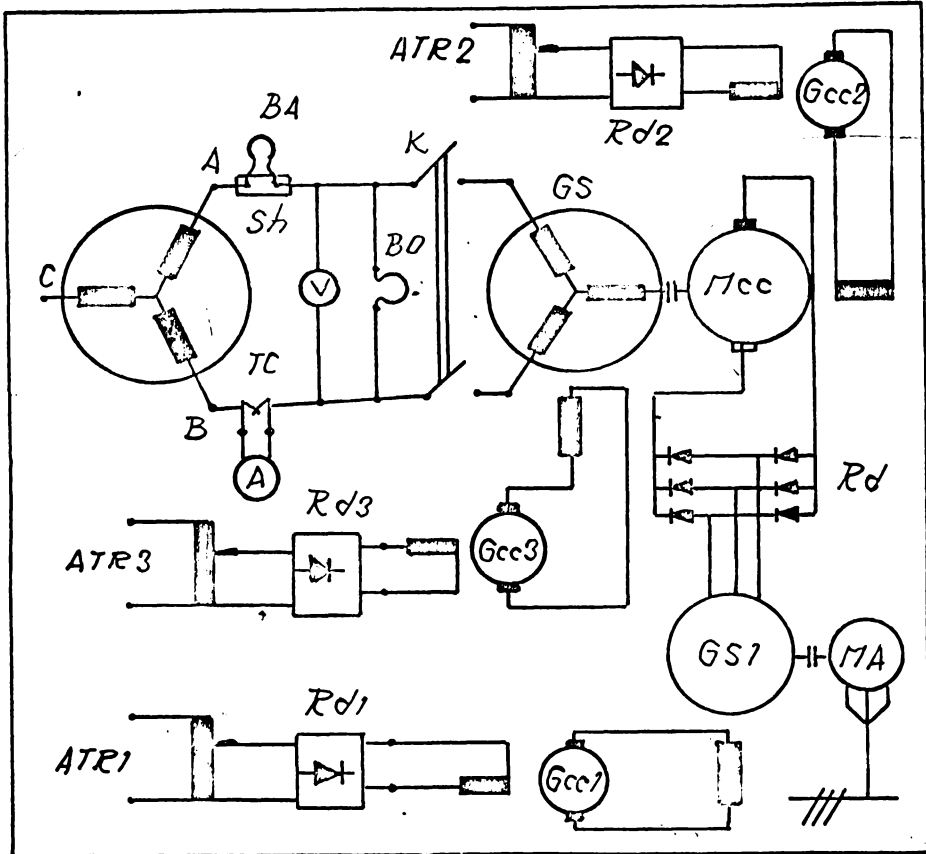


Fig. 4.11. Schema de principiu a instalației utilizate pentru alimentarea cu frecvență variabilă.

Infășurarea de excitație a generatorului sincron GS1 este alimentată de la un generator de curent continuu Gc.c.1.

Prin intermediul autotransformatorului ATR1 și a punții redresoare el există posibilitatea modificării curentului de excitație al generatorului sincron GS1 și inclusiv a valorii tensiunii la bornele sale. Prin modificarea tensiunii la bornele generatorului sincron GS1 respectiv la bornele motorului Mcc se modifică și viteza de rotație a mașinii de antrenare Mcc obținându-se astfel la bornele generatorului sincron GS o tensiune alternativă de frecvență variabilă.

Mașina de antrenare Mcc are infășurarea de excitație alimentată separat de la un generator de curent continuu Gc.c.2.

Prin intermediul autotransformatorului ATR2 și a punții redresoare Rd2 există posibilitatea modificării curentului de excitație al motorului de antrenare c.c. și inclusiv a vitezei de rotație a acestuia.

Infășurarea de excitație a generatorului GS este alimentată de la generatorul de curent continuu Ge.c.3. Prin intermediul autotransformatorului ATR3 și a punții redresoare Rd3 se poate modifica valoarea curentului de excitație al generatorului GS și prin aceasta valoarea tensiunii la bornele sale.

În acest fel tensiunea obținută la bornele generatorului GS, poate fi utilizată pentru alimentarea mașinii de încercat la care urmează să se determine caracteristica cuplului.

Generatorul sincron GS utilizat în schema de încercare prezentată în figură are următoarele caracteristici principale:

- Puterea nominală $P_n = 6000 \text{ kW}$
- Tensiunea nominală $U_n = 6000 \text{ V}$
- Curentul nominal statoric $I_n = 760 \text{ A}$
- Turația nominală $n = 600 \text{ rpm}$

Mașina de încercat GS/GS pentru care urmează să se determine caracteristicile de pornire în regim asincron este un hidrogenerator sincron orizontal destinat să funcționeze atât în regim de generator cât și în regim de motor, având următoarele caracteristici principale:

- Puterea nominală : $S_n = 14.250 \text{ kVA}$
- Tensiunea nominală $U_n = 6.300 \text{ V}$
- Curentul nominal statoric $I_n = 1.306 \text{ A}$
- Curentul nominal de excitație $I_{en} = 450 \text{ A}$
- Factorul de putere nominal $\cos \phi = 0,8$

Infășurarea statorică a mașinii de încercat conectată conform schemei din fig.4.14. este alimentată la o tensiune alternativă cu frecvență variabilă, tensiune furnizată de generatorul sincron GS.

Prin intermediul unui shunt reinductiv "Sh" se măsoară și se înregistrează în același timp cu ajutorul unui oscilograf I_n ce trece prin infășurarea statorului. De asemenea se măsoară și se înregistrează tensiunea alternativă cu care se alimentează infășurarea statorică a mașinii de încercat.

În același timp se înregistrează și un semnal de frecvență constantă f_0 care servește pentru determinarea pe cale grafică din oscilogramă a frecvenței tensiunii de alimentare.

Pentru o anumită frecvență a tensiunii de alimentare se

înregistrează simultan: tensiunea de alimentare a înfășurării statorice U_g , curentul prin înfășurarea statorică i_g și tensiunea de frecvență constantă f_c .

Înregistrările se repetă pentru diferite valori ale frecvenței tensiunii de alimentare începând de la frecvența nominală pînă la frecvențe cit mai mici, obținindu-se cite o oscilogramă corespunzător fiecărei frecvențe a tensiunii de alimentare.

Forma unei oscilograme corespunzătoare unei anumite frecvențe "f" este arătată în fig.4.12.

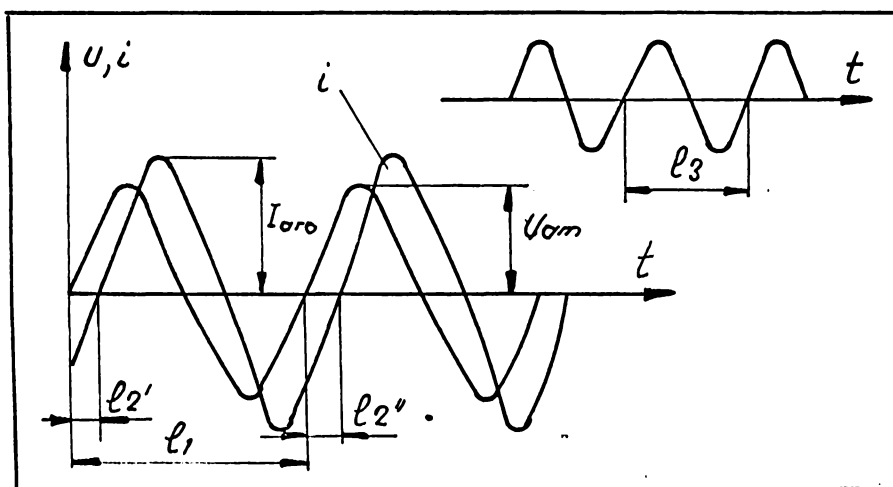


Fig.4.12. Oscilograma tensiunii și a curentului de alimentare.

Pentru măsurile determinate din oscilogramă introducem următoarele notații:

- U_{am} = amplitudinea tensiunii de alimentare în [mm]
- I_{aro} = amplitudinea curentului ce trece prin înfășurarea statorului, în [mm]
- l_1 = lungimea în [mm] corespunzătoare unei perioade a tensiunii alternative de alimentare.
- l_2 = defazajul mediu dintre tensiune și curent măsurat în [mm] care se determină ca o medie aritmetică a distanțelor l_2' și l_2'' indicate pe oscilogramă.
- l_3 = lungimea în [mm] a perioadei semnalului de frecvență etalon "f_c".

Pe baza acestor date obținute pe cale grafică din oscilo-

gramă putem calcula următoarele mărimi:

1. Frecvența "f" a tensiunii alternative: cu care se alimentează înfășurarea statorică a mașinii de încercat. Aceasta rezultă din compararea perioadelor l_2 și l_1 determinate grafic din oscilogramă și ținând cont de mărimea frecvenței etalon f_c :

$$f = f_c \cdot \frac{l_2}{l_1}$$

2. Alunecarea "S" a rotorului la funcționarea în asincron

Corespunzător frecvenței "f" a tensiunii alternative monofazate de alimentare a mașinii în stare de repaus rezultă alunecarea "S"

$$S = \frac{f}{f_n} = \frac{f_c \cdot l_2}{f_n \cdot l_1}$$

unde f_n este frecvența nominală de funcționare a mașinii de încercat.

3. Defazajul mediu dintre tensiune și curent:

$$\varphi = \frac{l_2}{l_1} \cdot 2$$

4. Impedanța echivalentă Z_a a mașinii de încercat în stare de repaus:

Aceasta rezultă pe baza curentului I_a și a tensiunii U_a determinate din oscilogramă corespunzător unei anumite frecvențe f.

$$Z_a = \frac{U_a}{I_a} \cdot \frac{C_u}{C_i}$$

unde C_u și C_i sînt factorii de scară pentru tensiune și curent.

5. Impedanța echivalentă Z_r a mașinii de încercat cu rotorul în stare de repaus, corespunzătoare componentei de succesiune directă a tensiunii de alimentare, este dată de relația:

$$Z_r = Z_a \cdot k_{cx}$$

unde k_{cx} este un factor ce depinde de schema de conectare a înfășurării statorice la sursa de alimentare.

6. Impedanța echivalentă Z_e a mașinii de încercat în stare de rotație.

Ținând cont de relația (3.63) se obține:

$$\bar{Z}_e(s) = r_e(s) + j X_e(s) = \frac{Z_r \cdot \cos \varphi - r_s}{s} + r_1 + j \frac{r \cdot \sin \varphi}{s}$$

unde : r_s reprezintă rezistența înfășurării statorice corespunzătoare frecvenței "f" a tensiunii de alimentare a mașinii în stare de repaus.

r_1 reprezintă rezistența la $f=50$ Hz a înfășurării statorice.

8. Componenta asincronă a cuplului electromagnetic corespunzător unei anumite axe.

Utilizând relația (3.79) obținem cuplul asincron în valori raportate:

$$m_a = \frac{U^2}{P_n} \frac{(r_e(s) - r_n)}{\bar{Z}_e^2(s)}$$

9. Cuplul asincron mediu corespunzător alunecării "S"

$$m_a = \frac{m_{ad} + m_{aq}}{2}$$

unde m_{ad} și m_{aq} sînt componentele cuplului asincron după axa d respectiv după axa q.

În acest fel, cu datele obținute din oscilogramele corespunzătoare la diferite frecvențe putem obține curba cuplului asincron în funcție de alunecarea "S" a rotorului la funcționarea în asincron a mașinii sincrone.

4.2.1. Determinarea componentei asincrone a cuplului după axa q, la pornirea în regim asincron cu înfășurarea rotorică deschisă.

Mașina de încercat fiind în stare de repaus, se alimentează cu o tensiune alternativă de frecvență variabilă două faze ale inductorului conectate în serie, a treia fază rămînd liberă, conform schemei din fig.4.11. Inductorul mașinii de încercat se fixează

intr-o astfel de pozitie incit axa sa transversală sa coincidă cu axa câmpului creat de înfășurările alimentate.

Tensiunea alternativă de alimentare este furnizată de generatorul sincron GS.

Prin închiderea intrerupătorului K, prin circuitul înfășurărilor A-B ale generatorului GSOS se stabilește un curent I_a , care se măsoară prin intermediul transformatorului de curent T_c și a ampermetrului A. In același timp prin intermediul shuntului Sh și a buclei de oscilograf B-A se înregistrează variația curentului I_a :

cu ajutorul buclei BO se înregistrează tensiunea la bornele AB ale înfășurării statorice respective.

Generatorul sincron GS, fiind antrenat la viteza nominală de rotație, se stabilește un anumit curent în circuitul de măsură corespunzător frecvenței nominale $f=50$ Hz și se înregistrează cu ajutorul oscilografului:

- curentul I_a prin înfășurările A-B ale mașinii sincrone de încercat ;

- tensiunea U_a la bornele înfășurărilor A-B ;

- frecvența f_e a semnalului etalon.

Se modifică apoi viteza de rotație a generatorului sincron GS, în sens descrescător și corespunzător altor valori ale frecvenței f a tensiunii de alimentare se înregistrează din nou măsurile specificate mai sus. Se obțin astfel mai multe oscilograme din care se determină:

- valorile maxime în [mm] ale tensiunii de alimentare U_{am} ;

- valorile maxime în [mm] ale curentului de alimentare I_{am} ;

- valorile l_1 în [mm] ale perioadei T a tensiunii de alimentare ;

- valorile l_2^1 ; l_2^2 ale defazajului φ dintre tensiunea și curentul de alimentare;

- valorile l_3 ale perioadei T a semnalului etalon de frecvență f_e

Valorile citite astfel se trec în tabelul nr.4.7.

Tabelul nr.4.7

Nr. crt.	U_a mm	I_a mm	l_1 mm	l_1^o mm	l_2^o mm	l_3 mm	f_e Hz	C_u V/mm	C_i A/mm	k_{ex}
1.	59,9	53,2	20	4,5	4,5	20	50	9,4166	5,3534	0,5
2.	57,5	54	20,5	4,6	4,6	20	50	"	"	"
3.	55	53,8	21	4,7	4,7	20	50			
4.	53	54	22	4,9	4,9	20	50			
5.	50	55	24	5,3	5,3	20	50			
6.	47,9	55,2	25,8	5,6	5,6	20	50			
7.	66,2	55,1	26,6	5,8	5,8	20	50	6,5916	5,3534	0,5
8.	63,5	55	27,6	5,9	5,9	20	50	"	"	"
9.	61	55,2	29	6,2	6,2	20	50			
10.	57	55,2	31,2	6,6	6,6	20	50			
11.	55	55,9	33,4	7	7	20	50			
12.	51	56,6	36	7,5	7,5	20	50			
13.	42	57	44,8	9	9	20	50			
14.	40	56,9	47,8	9,4	9,4	20	50			
15.	36,9	56	50,6	10,6	10,6	20	50			
16.	45,3	56,9	67	13,1	13,1	20	50	3,433	5,3534	0,5
17.	50,8	56,6	74	14,5	14,5	20	50	2,7464	5,3534	0,5
18.	44,6	56,9	83	15,5	15,5	20	50	"	"	"
19.	54,5	56,3	29,8	5,4	5,4	60	5	1,9617	5,3534	0,5
20.	50,1	55	32,8	5,9	5,9	60	5	"		
21.	56,8	54	42,6	7,6	7,6	60	5	1,3732	5,3534	0,5
22.	50,5	53	47,3	8,5	8,5	60	5	"		
23.	37,5	52,9	65,2	11,7	11,7	60	5			

Corespunzător fiecărei valori în [mm] a tensiunii și curentului (U_a și I_a), utilizându-se relațiile corespunzătoare date în cap.4.2 pct.1-8 se determina următoarele mărimi:

- Alunecarea s a rotorului la funcționarea în asincron;
- Defazajul mediu φ dintre tensiunea și curentul de alimentare ;
- Impedanța echivalentă Z_{er} a mașinii sincrone în regim asincron, cu rotorul în stare blocată ;
- Impedanța echivalentă $Z_e(S)$ a mașinii în stare de rotație, în regim asincron ;
- Componenta asincronă m_{aq} a cuplului electromagnetic corespunzător axei q.

Rezultatele obținute se trec în tabelul nr. 4.8

Tabelul nr. 4.8

Nr. crt.	S	φ [°]	Z_{er} [Ω]	$X_e(S)$ [Ω]	$R_e(S)$ [Ω]	$Z_e(S)$ [Ω]	m_{aq} [u.r]
1.	1,00	81	0,9902	0,978	0,1549	0,9901	0,38456
2.	0,9756	80,78	0,9365	0,9475	0,1532	0,9598	0,3840
3.	0,9523	80,57	0,8991	0,9310	0,1537	0,9437	0,3979
4.	0,9090	80,18	0,8632	0,9350	0,1599	0,9492	0,4169
5.	0,8333	79,5	0,7995	0,9433	0,1707	0,9587	0,4352
6.	0,7750	78,13	0,7631	0,9630	0,1964	0,9835	0,4760
7.	0,7462	77,91	0,7396	0,9692	0,2006	0,9898	0,4894
8.	0,7246	77,6	0,7107	0,9580	0,2027	0,9792	0,5057
9.	0,6896	76,96	0,6803	0,9610	0,2133	0,9844	0,5294
10.	0,6410	76,15	0,6357	0,9629	0,2259	0,9890	0,5588
11.	0,5990	75,45	0,6057	0,9787	0,2404	1,0070	0,5759
12.	0,555	75	0,5547	0,9645	0,2421	0,9945	0,5963
13.	0,446	72,32	0,4536	0,9681	0,2833	1,0080	0,6872
14.	0,4184	70,79	0,4328	0,9768	0,3119	1,0254	0,7375
15.	0,3787	69,54	0,4056	1,0034	0,3408	1,0597	0,7590
16.	0,2985	69,85	0,2552	0,8028	0,2467	0,8399	0,8584
17.	0,2702	69,08	0,2294	0,7930	0,2481	0,8310	0,8772
18.	0,2400	67,22	0,21010	0,8071	0,2743	0,8525	0,9292
19.	0,2013	65,23	0,1773	0,8000	0,2883	0,8504	0,9853
20.	0,1875	64,75	0,1668	0,8046	0,2912	0,8557	0,9835
21.	0,1408	64,22	0,1349	0,8627	0,2924	0,9108	0,8718
22.	0,1271	64,83	0,1222	0,8701	0,2691	0,9108	0,7974
23.	0,092	64,60	0,0909	0,8925	0,2229	0,9199	0,6365

Se reprezintă grafic variația $m_{aq}=f(S)$ și rezultă curba din fig. 4.13.

Din curba obținută astfel se determină valorile corespunzătoare ale cuplului pentru diferite alunecări cuprinse între 0 și 1. Rezultatele obținute se trec în tabelul 4.12.

4.2.2. Determinarea componentei asincrone a cuplului după axa d la pornirea în regim asincron cu înfășurarea rotorică deschisă

Înfășurarea de excitație fiind deschisă, inductorul mașinii de încercat se fixează într-o astfel de poziție încât axa sa len-

gitudinală să coincidă cu axa câmpului creat de curentul ce trece prin înfăgurarea B-C a mașinii de încercat, conform schemei din fig.4.11.

Metoda de lucru în acest caz este identică cu cea descrisă în cap.4.2.1 pentru determinarea componentei esinorone a cuplului după axa q . Rezultatele obținute din prelucrarea oscilogramelor sînt trecute în tabelul 4.9.

Tabelul nr.4.9

Nr. crt.	U_{am} mm	I_{am} mm	l_1 mm	l_2^1 mm	l_2^2 mm	l_3 mm	f_c Hz	C_u V/mm	C_i A/mm	k_{ex}
1.	51	73,2	20,6	4,7	4,7	20	50	6,2	2,736	0,5
2.	50,1	73	21,2	4,8	4,8	20	50	"	"	"
3.	48,8	74,8	22	5,0	5,0	20	50			
4.	46,9	75,5	23	5,2	5,2	20	50			
5.	60,9	71	24,4	5,5	5,5	20	50	4,34	2,736	0,5
6.	58,8	71,8	25	5,6	5,6	20	50			
7.	58,1	73	26	5,8	5,8	20	50			
8.	118,8	73,5	31,6	6,9	6,9	20	50	1,699	2,736	0,5
9.	107,8	73,5	34,6	7,5	7,5	20	50			
10.	98	73,2	37,4	8,1	8,1	20	50			
11.	89,4	72,8	12,2	2,6	2,6	60	5			
12.	84	70,9	12,8	2,7	2,7	60	5			
13.	76,3	73,8	15	3,1	3,1	60	5			
14.	72	73,2	16,6	3,4	3,3	60	5			
15.	53	66	22	4,3	4,3	60	5			
16.	49	64,1	25,2	4,7	4,7	60	5			
17.	44,6	64,1	27,6	5,1	5,1	60	5			
18.	45,1	67,5	29	5,3	5,3	60	5			
19.	60,9	68,7	32,0	5,9	5,9	60	5	1,2158	2,736	0,5
20.	58	57,9	35,6	6,4	6,4	60	5			
21.	54	67,3	39,2	7,1	7,1	60	5			
22.	51,1	67,2	43,6	7,9	7,9	60	5			
23.	46,5	67	52	9,6	9,6	60	5			

Correspondența fiecărei valori în mm a tensiunii și curentului (U_{am} și I_{am}) utilizându-se relațiile din cap.4.2 pct.1-8 se determină și în acest fel, aceleași mărimi ca la paragraful 4.2.1. Rezultatele obținute se trec în tabelul nr.4.10.

Tabelul nr.4.10

Nr. crt.	S	o	Z _{er}	X _e (S)	R _e (S)	Z _e (S)	m _{ad}	u _r
1.	0,9706	82,130	0,7893	0,8053	0,1106	0,8129	0,3095	
2.	0,9433	81,509	0,7640	0,8010	0,1183	0,8097	0,3974	
3.	0,9090	81,21	0,7391	0,8047	0,1138	0,8128	0,3759	
4.	0,8695	81,39	0,7038	0,8003	0,1181	0,8009	0,3971	
5.	0,8196	81,14	0,6802	0,8200	0,1232	0,8292	0,3978	
6.	0,800	80,64	0,6495	0,8010	0,1269	0,8110	0,4309	
7.	0,7692	80,30	0,6312	0,8088	0,1320	0,8195	0,4421	
8.	0,6329	78,60	0,5018	0,7721	0,1449	0,7906	0,5296	
9.	0,5700	78,03	0,4553	0,7705	0,1484	0,7847	0,5526	
10.	0,5347	77,96	0,4156	0,7601	0,1505	0,7749	0,5765	
11.	0,4918	76,72	0,3813	0,7536	0,1570	0,7698	0,6133	
12.	0,4687	75,93	0,3678	0,7613	0,1676	0,7795	0,6444	
13.	0,400	74,40	0,3210	0,7729	0,1852	0,7948	0,6940	
14.	0,3614	72,65	0,3054	0,8065	0,2160	0,8350	0,7450	
15.	0,2727	70,36	0,2943	0,8610	0,2529	0,8974	0,7679	
16.	0,2381	67,14	0,2373	0,9183	0,3220	0,9731	0,8470	
17.	0,2174	66,52	0,2160	0,9114	0,3227	0,9668	0,8598	
18.	0,2068	65,79	0,2074	0,9149	0,3333	0,9737	0,8775	
19.	0,1829	64,75	0,1969	0,9736	0,3683	1,0410	0,8537	
20.	0,1685	64,73	0,1898	1,0185	0,3806	1,0873	0,8102	
21.	0,1530	65,20	0,1782	1,0572	0,3758	1,1221	0,7507	
22.	0,1376	65,23	0,1688	1,1138	0,3864	1,1790	0,7000	
23.	0,1153	66,46	0,1542	1,1260	0,3779	1,2830	0,5776	

Se reprezintă grafic variația $m_{ad}=f(S)$ și rezultă curba din fig.4.13.

Din curba rezultată astfel se determină valorile corespunzătoare ale cuplului pentru diferite valori ale alunecării cuprii se între 0 și 1.

Rezultatele obținute se trec în tabelul nr.4.11.

Pe baza rezultatelor din tabelul nr.4.11 se determină componenta medie a cuplului asincron m_a la pornirea în asincron cu înfășurarea rotorică deschisă (fig.4.13):

$$m_a = \frac{m_{ad} + m_{ag}}{2}$$

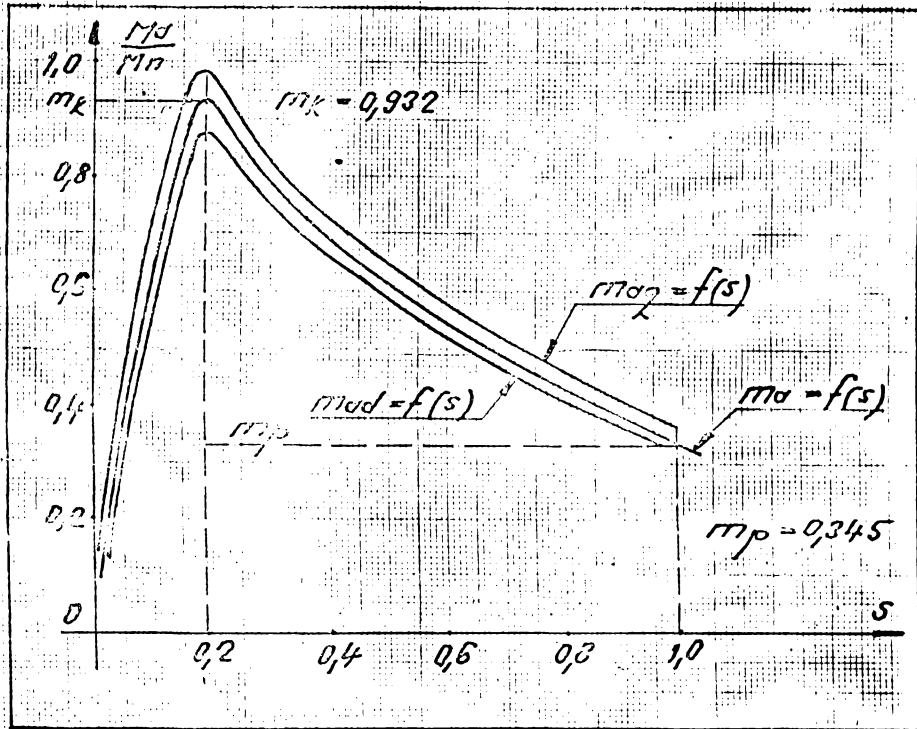


Fig.4.13. Caracteristica cuclului la pornirea în asincron cu reterul deschis.

Tabalul nr.4.11. Determinarea curbei medii a cuclului la pornirea în asinere cu înfășurarea rotorică deschisă.

Nr. crt.	s	m_{ad}	m_{aq}	$m_a = \frac{m_{ad} + m_{aq}}{2}$
1.	1,0	0,305	0,384	0,3445
2.	0,95	0,340	0,394	0,367
3.	0,90	0,372	0,415	0,393
4.	0,85	0,400	0,440	0,420
5.	0,80	0,428	0,465	0,446
6.	0,75	0,455	0,487	0,471
7.	0,70	0,480	0,515	0,497
8.	0,65	0,510	0,545	0,527
9.	0,60	0,542	0,575	0,558
10.	0,55	0,570	0,605	0,587
11.	0,50	0,610	0,655	0,637
12.	0,45	0,650	0,695	0,672
13.	0,40	0,690	0,740	0,715
14.	0,35	0,740	0,795	0,767
15.	0,30	0,785	0,850	0,817
16.	0,25	0,835	0,915	0,875
17.	0,20	0,875	0,986	0,932
18.	0,15	0,750	0,900	0,825
19.	0,1	0,520	0,730	0,625

4.2.3: Determinarea componentei asincrone a cuplului după axa o la pornirea în asincron cu înfășurarea rotorică scurtcircuitată.

Înfășurarea de excitație fiind scurtcircuitată inductorul mașinii de încercat se fixează în axa transversală folosind același procedeu ca la punctul 4.2.1. Se utilizează aceeași metodă de încercare indicată în paragraful 4.2.1 folosind montajul din fig.4.11.

Rezultatele obținute din prelucrarea oscilogramelor sînt trecute în tabelul 4.12.

Tabelul 4.12

Nr. crt.	U_a mm	I_a mm	l_1 mm	l_2' mm	l_2'' mm	l_3 mm	f_c Hz	C_v V/mm	C_i A/mm	k_{cx}
1.	60,9	45,2	20	4,5	4,5	20	50	3,376	1,946	0,5
2.	56,8	47	21,2	4,7	4,7	20	50			
3.	53,2	47,2	23	5	5	20	50			
4.	51,5	48,2	24,7	5,3	5,3	20	50			
5.	47,6	49,5	27,2	5,8	5,8	20	50			
6.	45,2	50,25	29,6	6,25	6,25	20	50			
7.	43	51	31,2	6,5	6,5	20	50			
8.	54	51,5	36	7,4	7,4	20	50	2,41	1,946	0,5
9.	48,8	52,2	40,4	8,2	8,2	20	50			
10.	67	52,5	44,8	8,9	8,9	20	50	1,628	1,946	0,5
11.	60	51,6	51	10	10	20	50			
12.	57,9	51,6	55	10,6	10,6	20	50			
13.	44	51	24	4,3	4,3	60	5			
14.	41,2	51	27	4,6	4,6	60	5			
15.	38,1	49,2	29,4	4,9	4,9	60	5			
16.	36	49,1	31,2	5,1	5,1	60	5			
17.	33,1	48	35,4	5,7	5,7	60	5			
18.	25,2	46,3	50,4	8,4	8,4	60	5			
19.	19,2	44	69,8	11,5	11,5	60	5			
20.	26,1	41,9	97,4	16,2	16,2	60	5	0,9578	1,946	0,5
21.	21,9	41	120	19,8	19,8	60	5			
22.	12,8	37	200	32,5	32,5	60	5			

Correspondența fiecărei valori în [mm] a tensiunii și curentului, se determină aceleași măriri ca la paragraful 4.2.1.

Rezultatele obținute se trec în tabelul 4.13.

Tabelul nr.4.13

Nr. crt.	S		Z_{or}	$X_e(S)$	$R_e(S)$	$Z_e(S)$	m_{aq}
1.	1,00	81	1,1687	1,1543	0,1628	1,1786	0,3163
2.	0,9434	79,81	1,0483	1,0936	0,1953	1,1109	0,3770
3.	0,8695	78,26	0,9776	1,1008	0,2257	1,1234	0,4326
4.	0,8097	77,24	0,9268	1,1163	0,2479	1,1435	0,4626
5.	0,7353	76,76	0,8341	1,1042	0,2524	1,1327	0,4810
6.	0,6756	76,01	0,7802	1,1205	0,2694	1,1525	0,4965
7.	0,6410	75,00	0,7313	1,1020	0,2839	1,1380	0,5410
8.	0,5550	74,00	0,6492	1,1245	0,3061	1,1654	0,5595
9.	0,4950	73,07	0,5788	1,1186	0,3197	1,1634	0,5881
10.	0,4464	71,51	0,5535	1,1176	0,3679	1,2321	0,6089
11.	0,3920	70,59	0,5043	1,2133	0,3960	1,2763	0,6132
12.	0,3636	69,38	0,4866	1,2527	0,4357	1,3263	0,6278
13.	0,2500	64,50	0,3741	1,3509	0,5833	1,4714	0,6913
14.	0,222	61,33	0,3503	1,3847	0,6658	1,5432	0,7411
15.	0,204	60	0,3358	1,4255	0,7436	1,6079	0,7438
16.	0,1923	58,84	0,3179	1,4150	0,770	1,6110	0,7680
17.	0,1695	57,9	0,2990	1,4954	0,8359	1,7132	0,7388
18.	0,1190	60,0	0,2360	1,7170	0,8409	1,9120	0,5966
19.	0,0659	59,3	0,1892	1,8943	0,9082	2,1000	0,5349
20.	0,0616	59,87	0,1532	2,15	0,9383	2,3460	0,4435
21.	0,0500	59,40	0,1314	2,2620	0,9511	2,4540	0,4199
22.	0,0300	58,50	0,0851	2,4190	0,8247	2,5560	0,3273

Se reprezintă grafic variația $m_{aq}=f(S)$ și rezultă curba din fig.4.14.

Din curba rezultată astfel se determină valorile corespunzătoare ale cuplului pentru diferite valori ale alunecării, cuprinse între 0 și 1. Rezultatele obținute se trec în tabelul nr.4.16.

4.2.4. Determinarea componentei asincrone a cuplului după axa d la pornirea în asincron cu înfășurarea rotorică scurtcircuitată

Înfășurarea rotorică fiind scurtcircuitată, inductorul mașinii de încercat se fixează în axa longitudinală și se alimentează cu tensiunea alternativă înfășurările B-C inseriate utilizând

montajul din fig.4.11.

Rezultatele obținute din prelucrarea oscilogramelor sînt trecute în tabelul nr.4.14.

Tabelul nr.4.14

Nr. crt.	U_{an} mm	I_{ea} mm	l_1 mm	l_2^1 mm	l_2^2 mm	l_3 mm	f_e Hz	C_u V/mm	C_i A/mm	k_{ex}
1.	60	52,5	20	4,7	4,7	20	50	9,31	5,261	0,5
2.	58,5	54	21	4,9	4,9	20	50			
3.	56	54,2	21,8	5,1	5,1	20	50			
4.	79,2	54,8	23	5,35	5,35	20	50	6,517	5,261	0,5
5.	72	55,9	26	6	6	20	50			
6.	66	54,3	27,0	6,4	6,4	20	50			
7.	61,2	54,6	30,2	6,9	6,9	20	50			
8.	56,9	57	34,2	7,7	7,7	20	50			
9.	47,9	55,2	40	8,9	8,9	20	50			
10.	65	51	42	9,3	9,3	20	50	3,3942	5,261	0,5
11.	62	50,8	44,2	9,7	9,7	20	50			
12.	58	50,2	47,5	10,3	10,3	20	50			
13.	64,6	51,7	54,6	11,4	11,4	20	50	2,7154	5,261	0,5
14.	71,2	50	20,6	4,2	4,2	6	50	1,9395	5,261	0,5
15.	66,3	51	23	4,6	4,6	6	50	1,9395	5,261	0,5
16.	60,9	51	25,2	5,0	5,0	6	50			
17.	74,2	50,5	30	5,8	5,8	60	5	1,3576	5,261	0,5
18.	59	49	38	7,3	7,3	60	5	1,3576	5,261	0,5
19.	51,9	50	45	8,6	8,6	60	5			
20.	49	50	48	9,1	9,1	60	5			
21.	38,5	47,6	20	3,8	3,8	20	5			
22.	34	48	23,8	4,5	4,5	20	5			

Correspondența fiecărei valori a tensiunii și curentului din tabelul 4.14 se determină valorile corespunzătoare ale compoziției asincrone a cuplului m_{ad} , utilizînd aceleași relații ca la paragrafele 4.2.1 - 4.2.3., iar rezultatele se trec în tabelul nr.4.15.

Se reprezintă grafic variația $m_{ad}=f(S)$ și rezultă curba din fig.4.14.

Tabelul nr.4.15

Nr. crt.	S	φ [°]	Z_{er} [Ω]	$X_e(S)$ [Ω]	$R_e(S)$ [Ω]	$Z_e(S)$ [Ω]	M_{ad} u.F.
1.	1	84,6	1,0112	1,0067	0,0951	1,0119	0,1945
2.	0,9523	84,00	0,9585	0,9967	0,1042	1,0020	0,2218
3.	0,9174	84,22	0,9142	0,9914	0,0985	0,9963	0,209
4.	0,8695	83,73	0,8951	1,0232	0,1092	1,029	0,228
5.	0,7692	83,07	0,8020	1,0350	0,1195	1,0419	0,243
6.	0,7194	82,87	0,7528	1,0383	0,1219	1,0450	0,247
7.	0,6622	82,25	0,6942	1,0387	0,1309	1,0469	0,268
8.	0,5848	81,05	0,6182	1,0442	0,1500	1,0549	0,3097
9.	0,5000	80,1	0,5374	1,0588	0,1644	1,0715	0,3337
10.	0,4762	79,71	0,41110	0,8494	0,1317	0,8595	0,4009
11.	0,4524	79	0,3936	0,8540	0,1413	0,8656	0,429
12.	0,4210	78,06	0,3727	0,8661	0,1551	0,8799	0,4628
13.	0,3663	75,16	0,3223	0,8505	0,1900	0,8715	0,5941
14.	0,2912	73,39	0,2624	0,8634	0,2079	0,8881	0,6320
15.	0,2610	72	0,2396	0,8730	0,2260	0,9018	0,6720
16.	0,2380	71,42	0,2200	0,8761	0,2292	0,9055	0,6768
17.	0,200	69,59	0,1895	0,8380	0,2490	0,9222	0,7148
18.	0,1578	69,15	0,1553	0,9197	0,2415	0,9509	0,6500
19.	0,1333	68,79	0,1331	0,9308	0,2287	0,9585	0,6031
20.	0,125	68,24	0,1264	0,9391	0,2322	0,9674	0,6020
21.	0,100	68,40	0,1039	0,9660	0,1993	0,9860	0,4890
22.	0,084	68,06	0,0913	1,0061	0,1842	1,0248	0,4140

Din curba rezultată astfel se determină valorile corespunzătoare ale cuplului pentru diferite valori ale alunecării cuprinse între 0 - 1 și rezultatele se trec în tabelul 4.16.

Pe baza rezultatelor din tabelul 4.16 se determină componenta medie a cuplului asincron m_a la pornirea în asincron cu înfăgurarea rotorică în scurtcircuit.

Din aceste curbe determinate experimental rezultă următorii parametri ce caracterizează regimul de pornire în asincron a mașinii sincrone în cele două cazuri (cu înfăgurarea rotorică deschisă respectiv scurtcircuitată) : cuplul de pornire (M_p), cuplul maxim (M_k) și alunecarea critică (S_k).

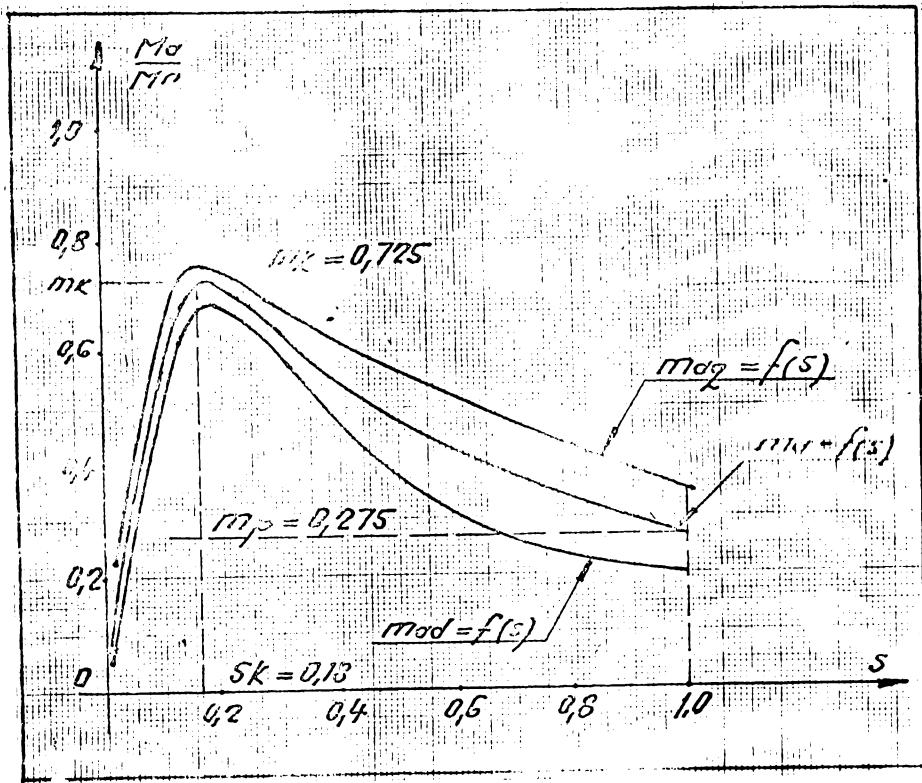


Fig.4.14. Caracteristica cuplului la pornirea în asincron cu înfășurarea rotorului scurtcircuitată.

Tabellul 4.16.

Determinarea curbei medii a cuplului la pornirea în asincron cu înfășurarea rotorică în scurtcircuit.

Nr. crt.	s	m_{ad}	m_{aq}	m_a
1.	1	0,200	0,340	0,270
2.	0,95	0,210	0,360	0,285
3.	0,9	0,220	0,391	0,305
4.	0,85	0,225	0,415	0,320
5.	0,8	0,230	0,440	0,335
6.	0,75	0,245	0,460	0,352
7.	0,7	0,260	0,485	0,372
8.	0,65	0,285	0,512	0,398
9.	0,6	0,312	0,532	0,422
10.	0,55	0,345	0,555	0,450

Tabelul nr.4.16 (continuare)

Nr. crt.	S	m_{ad}	m_{aq}	m_a
11.	0,5	0,385	0,575	0,480
12.	0,45	0,425	0,592	0,508
13.	0,4	0,475	0,615	0,545
14.	0,35	0,530	0,640	0,585
15.	0,3	0,590	0,675	0,632
16.	0,25	0,650	0,715	0,682
17.	0,2	0,700	0,750	0,725
18.	0,15	0,635	0,700	0,667
19.	0,10	0,500	0,550	0,525

Valorile acestor parametrii obtinute din cele două metode descrise in lucrare, sint date in tabelul 4.17.

Tabelul nr.4.17

Metoda	Cuplul de pornire		Cuplul maxim		Alunecarea critică	
	Rotor deschis	Rotorul in scurt.	Rotorul deschis	Rotorul in scurt.	Rotorul deschis	Rotorul in scurt.
Stingerea cimpului	0,369	0,261	0,942	0,753	0,185	0,162
Alimentare cu tensiune alternativa	0,345	0,275	0,932	0,725	0,20	0,18

Se constată că valorile obtinute prin cele două metode sint suficient de apropiate.

C A P I T O L U L 5

CONCLUZII

Dezvoltarea producției de mașini electrice în societatea contemporană, în care procesul de industrializare constituie o caracteristică dominantă în majoritatea țărilor lumii, ridică numeroase probleme teoretice și practice care se impun a fi soluționate în timp cât mai scurt posibil, orice întârziere a soluțiilor pot provoca greutăți atât în fabricație cât și în utilizarea pe scară largă a acestor mașini. O caracteristică fundamentală a cerințelor de perfecționare tehnologică și de ridicare a fiabilității mașinilor electrice o constituie aplicarea unor metode corespunzătoare de încercare a produselor realizate, prin aceasta asigurându-se pe de o parte configurarea funcționării acestor agregate la parametri nominali proiectați și pe de altă parte ridicarea gradului de calitate a acestora.

Lucrarea a fost elaborată în vederea soluționării unor probleme actuale și de perspectivă care au apărut în procesul de fabricație al mașinilor electrice de mare putere care sînt proiectate de Centrul de Cercetare Științifică și Inginerie Tehnologică pentru Echipamente Hidroenergetice Megata, mașini care echi-pează obiective importante ale economiei naționale.

Dintre problemele mai importante care se necesită a fi luate în considerare atât de către proiectantul cât și de către executantul acestor mașini, se amintesc următoarele:

1. Mașinile sincrone prevăzute în programul de fabricație al Intreprinderii Constructoare de Mașini din Megata se prezintă într-o gamă foarte diversificată de puteri și tipuri constructive numărul de exemplare de mașini de un anumit tip fiind foarte mic, uneori realizându-se câte un singur exemplar din fiecare tipo-

dimensiune. In aceste condiții apar probleme dificile legate de generalizarea unor metode teoretice de determinare a unor parametri și caracteristici de funcționare, prin calcule de proiectare. In aceste condiții se impune ca pentru fiecare tipodimensiune realizată să se verifice experimental toți parametrii și caracteristicile de funcționare în sarcină urmărindu-se în ce măsură există o concordanță între valorile teoretice rezultate prin calcule de proiectare și valorile reale obținute pe ștandul de probă.

2. Datorită faptului că puterile mașinilor realizate sînt în majoritatea cazurilor ridicate, metodele clasice de încercare nu mai pot fi aplicate în întregime. Ca urmare, se impune stabilirea unor metode specifice care să poată fi aplicate și în aceste condiții.

3. La încercarea pe ștandul de probă a unor asemenea mașini cu puteri de ordinul $10^3 - 10^4$ kW, aplicarea metodelor clasice, acolo unde este posibil, conduce la un consum ridicat de energie electrică fapt ce face ca încercările să devină în acest caz foarte costisitoare.

In condițiile crizei energetice, se impune ca o necesitate obiectivă soluționarea acestei probleme prin stabilirea unor metode bazate pe utilizarea unor regimuri tranzitorii cu un consum energetic minim.

4. Pentru mașinile cu dimensiuni de gabarit mare, la care nu există posibilitatea rotirii lor pe ștandul de probă, încercările de determinare a caracteristicilor de funcționare urmează a se face direct la locul de montaj. Acest mod de încercare însă uneori se poate solda cu importante prejudicii. In cazul în care la încercările pe șantier se constată o neconcordanță între caracteristicile teoretice și cele experimentale se impune demontarea mașinii și transportul ei în uzina constructoare în vederea modificărilor necesare. In practica industrială au fost întâlnite asemenea situații care s-au soldat cu importante prejudicii materiale și care au dus la mari întârzieri în punerea în funcționare a unor obiective industriale de cea mai mare importanță pentru economia noastră națională.

Este deci deosebit de important ca și pentru astfel de agregate să se efectueze testele de performanță în uzine constructoare, aceste teste urmînd a se face fie pe modele, fie pe suban-

samble sau direct de mașina asamblată cu rotorul blocat. Astfel de teste efectuate direct pe mașina asamblată cu rotorul blocat sînt ușor de realizat întrucît nu este necesară rotația rotorului cu implicațiile ce decurg din aceasta.

Ca urmare a celor enunțate mai sus în lucrare s-au avut în vedere unele aspecte legate de determinarea unor parametri și caracteristici de funcționare în regim asincron pentru mașina sincronă: reactanțe tranzitorii și supratranzitorii, caracteristica momentului de rotație și a curentului la pornirea în regim asincron.

Determinarea reactanțelor tranzitorii și a caracteristicilor de pornire în regim asincron prin metodele clasice presupun cuplarea mașinii de încercat cu o altă mașină de aceeași putere sau conectarea ei directă la rețeaua de alimentare, ceea ce în majoritatea cazurilor nu este posibil pentru mașinile de puteri și dimensiuni de gabarit mari.

Pornind de la această necesitate obiectivă de a pune la dispoziție uzinelor constructoare de mașini electrice metode corespunzătoare de determinare a unor asemenea parametri și caracteristici de funcționare, în lucrare s-au tratat două metode de determinare a caracteristicilor de funcționare în asincron a mașinii sincrone:

- metoda răspunsului tranzitoriu în curent după cele două axe la variația în treaptă unitară a tensiunii de alimentare;
- metoda alimentării înfigurării statorice de la o sursă de tensiune alternativă de frecvență variabilă.

Cele două metode expuse în lucrare au fost utilizate la încercarea de determinare a caracteristicilor de funcționare în asincron a unei mașini sincrone avînd puterea nominală aparentă de 14250 kVA, fabricată la I.C.M. Peșita, destinată să echipeze una din centralele hidroelectrice de pe râul Olt.

Utilizarea celor două metode descrise în lucrare, la determinarea parametrilor interni ai mașinii sincrone, are următoarele avantaje:

a) Încercările nu implică punerea în funcțiune a mașinii. Din acest punct de vedere metoda poate fi aplicată pentru orice tip de mașină care se poate asambla în uzină. Această asamblare constă în introducerea rotorului în stator, centrarea sa, astfel încît să se obțină o uniformitate a întrefierului și blocarea

apei a rotorului într-o anumită poziție față de stator (după axa longitudinală sau cea transversală). Este deosebit de avantajoasă aplicarea acestor metode la încercarea motoarelor verticale de putere mare la care practic este imposibilă cuplarea lor cu o mașină de antrenare pe ștandul de probă.

b) Încercările conform metodelor propuse nu produc solicitări ale mașinii de încercat. Întrucât timpul menținerii curentului prin înfășurarea indusului în timpul încercării este foarte scurt temperatura bobinajului nu ajunge să crească cu mai mult de $(6-10)^{\circ}\text{C}$ față de temperatura inițială, deci mașina nu este solicitată termic. În timpul încercărilor nu există pericolul apariției unui supracurent sau a unei supratensiuni în înfășurările mașinii.

c) Măsurătorile se realizează cu ajutorul unor montaje simple. Pentru efectuarea încercărilor sînt necesare un număr restrîns de aparate: de măsură un voltmetru un ampermetru și un oscilograf. Alimentarea în curent continuu se poate face de la orice sursă de c.c. existentă: baterie de acumulatori sau generator de curent continuu. Alimentarea în curent alternativ presupune însă existența în ștandul de probă a unei surse de frecvență variabilă să furnizeze un curent de valoare apropiată de valoarea curentului nominal a mașinii de încercat dar de putere mult mai mică, tensiunea de alimentare fiind redusă. Timpul necesar pentru realizarea montajului conform schemei de principiu indică în lucrare este foarte mic, și nu se necesită personal calificat superior pentru realizarea lui.

d) Timpul de încercare scade mult în raport cu timpul necesar determinării aceluiași parametri prin metodele clasice cunoscute.

Prin reducerea timpului de încercare se reduce și timpul de staționare a mașinii pe ștandul de probă ceea ce face ca metoda să fie expeditivă contribuind la ridicarea productivității muncii în uzină.

e) Consumul de energie este foarte redus în timpul încercărilor. Întrucât timpul de încercare este foarte limitat, energia consumată în acest interval de timp este practic neglijabilă dacă se raportează la puterea nominală a mașinii de încercat.

Pentru a da o valoare orientativă a economiilor de energie obținute prin aplicarea tehnologiilor prezentate la încercarea generatorului sincron de 14250 kVA, se precizează că energia

totală consumată în timpul efectuării probelor de determinare a parametrilor conform metodelor indicate în lucrare este de 50 kWh față de aproximativ 1500 kWh cât este necesar pentru determinarea aceluiași parametri prin metodele clasice de încercare. Ținând cont de numărul de mașini executate în întreprinderea Constructoare de Mașini din Reșița și de puterea acestora, rezultă economii de energie.

f) Metodele indicate în lucrare au un domeniu foarte larg de aplicabilitate. Aceste metode pot fi utilizate pentru studiul și a altor regimuri de funcționare a mașinii sincrone și chiar a mașinii asincrone. Este indicată utilizarea metodei alimentării în curent alternativ la determinarea caracteristicii momentului de rotație funcție de viteza de rotație și la mașina asincronă.

g) Pentru mașinile sincrone de puteri mari, metodele descrise devin foarte precise, întrucât în acest caz valorile rezistențelor ohmice ale înfășurărilor statorice sînt foarte mici și practic se pot neglija în raport cu valorile reactanțelor.

h) Nu este necesar să se cunoscă despre mașină decît puterea nominală și valoarea rezistenței pe fază a înfășurării statorice.

i) Nu este necesară etalonarea buclelor de oscilograf, deoarece nu interesează valoarea absolută a semnalelor oscilografiate, ci doar valorile relative raportate la valorile inițiale.

j) Metoda răspunsului tranzitoriu în curent după cele două axe poate fi aplicată cu ușurință și pentru determinarea parametrilor în regim tranzitoriu a hidrogeneratoarelor care nu se pot asambla în uzina furnizoare, aceste probe urmînd a se efectua pe șantier la locul de montaj.

În mod obișnuit determinarea parametrilor în regim tranzitoriu (x_d' ; x_d'' ; x_q'') și în regim stabilizat (x_d ; x_q) se face din proba de scurtcircuit trifazat și simetrie brusc. Această probă presupune însă existența unei instalații speciale de efectuare a scurtcircuitului brusc dotată cu un dispozitiv special de comandă care să permită alegerea momentului scurtcircuitului în funcție de valoarea momentană a tensiunii din momentul respectiv.

În același timp pentru înregistrarea curenților de scurtcircuit care pot atinge valori foarte mari (de ordinul zecilor de kiloamperi) sînt necesare șunturi neinductive în locul transformatoarelor obișnuite de curent.

In acest caz, este deosebit de dificil transportul unei asemenea instalații pe șantier și conectarea ei în circuitul de forță al generatoarelor de mare putere din centralele electrice. In același timp, ținând cont de faptul că scurtcircuitul brusc este însoțit de forțe puternice care pot produce deteriorarea bobinajului stator sau chiar deplasarea de pe placa de fundație a întregii mașini, nu se recomandă efectuarea unor asemenea probe în locul de montaj.

In aceste condiții singura posibilitate de determinare a parametrilor în regim tranzitoriu, amintiți, o constituie metoda răspunsului tranzitoriu în curent după cele două axe care se poate aplica cu ușurință fără a exista vreun pericol de sollicitare a mașinii.

Această metodă se poate aplica cu succes și în cazul mașinilor sincrone (generatoare și motoare) destinate exportului unde în mod obligatoriu se impune certificarea prin probe a parametrilor rezultați din calculele de proiectare.

Rezultatele obținute la încercarea unei mașini sincrone de 14125 kVA prin aplicarea celor două metode propuse în lucrare, rezultate prezentate comparativ în cap.4 al lucrării, certifică precizia suficient de ridicată a metodelor prezentate.

Un inconvenient important în folosirea acestor metode îl constituie utilizarea ca mijloc de înregistrare a oscilografului întrucât este deosebit de dificilă citirea oscilogramelor rezultate în procesele de înregistrare, necesitând un timp foarte mare de citire și prelucrare a datelor obținute. In același timp rezultatele obținute în acest mod pot fi aplicate de importante erori.

Pentru mărirea preciziei și scurtarea timpului necesar pentru prelucrare, s-au întocmit programe de prelucrare automată cu ajutorul calculatorului electronic a datelor obținute din oscilograme. S-a întocmit astfel un program de descompunere în componente exponențiale a curbelor de atenuare a curentului obținute prin metoda răspunsului tranzitoriu în curent după cele două axe și un program de calcul a parametrilor după cele două axe, cât și a curbei curentului și a momentului de rotație în funcție de alunecare în regim asincron.

Aceste metode devin foarte ușor de aplicat, în cazul în

care în locul oscilografului se folosește un sistem automat de achiziție și prelucrare pe calculator a datelor. Dotarea gîndurilor de probă din întreprinderile constructoare de mașini electrice cu asemenea sisteme automate de achiziție și prelucrare pe calculator are o importanță deosebită întrucît prin aceasta devine posibilă aplicarea cu succes a tuturor metodelor moderne de încercare cunoscute și în același timp se creează premisele introducerii progresului tehnic în aceste întreprinderi.

A N E X A
 SCHEMA LOGICA SI PROGRAMUL DE CALCUL PENTRU PRELUCRAREA
 OSCILOGRAMELOR REZULTATE DIN INCERCARILE DE REGIM
 TRANZITORIU

În timpul procesului tranzitoriu de stingere a unui curent printr-o înfășurare a unei mașini electrice, curba de variație a curentului este constituită dintr-o sumă de exponențiale cu constante de timp diferite. Pentru exemplificare se consideră situația în care curentul este reprezentat printr-o sumă de două exponențiale de forma:

$$i(t) = I_1 e^{-\frac{t}{T_1}} + I_2 \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} \quad (1)$$

Prin logaritmare a acestei expresii se obține:

$$\ln i(t) = \ln(I_1 e^{-\frac{t}{T_1}} + I_2 \cdot e^{-\frac{t}{T_2}}) \quad (2)$$

Pentru valori mari a lui t ($t \rightarrow \infty$) componenta având constanta de timp $T_2 \ll T_1$ se poate neglija și expresia (2) devine:

$$\ln i(t) = \ln I_1 - \frac{t}{T_1} \quad (3)$$

Rezultă că pentru valori mari a lui "t" curba logaritmică devine o linie dreaptă a cărei ecuație este de forma:

$$y = A \cdot t + B$$

$$\text{unde: } A = -\frac{1}{T_1} \quad ; \quad B = \ln I_1$$

Pentru prelucrarea pe calculator a curbei de variație a curentului, din oscilogramă se citesc perechile de puncte (y_i, t_i) unde y_i este ordonata punctului citit de pe oscilogramă iar t_i este timpul corespunzător ordonatei y_i . Obținem astfel N perechi de numere (y_i, t_i) care vor defini curba de variație a curentului.

Dacă se logaritmează ordonatele y_i ale acestor puncte și se păstrează timpul același, obținem alt gir de N perechi de numere (Y_i, T_i) unde $Y_i = \ln y_i$; $T_i = t_i$

Conform ecuației (3) se constată că pentru valori mari a lui T_i , perechile de puncte (Y_i, T_i) trebuie să se înscrie pe o dreaptă.

Determinarea acestei drepte se face prin utilizarea principiului metodei celor mai mici pătrate. Conform acestei metode ecuația dreptei căutate este de forma:

$$Y = a_1 \cdot T + a_0 \quad (4)$$

unde a_0 și a_1 sînt coeficienți ce se determină cu următoarele relații de calcul date în literatura de specialitate:

$$a_1 = \frac{N \sum T_i Y_i - \sum T_i \sum Y_i}{N \sum T_i^2 - (\sum T_i)^2} \quad (5)$$

$$a_0 = \frac{Y_i \sum T_i^2 - \sum T_i \sum T_i Y_i}{N \sum T_i^2 - (\sum T_i)^2} \quad (6)$$

- unde :
- Y_i reprezintă ordonata logaritmată a unui punct oarecare de pe curbă ;
 - T_i reprezintă timpul pe abscisă corespunzător ordonatei Y_i a punctului respectiv.

Curba de variație va fi dată deci tabelar printr-un gir de N perechi de numere care reprezintă coordonatele celor N puncte citite de pe oscilogramă:

$$(Y_1; T_1); (Y_2; T_2) \dots (Y_{N-1}; T_{N-1}); (Y_N; T_N)$$

Intr-cît nu se cunosc punctele ce aparțin dreptei (4) se consideră ultimele $L=10$ perechi de numere care reprezintă ultimele 10 puncte citite de pe oscilogramă și pentru acestea se aplică principiul metodei celor mai mici pătrate.

Rezultă astfel cu ajutorul relațiilor (5) și (6) coeficienții a_1 și a_0 care determină dreapta ce trece prin cele 10 puncte a cărei ecuație va fi de forma:

$$Y = a_1 T + a_0 \quad (7)$$

Se consideră apoi în continuare următoarele două puncte de coordonate (Y_{N-10}, T_{N-10}) ; (Y_{N-1}, T_{N-1}) și pentru acestea se vor determina distanțele până la dreapta (7).

Dacă aceste distanțe : d_{N-10} ; d_{N-11} vor fi mai mici decât o valoare minimă considerată ϵ se poate considera că și aceste două puncte aparțin dreptei 7 și se va aplica din nou principiul metodei celor mai mici pătrate pentru utilele $L+2=12$ puncte; rezultând astfel alte valori pentru a_1 și a_0 , care vor fi înlocuite în ecuația dreptei (7). În același mod se verifică și pentru următoarele puncte distanțele până la dreapta (7) și toate punctele care au distanțele mai mici decât ϵ vor fi incluse în dreapta (7) obținându-se pentru aceasta o expresie finală de forma:

$$Y = A_1 T + B_1 \quad (8)$$

Rezultă astfel pentru prima componentă exponențială; o expresie de forma:

$$y_1 = I_1 e^{-\frac{t}{T_1}} \quad (9)$$

$$\text{unde : } I_1 = e^{B_1} ; T_1 = -\frac{1}{A_1}$$

În continuare, din curba inițială reprezentată prin perechile (y_1, t_1) se scade prima componentă exponențială obținută (9) și se obține o nouă curbă reprezentată prin restul de $(N-N_1)$ perechi de coordonate ale celor $(N-N_1)$ puncte rămase, unde N_1 reprezintă numărul de puncte înscrise pe dreapta (8).

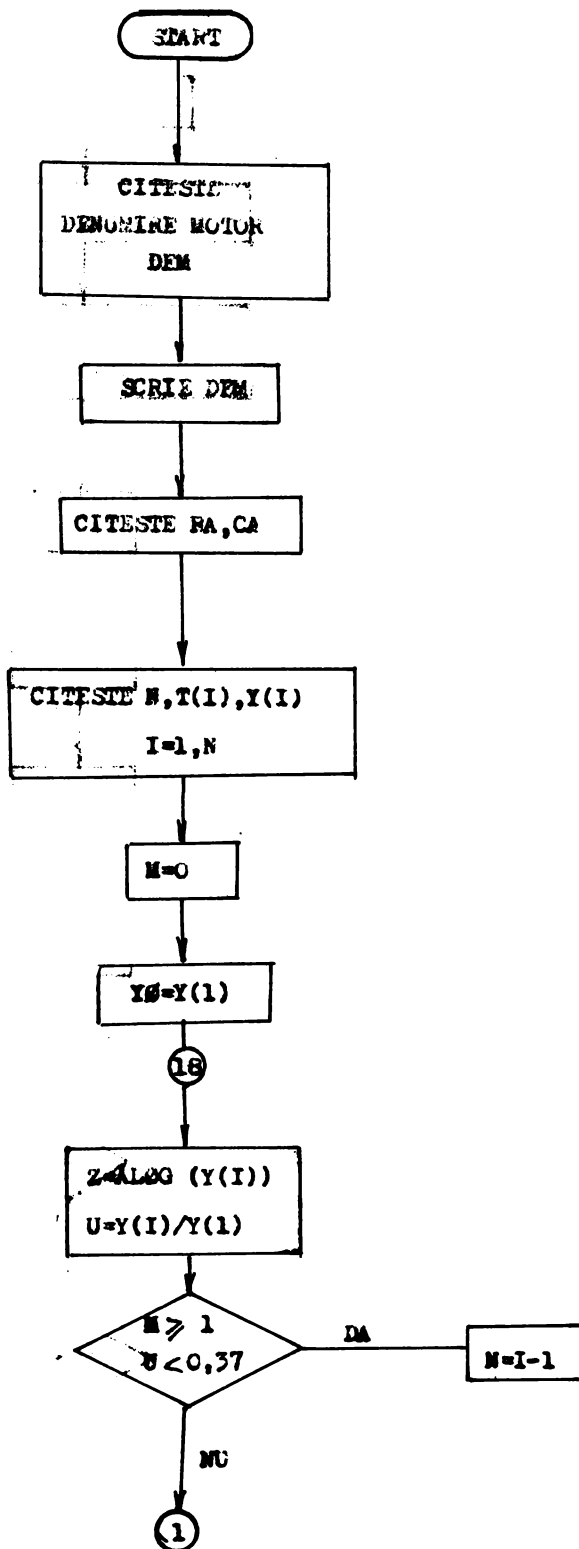
După logaritmare ordonatelor acestor puncte se aplică din nou principiul metodei celor mai mici pătrate și se determină în același mod ca și în cazul primei exponențiale, dreapta ce reprezintă a două exponențială logaritmată:

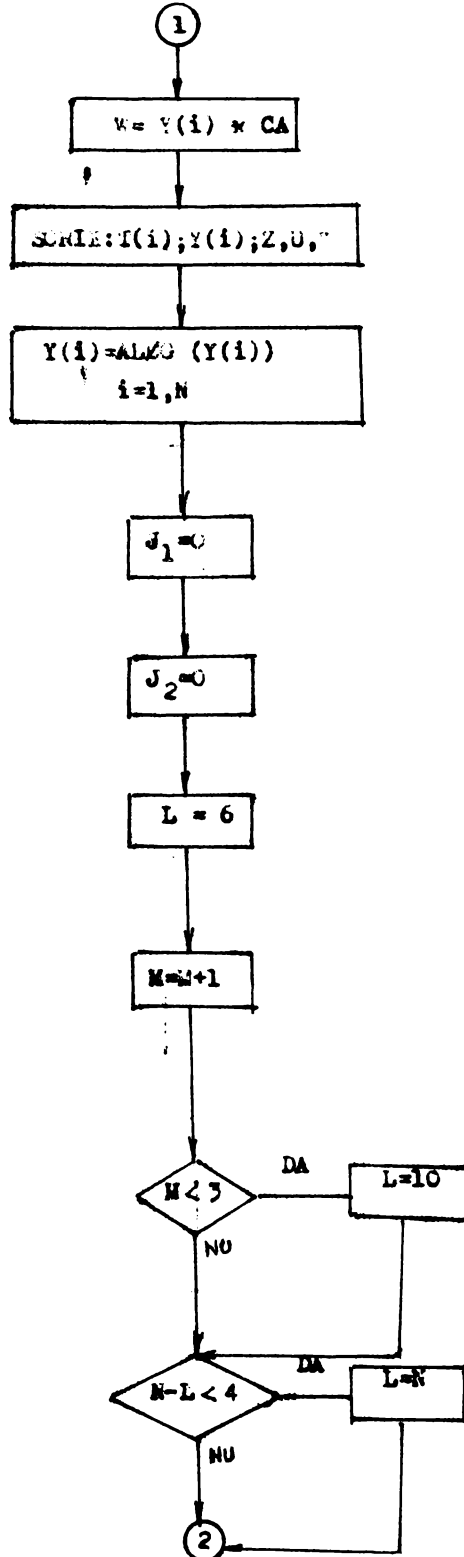
$$Y_2 = A_2 T + B_2 \quad (10)$$

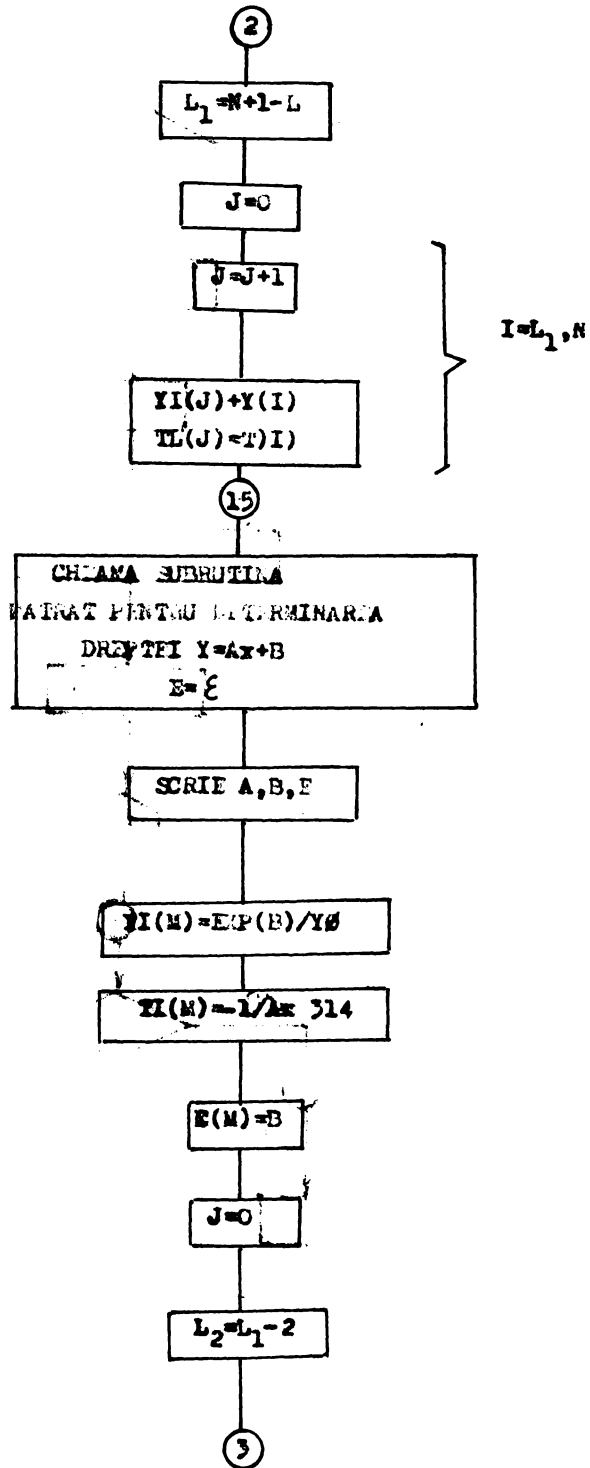
A doua componentă exponențială va fi de forma:

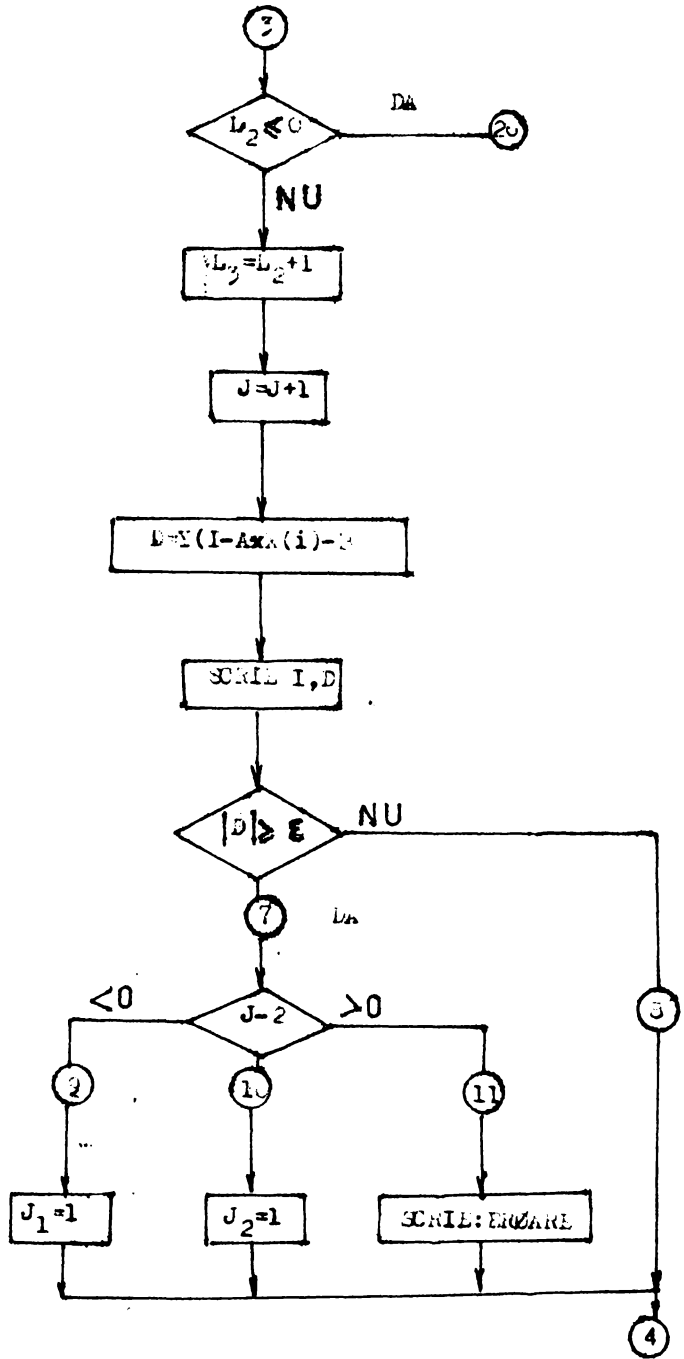
$$y_2 = I_2 e^{-\frac{t}{T_2}}$$

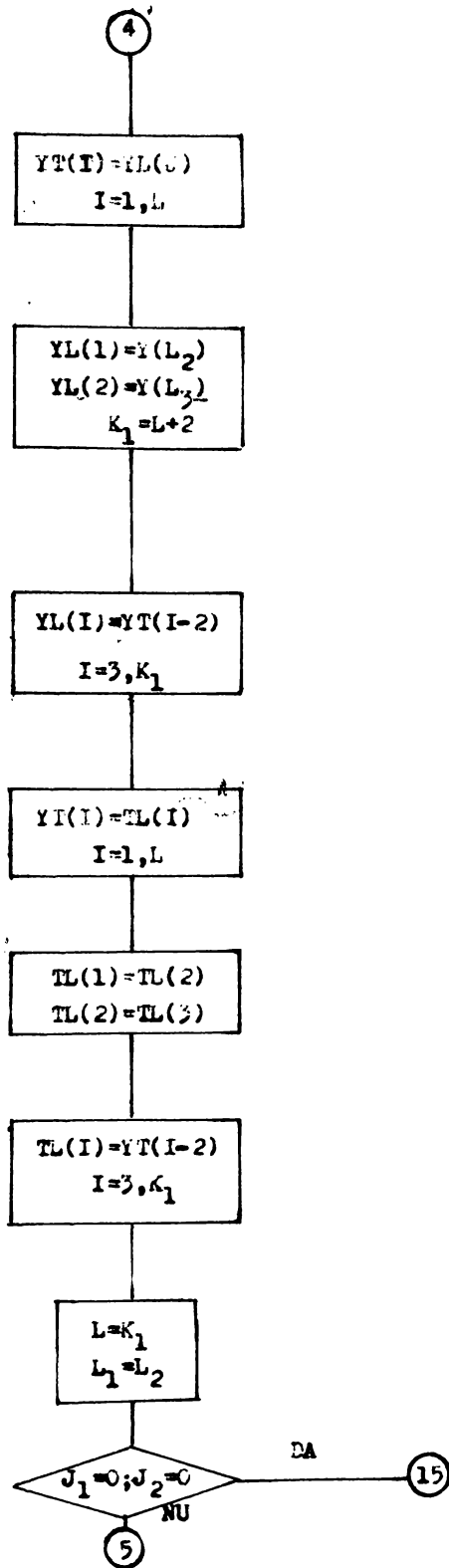
În același mod se procedează și în cazul în care curba de variație a curentului are mai multe componente exponențiale. Având determinați coeficienții $(I_1; T_1)$ ce definesc componentele exponențiale, putem determina parametri ce rezultă din proba de stingere respectivă.

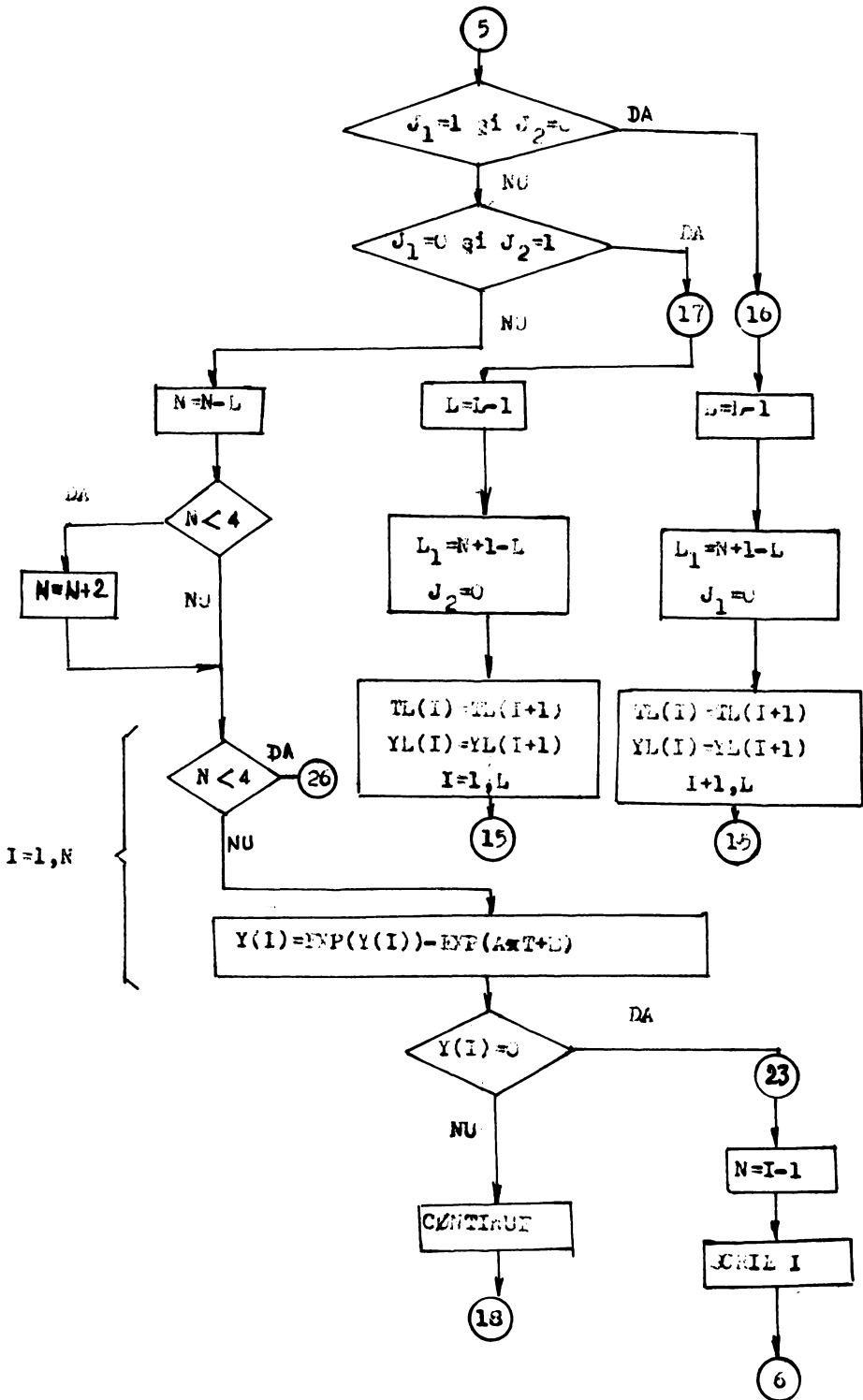


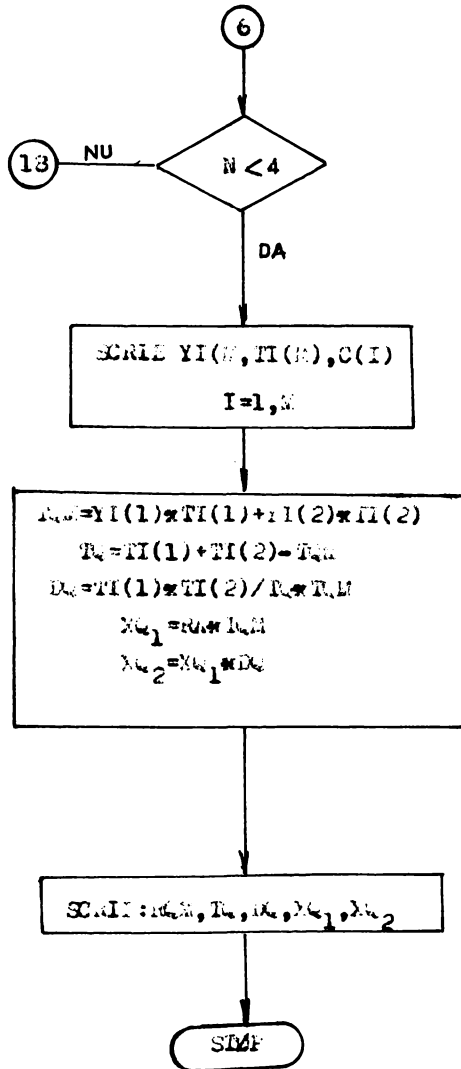












```

DIMENSION T(100),Y(100),YI(10),C(10),YL(50),TL(50),YT(100),TI(10),
A(EM(20))
READ(105,34)DEM
FORMAT(20A4)
WRITE(108,35)DEM
FORMAT(/,20X,20A4)
READ(105,36)PA,CA
FORMAT(F9.3,F7.3)
READ(105,1)N,(T(I),Y(I),I=1,N)
FORMAT(I4,(10F7.3))
M=0
Y0=Y(1)
DO 2 I=1,N
Z=ALOG(Y(I))
U=Y(I)/Y0
IF(M,GE,1,AND,N,LT,0.37)GO TO
W=Y(I)*CA
WRITE(108,2)T(I),Y(I),Z,U,W
FORMAT(6X,4(3X,F7.3),3X,F8.3)
GO TO 31
N=N-1
DO 4 I=1,N
Y(I)=ALOG(Y(I))
J1=0
J2=0
L=5
M=M+1
IF(M,LT,3)L=10
IF(N-L,LT,4)L=N
L1=N+1-L
J=0
DO 5 I=L1,N
J=J+1
YL(J)=Y(I)
TL(J)=T(I)
3 CALL PATRAT(L,TL,YL,A,B,E)
WRITE(108,29)A,B,E
FORMAT(3X,4A=1,F8.3,1X,4B=1,F8.3,1X,4E=1,F8.4)
YI(M)=EXP(B)/Y0
TI(M)=-L1/A*314
C(M)=E
J=0
L2=L1-2
IF(L2,LE,0)GO TO 33
L3=L2+1
DO 3 I=L2,L3
J=J+1
D=(Y(I)-A*(I)-B)
WRITE(108,28)I,D
8 FORMAT(3X,1N=1,13,1X,1DISTANTA=1,F7.4)
IF(ABS(D),GE,E)GO TO 7
GO TO 3
IF(J-2)10,11
J1=1
GO TO 8
J2=1
GO TO 8
1 WRITE(108,12)
2 FORMAT(3X,1EROARE LA TEST DISTANTA)
CONTINUE
DO 6 I=1,L
YT(I)=YL(I)
YL(1)=Y(L2)
YL(2)=Y(L3)
K1=L+2

```

```

DO 20 I=1,L
YT(I)=TL(I)
TL(1)=T(L2)
TL(2)=T(L3)
DO 21 I=3,K1
TL(I)=YT(I-2)
L=K1
L1=L2
IF(J1.EQ.0.AND.J2.EQ.0)GO TO 15
IF(J1.EQ.1.AND.J2.EQ.0)GO TO 14
IF(J1.EQ.0.AND.J2.EQ.1)GO TO 17
N=N-L
IF(N.LT.4)N=N+2
IF(N.LT.4)GO TO 24
DO 24 I=1,N
YT(I)=A*T(I)+E
YT I =EXP(YT I)
Y(I)=EXP(Y(I))
Y(I)=Y(I)-YT(I)
IF(Y(I).LE.0)GO TO
GO TO 19
N=N-1
WRITE(108,25)1
FORMAT(0Y '(PTRLAL 12, PUNCT DIFERENTA DE ORDONATE ESTE LA ZERO
A)BY, (RE IAU PUNCTE DOAR PINA AICI)')
IF(N.LT.4)GO TO 24
GO TO
L=L-1
L1=N+1-L
J1=0
DO 19 I=1 L
TL(I)=TL(I+1)
YL(I)=YL(I+1)
GO TO 15
L=L-1
L1=N+1-L
J2=0
DO 22 I=2, L
TL(I)=TL(I+1)
YL(I)=YL(I+1)
GO TO 15
WRITE(108,27) M, (YI(I) TI(I),C/I ,I=1,M)
FORMAT(/7X, (CURBA S-A DESCOMPUS IN (12, DREPTA(/7,4X, (CURENTA
ASY, (CONST.TIMP(2X, (ORD.LA ORD( (3X, (AF(1.4 (X))
TOM=YI(1)*TI(1)+YI(2)*TI(2)
TO=TI(1) TI(2)+TOM
DO=TI(1)*TI(2)/(TO*TOM)
XQ1=RA*TOM
XQ2=XQ1*DO
WRITE(108,32) TOM,TO,DO,XQ1,XQ2
FORMAT(/7X, (REZULTA: /3X, (PUNCT DE TIMP: /4X, (TOM=(F11.5/3X, (CON
ASTANTA DE TIMP INFABURARE AMORTIZARE : /4X, (TO=(F11.5/3X, (COEFFIC
IENT DE DISPERSIE: /4X, (DO=( F10.5/3X, (REACTANTIA SINCRONA: /4X, (XQ1
A=( F10.5/3X, (REACTANTIA SUBRATRANZITORIC : /4X, (XQ2=( F10.5/
STOP
END
SUBROUTINE PATRAT(N,X,Y,A,B,E)
DIMENSION X(1),Y(1),P(100)
SX=0
SY=0
S2X=0
S2Y=0
SXY=0
DO 1 I=1,N
SX=SX+X(I)
SY=SY+Y(I)
S2X=S2X+X(I)*X(I)
SXY=SXY+X(I)*Y(I)
A=(SX*SY-N*SXY)/(SX*SY-N*S2X)
P=(SY-A*SX)/N
L=N

```



```
011 =ABS(D(I) - D(I-1))
E=D(I)
DO 3 I=1,L
IF(E.LT.D(I)) E=D(I)
CONTINUE
IF(E.LT.0.02) E=0.02
IF(NC.EQ.2) E=0.01
RETURN
END
```

TABEL NR: 41

DENUMIRE MOTOR:GEN.TIP GMSOC 440/132-48;14250 KVA

DENUMIRE PROBA:ATENUAREA CURENTULUI DUPA AXA Q

NR.CRT.	TIMP	Y	LN(Y)	Y/Y1	YA
1	0.0000	104.9000	4.6530	1.0000	442.9927
2	0.0030	102.1000	4.6260	0.9733	431.1682
3	0.0060	99.9000	4.6042	0.9523	421.8777
4	0.0090	97.9000	4.5839	0.9333	413.4317
5	0.0120	96.0000	4.5643	0.9152	405.4080
6	0.0150	94.3000	4.5455	0.8990	398.2289
7	0.0180	92.2000	4.5240	0.8789	389.3605
8	0.0210	91.0000	4.5109	0.8675	384.2930
9	0.0240	89.5000	4.4942	0.8532	377.9585
10	0.0270	88.1000	4.4785	0.8398	372.0463
11	0.0320	86.2000	4.4567	0.8217	364.0226
12	0.0370	84.5000	4.4368	0.8055	356.8435
13	0.0420	83.0000	4.4188	0.7912	350.5090
14	0.0470	81.7000	4.4031	0.7788	345.0190
15	0.0520	80.2000	4.3845	0.7645	338.6845
16	0.0570	78.9000	4.3682	0.7521	333.1947
17	0.0620	77.8000	4.3541	0.7417	328.5494
18	0.0670	76.1000	4.3320	0.7255	321.3703
19	0.0720	75.0000	4.3175	0.7150	316.7250
20	0.0770	73.8000	4.3014	0.7035	311.6574
21	0.0870	71.4000	4.2683	0.6806	301.5222
22	0.0970	69.0000	4.2341	0.6578	291.3870
23	0.1070	67.0000	4.2047	0.6387	282.9410
24	0.1170	64.9000	4.1728	0.6187	274.0727
25	0.1270	63.0000	4.1431	0.6006	266.0490
26	0.1470	59.0000	4.0775	0.5624	249.1570
27	0.1670	55.2000	4.0110	0.5262	233.1096
28	0.1870	51.9000	3.9493	0.4948	219.1737
29	0.2070	48.7000	3.8857	0.4643	205.6601
30	0.2270	45.7000	3.8221	0.4357	192.9911
31	0.2770	39.0000	3.6636	0.3718	164.6970
32	0.3270	33.2000	3.5025	0.3165	140.2036
33	0.3770	28.7000	3.3569	0.2736	121.2001
34	0.4270	24.2000	3.1864	0.2307	102.1966
35	0.4770	20.8000	3.0350	0.1983	87.8384
36	0.5270	17.7000	2.8736	0.1687	74.7471
37	0.5770	15.1000	2.7147	0.1439	63.7673
38	0.6270	13.0000	2.5649	0.1239	54.8990

CONSTANTA DE ETALONARE A CURENTULUI IN STATOR,CA= 4.22299957

REZISTENTA ECHIVALENTA A CIRCUITULUI IN U.R.,RA= 0.00886900

TABEL NR: 41.1

DENUMIRE MOTOR: GEN. TIP GMO SC 446/122-48; 14250 KVA

DENUMIRE PROBA: ATENUAREA CURENTULUI DUPA AXA 0

DESCOMPUNEREA IN COMPONENTE EXPONENTIALA A CURBEI
DE ATENUARE A CURENTULUI STATORIC

CURBA EXPONENTIALA NR:1

NR. CRT	NR. ORD	TIMP	Y	LN(Y)	Y/Y1	YA
1	13	0.0420	83.0000	4.4188	0.7912	350.5091
2	14	0.0470	81.7000	4.4031	0.7788	345.0191
3	15	0.0520	80.2000	4.3845	0.7645	338.6845
4	16	0.0570	78.9000	4.3682	0.7521	333.1947
5	17	0.0620	77.8000	4.3541	0.7417	328.5494
6	18	0.0670	76.1000	4.3320	0.7255	321.3703
7	19	0.0720	75.0000	4.3175	0.7150	316.7250
8	20	0.0770	73.8000	4.3014	0.7035	311.6573
9	21	0.0870	71.4000	4.2683	0.6806	301.5222
10	22	0.0970	69.0000	4.2341	0.6578	291.3870
11	23	0.1070	67.0000	4.2047	0.6387	282.9410
12	24	0.1170	64.9000	4.1728	0.6187	274.0727
13	25	0.1270	63.0000	4.1431	0.6006	266.0480
14	26	0.1470	59.0000	4.0775	0.5624	249.1570
15	27	0.1670	55.2000	4.0110	0.5262	233.1096
16	28	0.1870	51.9000	3.9493	0.4948	219.1737
17	29	0.2070	48.7000	3.8857	0.4643	205.6601
18	30	0.2270	45.7000	3.8221	0.4357	192.8911
19	31	0.2770	39.0000	3.6636	0.3718	164.6970
20	32	0.3270	33.2000	3.5025	0.3165	140.2036
21	33	0.3770	28.7000	3.3569	0.2736	121.2001
22	34	0.4270	24.2000	3.1864	0.2307	102.1966
23	35	0.4770	20.8000	3.0350	0.1983	87.8384
24	36	0.5270	17.7000	2.8736	0.1687	74.7471
25	37	0.5770	15.1000	2.7147	0.1439	63.7673
26	38	0.6270	13.0000	2.5649	0.1239	54.8990

CURBA EXPONENTIALA ESTE DE FORMA:

$$Y=Y1*EXP(-t/T1)$$

UNDE:

Y1=VALOAREA INITIALA A CURENTULUI CE SE AMORTIZEAZA, IN U.R.

T1=CONSTANTA DE TIMP A ATENUARII CURENTULUI

S-A CALCULAT:

$$Y1= 0.8971$$

$$T1= 99.0966 \text{ U.R.}$$

$$t1= 0.0144 \text{ SEC.}$$

DECI:

$$Y= 0.8971*EXP(-t/ 99.0966)$$

TABEL NR: 41.2

DENUMIRE MOTOR: GEN.TIP GMO SC 440/132-48; 14250 KVA

DENUMIRE PROBA: ATENUAREA CURENTULUI DUPA AXA 0

DESCOMPUNEREA IN COMPONENTE EXPONENTIALA A CURBEI
DE ATENUARE A CURENTULUI STATORIC

CURBA EXPONENTIALA NR:2

NR.CRT	NR.ORD	TIMP	Y	LN(Y)	Y/Y1	YA
1	1	0.0000	2.3791	0.8667	0.2204	10.0469
2	2	0.0030	2.1844	0.7813	0.2024	9.2248
3	3	0.0060	2.0239	0.7050	0.1875	8.5467
4	4	0.0090	1.8627	0.6220	0.1725	7.8661
5	5	0.0120	1.6875	0.5233	0.1563	7.1265
6	6	0.0150	1.5180	0.4174	0.1406	6.4107
7	7	0.0180	3.3123	1.1976	0.3068	13.9878
8	8	0.0210	2.9532	1.0829	0.2736	12.4715
9	9	0.0240	2.2862	0.8269	0.2118	9.6548
10	10	0.0270	1.7113	0.5373	0.1585	7.2270
11	11	0.0320	1.1692	0.1564	0.1083	4.9377
12	12	0.0370	0.8057	-0.2160	0.0746	3.4026

CURBA EXPONENTIALA ESTE DE FORMA:

$$Y=Y2*EXP(-t/T2)$$

UNDE:

Y2=VALOAREA INITIALA A CURENTULUI CE SE AMORTIZEAZA, IN U.R.

T2=CONSTANTA DE TIMP A ATENUARII CURENTULUI

S-A CALCULAT:

$$Y2= 0.1015$$

$$T2= 5.5655 \text{ U.R.}$$

$$T2= 0.0075 \text{ SEC.}$$

DECI:

$$Y= 0.1015*EXP(-t/ 5.5655)$$

PENTRU CURBA DE VARIATIE A CURENTULUI STATORIC DUPA AXA 0
REZULTA EXPONENTIALA

$$Y=Y1*EXP(-t/T1)+Y2*EXP(-t/T2)$$

$$Y= 0.8971*EXP(-t/ 99.0966)+ 0.1015*EXP(-t/ 5.5655)$$

TABEL NR: 42

DENUMIRE MOTOR: GEN. TIP GMSOC 440/132-48; 14250 KVA

DENUMIRE PROBA: ATENUJAREA CURENTULUI IN STATOR CU ROTORUL IN GOL

NR. CRT.	TIMP	Y	LN(Y)	Y/Y1	YA
1	0.0000	69.0000	4.2341	1.0000	504.9420
2	0.0020	68.2000	4.2224	0.9884	499.0876
3	0.0070	66.2000	4.1927	0.9594	484.4516
4	0.0120	64.0300	4.1594	0.9280	468.5715
5	0.0170	63.3600	4.1488	0.9183	463.6685
6	0.0220	62.6000	4.1368	0.9072	458.1068
7	0.0270	61.5000	4.1190	0.8913	450.0570
8	0.0320	60.8000	4.1076	0.8812	444.9344
9	0.0370	59.7000	4.0893	0.8652	438.8846
10	0.0420	59.0000	4.0775	0.8551	431.7620
11	0.0470	58.1000	4.0622	0.8420	425.1758
12	0.0520	57.4500	4.0509	0.8326	420.4191
13	0.0570	56.8000	4.0395	0.8232	415.6624
14	0.0670	55.5000	4.0164	0.8043	406.1490
15	0.0770	54.3000	3.9945	0.7870	397.3674
16	0.0870	53.0000	3.9703	0.7681	387.8540
17	0.0970	51.8300	3.9480	0.7512	379.2919
18	0.1070	50.7000	3.9259	0.7348	371.0226
19	0.1170	49.6000	3.9040	0.7188	362.9728
20	0.1270	48.4200	3.8799	0.7017	354.3375
21	0.1370	47.3700	3.8580	0.6865	346.6537
22	0.1470	46.2400	3.8338	0.6701	338.3843
23	0.1570	45.2400	3.8120	0.6557	331.0663
24	0.1770	43.3000	3.7632	0.6275	316.8694
25	0.1970	41.2600	3.7199	0.5980	301.9407
26	0.2170	39.4500	3.6750	0.5717	288.6951
27	0.2370	37.7000	3.6297	0.5464	275.8886
28	0.2570	36.0000	3.5835	0.5217	263.4480
29	0.2770	34.5000	3.5410	0.5000	252.4710
30	0.2790	33.0000	3.4965	0.4783	241.4940
31	0.3270	30.9000	3.4308	0.4478	228.1262
32	0.3570	28.8400	3.3618	0.4180	211.0511
33	0.3870	26.9700	3.2947	0.3909	197.3665
34	0.4170	25.0200	3.2197	0.3626	183.0964
35	0.4470	23.4500	3.1549	0.3399	171.6071

CONSTANTA DE ETALONARE A CURENTULUI IN STATOR, CA= 7:31799984

REZISTENTA ECHIVALENTA A CIRCUITULUI IN U.R., RA= 0.00798600



TABEL NR: 42.1

DENUMIRE MOTOR: GEN.TIP GMOSC 440/132-48;14250 KVA

DENUMIRE PROBA: ATENUAREA CURENTULUI IN STATOR CU ROTORUL IN GOL

DESCOMPUNEREA IN COMPONENTE EXPONENTIALIA A CURBEI
DE ATENUARE A CURENTULUI STATORIC

CURBA EXPONENTIALA NR:1						
NR.CRT	NR.ORD	TIMP	Y	LN(Y)	Y/Y1	YA
1	12	0.0520	57.4500	4.0509	0.8326	420.4192
2	13	0.0570	55.8000	4.0395	0.8232	415.6624
3	14	0.0670	55.5000	4.0164	0.8043	406.1490
4	15	0.0770	54.3000	3.9945	0.7870	397.3674
5	16	0.0870	53.0000	3.9703	0.7681	387.8540
6	17	0.0970	51.8000	3.9480	0.7512	379.2919
7	18	0.1070	50.7000	3.9259	0.7348	371.0226
8	19	0.1170	49.6000	3.9040	0.7188	362.9727
9	20	0.1270	48.4200	3.8799	0.7017	354.3375
10	21	0.1370	47.3700	3.8580	0.6865	346.6537
11	22	0.1470	46.2400	3.8338	0.6701	338.3843
12	23	0.1570	45.2400	3.8120	0.6557	331.0663
13	24	0.1770	43.3000	3.7682	0.6275	316.8694
14	25	0.1970	41.2800	3.7199	0.5980	301.9407
15	26	0.2170	39.4500	3.6750	0.5717	288.6951
16	27	0.2370	37.7000	3.6297	0.5464	275.8886
17	28	0.2570	36.0000	3.5835	0.5217	263.4480
18	29	0.2770	34.5000	3.5410	0.5000	252.4710
19	30	0.2790	33.0000	3.4965	0.4783	241.4940
20	31	0.3270	30.9000	3.4308	0.4478	226.1262
21	32	0.3570	28.8400	3.3618	0.4180	211.0511
22	33	0.3870	26.9700	3.2947	0.3909	197.3665
23	34	0.4170	25.0200	3.2197	0.3626	183.0964
24	35	0.4470	23.4500	3.1549	0.3399	171.6071

CURBA EXPONENTIALA ESTE DE FORMA:

$$Y=Y1*EXP(-t/T1)$$

UNDE:

Y1=VALOAREA INITIALA A CURENTULUI CE SE AMORTIZEAZA, IN U.R.

T1=CONSTANTA DE TIMP A ATENUARII CURENTULUI

S-A CALCULAT:

$$Y1= 0.9360$$

$$T1= 138.1161 \text{ U.R.}$$

$$T1= 0.0132 \text{ SEC.}$$

DECI:

$$Y= 0.9360*EXP(-t/ 138.1161)$$

TABEL NR: 42.2

DENUMIRE MOTOR: GEN.TIP GMOSC 440/132-48;14250 KVA

DENUMIRE PROBA: ATENUAREA CURENTULUI IN STATOR CU ROTORUL IN GOL

DESCOMPUNEREA IN COMPONENTE EXPONENTIALE A CURBEI
DE ATENUARE A CURENTULUI STATORIC

CURBA EXPONENTIALA NR:2

NR.CRT	NR.ORD	TIMP	Y	LN(Y)	Y/Y1	YA
1	1	0.0000	4.4184	1.4858	1.0000	32.3338
2	2	0.0020	3.9114	1.3639	0.8852	28.6235
3	3	0.0070	2.6380	0.9700	0.5970	19.3049
4	4	0.0120	1.1865	0.1710	0.2685	8.6824
5	5	0.0170	1.2268	0.2044	0.2777	8.9775
6	6	0.0220	1.1691	0.1562	0.2646	8.5552
7	7	0.0270	0.7634	-0.2700	0.1728	5.5866
8	8	0.0320	0.7499	-0.2878	0.1697	5.4878
9	9	0.0370	0.3286	-1.1128	0.0744	2.4049
10	10	0.0420	0.2997	-1.2050	0.0678	2.1932
11	11	0.0470	0.0632	-2.7617	0.0143	0.4624

CURBA EXPONENTIALA ESTE DE FORMA:

$$Y=Y2*EXP(-t/T2)$$

UNDE:

Y2=VALOAREA INITIALA A CURENTULUI CE SE AMORTIZEAZA, IN U.R.

T2=CONSTANTA DE TIMP A ATENUARII CURENTULUI

S-A CALCULAT:

$$Y2= 0.0648$$

$$T2= 4.2058 \text{ U.R.}$$

$$T2= 0.0047 \text{ SEC.}$$

DECI:

$$Y= 0.0648*EXP(-t/ 4.2058)$$

PENTRU CURBA DE VARIATIE A CURENTULUI STATORIC DUPA AXA D
REZULTA EXPRESIA:

$$Y=Y1*EXP(-t/T1)+Y2*EXP(-t/T2)$$

$$Y= 0.9360*EXP(-t/ 138.1161)+ 0.0648*EXP(-t/ 4.2058)$$

TABEL NR: 43

DENUMIRE MOTOR:GEN.TIP GMOSC 440/132-48;14250 KVA

DENUMIRE PROBA:ATENUAREA CURENTULUI IN ROT.CU STAT.IN GOL

NR.CRT.	TIMP	Y	LN(Y)	Y/Y1	YA
1	0.0000	102.1000	4.6260	1.0000	194.5005
2	0.0200	100.4000	4.6092	0.9833	191.2620
3	0.0400	98.3000	4.5880	0.9628	187.2615
4	0.0600	96.7000	4.5737	0.9491	184.5945
5	0.0800	95.4000	4.5581	0.9344	181.7370
6	0.1000	93.8000	4.5412	0.9187	178.6890
7	0.1200	92.3000	4.5250	0.9040	175.8315
8	0.1400	90.8700	4.5094	0.8900	173.1073
9	0.2100	86.5000	4.4601	0.8472	164.7825
10	0.2600	83.7000	4.4272	0.8198	159.4485
11	0.3100	81.0000	4.3944	0.7933	154.3050
12	0.3600	78.8000	4.3669	0.7718	150.1140
13	0.4600	70.0000	4.2485	0.6856	133.3500
14	0.6100	68.0000	4.2195	0.6660	129.5400
15	0.8600	66.2000	4.1927	0.6484	126.1110
16	0.7100	64.8000	4.1713	0.6347	123.4440
17	0.7600	63.0000	4.1431	0.6170	120.0150
18	0.8100	61.5000	4.1190	0.6024	117.1575
19	0.8600	60.0000	4.0943	0.5877	114.3000
20	0.9100	58.5000	4.0690	0.5730	111.4425
21	0.9600	57.0000	4.0431	0.5583	108.5850
22	1.0100	55.5000	4.0164	0.5436	105.7275
23	1.0600	54.2000	3.9927	0.5309	103.2510
24	1.2600	49.0000	3.8918	0.4799	93.3450
25	1.4600	44.9000	3.8044	0.4398	85.5345
26	1.6600	40.8000	3.7087	0.3996	77.7240
27	1.8600	37.0000	3.6109	0.3624	70.4850
28	2.0600	34.0000	3.5264	0.3330	64.7700
29	2.2600	31.0000	3.4340	0.3036	59.0550
30	2.6600	25.9000	3.2542	0.2537	49.3395

CONSTANTA DE ETALONARE A CURENTULUI IN STATOR,CA= 1.90499997

REZISTENTA ECHIVALENTA A CIRCUITULUI IN U.R.,RA= 0.21980000

TABEL NR: 43.1

DENUMIRE MOTOR:GEN.TIP GMOSC 440/132-48;14250 KVA

DENUMIRE PROBA:ATENUAREA CURENTULUI IN ROT.CU STAT.IN GOL

DESCOMPUNEREA IN COMPONENTE EXPONENTIALA A CURBEI
DE ATENUARE A CURENTULUI ROTORIC

CURBA EXPONENTIALA NR:1						
NR.CRT	NR.ORD	TIMP	Y	LN(Y)	Y/Y1	YA
1	13	0.4600	70.0000	4.2485	0.6856	133.3500
2	14	0.6100	68.0000	4.2195	0.6660	129.5400
3	15	0.6600	66.2000	4.1927	0.6484	126.1110
4	16	0.7100	64.8000	4.1713	0.6347	123.4440
5	17	0.7600	63.0000	4.1431	0.6170	120.0150
6	18	0.8100	61.5000	4.1190	0.6024	117.1575
7	19	0.8600	60.0000	4.0943	0.5877	114.3000
8	20	0.9100	58.5000	4.0690	0.5730	111.4425
9	21	0.9600	57.0000	4.0431	0.5583	108.5850
10	22	1.0100	55.5000	4.0164	0.5436	105.7275
11	23	1.0600	54.2000	3.9927	0.5309	103.2510
12	24	1.2600	49.0000	3.8918	0.4799	93.3450
13	25	1.4600	44.9000	3.8044	0.4398	85.5345
14	26	1.6600	40.8000	3.7087	0.3996	77.7240
15	27	1.8600	37.0000	3.6109	0.3624	70.4850
16	28	2.0600	34.0000	3.5264	0.3330	64.7700
17	29	2.2600	31.0000	3.4340	0.3036	59.0550
18	30	2.6600	25.9000	3.2542	0.2537	49.3395

CURBA EXPONENTIALA ESTE DE FORMA:

$$Y=Y1*EXP(-t/T1)$$

UNDE:

Y1=VALOAREA INITIALA A CURENTULUI CE SE AMORTIZEAZA,IN U.R.

T1=CONSTANTA DE TIMP A ATENUARII CURENTULUI

S-A CALCULAT:

$$Y1= 0.8778$$

$$T1= 666.9916 \text{ U.R.}$$

$$T1= 0.0142 \text{ SEC.}$$

DECI:

$$Y= 0.8778*EXP(-t/ 666.9916)$$

TABEL NR: 43.2

DENUMIRE MUTOR: GEN.TIP GMOSC 440/132-48;14250 KVA

DENUMIRE PROBA: ATENUAREA CURENTULUI IN ROT.CU STAT.IN GOL

DESCOMPUNEREA IN COMPONENTE EXPONENTIALE A CURBEI
DE ATENUARE A CURENTULUI ROTORIC

CURBA EXPONENTIALA NR:2

NR.CRT	NR.ORD	TIMP	Y	LN(Y)	Y/Y1	YA
1	1	0.0000	12.4787	2.5240	1.0000	23.7720
2	2	0.0200	2.4526	0.8972	0.1965	4.6722
3	3	0.0400	2.3370	0.8489	0.1873	4.4521
4	4	0.0600	2.2798	0.8241	0.1827	4.3430
5	5	0.0800	2.2073	0.7918	0.1769	4.2049
6	6	0.1000	2.1163	0.7497	0.1696	4.0315
7	7	0.1200	2.0283	0.7072	0.1625	3.8640
8	8	0.1400	1.9409	0.6632	0.1555	3.6974
9	9	0.2100	1.6705	0.5131	0.1339	3.1824
10	10	0.2600	4.4036	1.4824	0.3529	6.3889
11	11	0.3100	3.5484	1.2665	0.2844	6.7596
12	12	0.3600	3.1502	1.1475	0.2524	6.0011

CURBA EXPONENTIALA ESTE DE FORMA:

$$Y=Y2*EXP(-t/T2)$$

UNDE:

Y2=VALOAREA INITIALA A CURENTULUI CE SE AMORTIZEAZA, IN U.R.

T2=CONSTANTA DE TIMP A ATENUARII CURENTULUI

S-A CALCULAT:

$$Y2= 0.1218$$

$$T2= 77.1181 \text{ U.R.}$$

$$T2= 0.0080 \text{ SEC.}$$

DECI:

$$Y= 0.1218*EXP(-t/ 77.1181)$$

PENTRU CURBA DE VARIATIE A CURENTULUI ROTORIC DUPA AXA D
REZULTA EXPRESIA:

$$Y=Y1*EXP(-t/T1)+Y2*EXP(-t/T2)$$

$$Y= 0.8778*EXP(-t/ 666.9916)+ 0.1218*EXP(-t/ 77.1181)$$

DENUMIRE MOTOR: GEN. TIP GMSO 440/132-48;14250 KVA

DENUMIRE PROBA: STINGEREA CIMPULUI IN STATOR CU ROT. IN SCURT.

NR. CRT.	TIMP	Y	LN(Y)	Y/Y1	YA
1	0.0000	92.5000	4.6002	1.0000	413.2200
2	0.0033	97.0000	4.5747	0.9749	403.5200
3	0.0067	94.8000	4.5518	0.9528	394.3680
4	0.0100	92.8000	4.5304	0.9327	386.0480
5	0.0133	90.9000	4.5098	0.9136	378.1440
6	0.0167	88.9000	4.4875	0.8935	369.8240
7	0.0200	86.3000	4.4578	0.8673	359.0080
8	0.0233	85.0000	4.4427	0.8543	353.6000
9	0.0267	83.3000	4.4224	0.8372	346.5280
10	0.0300	81.1000	4.3957	0.8151	337.3760
11	0.0350	79.0000	4.3694	0.7940	328.6400
12	0.0400	76.4000	4.3360	0.7678	317.8240
13	0.0450	74.0000	4.3041	0.7437	307.8400
14	0.0500	72.2000	4.2794	0.7256	300.3520
15	0.0550	70.1000	4.2499	0.7045	291.6160
16	0.0600	68.5000	4.2268	0.6884	284.9600
17	0.0650	66.1000	4.1912	0.6643	274.9760
18	0.0700	64.4000	4.1651	0.6472	267.9040
19	0.0750	62.5000	4.1352	0.6281	260.0000
20	0.0800	60.7000	4.1059	0.6101	252.5120
21	0.1100	51.4000	3.9396	0.5166	213.8240
22	0.1400	43.9000	3.7819	0.4412	182.6240
23	0.1700	37.4000	3.6217	0.3759	155.5840
24	0.2000	32.2000	3.4720	0.3236	133.9520
25	0.2300	28.0000	3.3322	0.2814	116.4800
26	0.2600	24.1000	3.1822	0.2422	100.2560
27	0.2900	21.2000	3.0540	0.2131	88.1920
28	0.3200	18.8000	2.9339	0.1889	78.2080
29	0.4200	13.7000	2.6174	0.1377	56.9920
30	0.5200	10.2000	2.3224	0.1025	42.4320
31	0.6200	8.5000	2.1401	0.0854	35.3600
32	0.7200	7.2000	1.9741	0.0724	29.9520
33	0.8200	6.5000	1.8718	0.0653	27.0460
34	1.0200	5.9000	1.7750	0.0593	24.5440
35	1.2200	5.4000	1.6864	0.0543	22.4640
36	1.4200	4.9000	1.5892	0.0492	20.3840
37	1.6200	4.6000	1.5261	0.0462	19.1360
38	1.8200	4.3000	1.4586	0.0432	17.8880
39	2.0200	3.9000	1.3610	0.0392	16.2240
40	2.2200	3.6000	1.2809	0.0362	14.9760
41	2.4200	3.3000	1.1939	0.0332	13.7280
42	2.6200	3.1000	1.1314	0.0312	12.8960
43	2.8200	2.8000	1.0296	0.0281	11.6480
44	3.0200	2.6000	0.9555	0.0261	10.8160
45	3.2200	2.4500	0.8961	0.0246	10.1920
46	3.4200	2.3000	0.8329	0.0231	9.5680
47	3.6200	2.1000	0.7419	0.0211	8.7360
48	3.8200	1.9000	0.6419	0.0191	7.9040

CONSTANTA DE ETALONARE A CURENTULUI IN STATOR, CA= 4.15999985

REZISTENTA ECHIVALENTA A CIRCUITULUI IN U.R., RA= 0.00886900

TABEL NR: 44.1

DENUMIRE MOTOR:GEN.TIP GMSC 440/132-48;14250 KVA

DENUMIRE PROBA:STINGEREA CIMFULUI IN STATOR CU ROT.IN SCURT.

DESCOMPUNEREA IN COMPONENTE EXPONENTIALA A CURBEI
DE ATENUARE A CURENTULUI STATORIC

CURBA EXPONENTIALA NR:1

NR.CRT	NR.ORD	TIMP	Y	LN(Y)	Y/Y1	YA
1	36	1.4200	4.9000	1.5892	0.0492	20.3840
2	37	1.8200	4.6000	1.5281	0.0462	19.1360
3	38	1.8200	4.3000	1.4586	0.0432	17.8880
4	39	2.0200	3.9000	1.3610	0.0392	16.2240
5	40	2.2200	3.6000	1.2809	0.0362	14.9760
6	41	2.4200	3.3000	1.1939	0.0332	13.7280
7	42	2.6200	3.1000	1.1314	0.0312	12.8960
8	43	2.8200	2.8000	1.0296	0.0281	11.6480
9	44	3.0200	2.6000	0.9555	0.0261	10.8160
10	45	3.2200	2.4500	0.8961	0.0246	10.1920
11	46	3.4200	2.3000	0.8329	0.0231	9.5680
12	47	3.6200	2.1000	0.7419	0.0211	8.7360
13	48	3.8200	1.9000	0.6419	0.0191	7.9040

CURBA EXPONENTIALA ESTE DE FORMA:

$$Y=Y1*EXP(-t/T1)$$

UNDE:

Y1=VALOAREA INITIALA A CURENTULUI CE SE AMORTIZEAZA, IN U.R.

T1=CONSTANTA DE TIMP A ATENUARII CURENTULUI

S-A CALCULAT:

$$Y1= 0.0871$$

$$T1= 796.2572 \text{ U.R.}$$

$$T1= 0.0068 \text{ SEC.}$$

DECI:

$$Y= 0.0871*EXP(-t/ 796.2572)$$

CONSTANTA DE ETALONARE A CURENTULUI IN STATOR,CA= 4.15999985

REZISTENTA ECHIVALENTA A CIRCUITULUI IN U.R.,RA= 0.00886900

TABEL NR: 44.2

 DENUMIRE MOTOR: GEN.TIP GMSC 440/132-48;14250 KVA

DENUMIRE PROBA: STINGEREA CIMPULUI IN STATOR CU ROT. IN SCURTC.

DESCOMPUNEREA IN COMPONENTE EXPONENTIALA A CURBEI
 DE ATENUARE A CURENTULUI STATORIC

CURBA EXPONENTIALA NR:2						
NR.CRT	NR.ORD	TIMP	Y	LN(Y)	Y/Y1	YA
1	4	0.0100	84.1659	4.4328	0.8459	350.1299
2	5	0.0133	82.2771	4.4101	0.8269	342.2726
3	6	0.0167	80.2886	4.3856	0.8069	334.0007
4	7	0.0200	77.6998	4.3529	0.7809	323.2312
5	8	0.0233	76.4110	4.3361	0.7679	317.8698
6	9	0.0267	74.7225	4.3138	0.7510	310.8457
7	10	0.0300	72.5337	4.2841	0.7290	301.7401
8	11	0.0350	70.4505	4.2549	0.7080	293.0742
9	12	0.0400	67.8674	4.2176	0.6821	282.3284
10	13	0.0450	65.4842	4.1818	0.6581	272.4143
11	14	0.0500	63.7010	4.1542	0.6402	264.9961
12	15	0.0550	61.6177	4.1209	0.6193	256.3297
13	16	0.0600	60.0344	4.0949	0.6034	249.7432
14	17	0.0650	57.6511	4.0544	0.5794	239.8286
15	18	0.0700	55.9678	4.0248	0.5625	232.8259
16	19	0.0750	54.0844	3.9905	0.5436	224.9909
17	20	0.0800	52.3009	3.9570	0.5256	217.5719
18	21	0.1100	43.0997	3.7635	0.4332	179.2948
19	22	0.1400	35.6973	3.5751	0.3588	148.5009
20	23	0.1700	29.2938	3.3774	0.2944	121.8622
21	24	0.2000	24.1891	3.1859	0.2431	100.6268
22	25	0.2300	20.0833	2.9999	0.2018	83.5467
23	26	0.2600	16.2765	2.7897	0.1636	67.7100
24	27	0.2900	13.4685	2.6004	0.1354	56.0288
25	28	0.3200	11.1594	2.4123	0.1122	46.4231
26	29	0.4200	6.3548	1.8492	0.0639	26.4361
27	30	0.5200	3.1388	1.1439	0.0315	13.0576
28	31	0.6200	1.7119	0.5376	0.0172	7.1214
29	32	0.7200	0.6744	-0.3940	0.0068	2.8053
30	33	0.8200	0.2267	-1.4842	0.0023	0.9430
31	34	1.0200	0.1024	-2.2784	0.0010	0.4262
32	35	1.2200	0.0421	-3.1671	0.0004	0.1752

CURBA EXPONENTIALA ESTE DE FORMA:

$$Y=Y2*EXP(-t/T2)$$

UNDE:

Y2=VALOAREA INITIALA A CURENTULUI CE SE AMORTIZEAZA, IN U.R.

T2=CONSTANTA DE TIMP A ATENUARII CURENTULUI

S-A CALCULAT:

$$Y2= 0.8923$$

$$T2= 47.7727 \text{ U.R.}$$

$$T2= 0.0142 \text{ SEC.}$$

DECI:

$$Y= 0.8923*EXP(-t/ 47.7727)$$

CONSTANTA DE ETALONARE A CURENTULUI IN STATOR, CA= 4.15999985

REZISTENTA ECHIVALENTA A CIRCUITULUI IN U.R., RA= 0.00886900

TABEL NR: 44.3

DENUMIRE MOTOR: GEN. TIP GMOSC 440/132-48; 14250 KVA

DENUMIRE PROBA: STINGEREA CIMPULUI IN STATOR CU ROT. IN SCURT.

DESCOMPUNEREA IN COMPONENTE EXPONENTIALE A CURBEI DE ATENUARE A CURENTULUI STATORIC

NR. CRT	NR. ORD	CURBA EXPONENTIALA NR: 3				
		TIMP	Y	LN(Y)	Y/Y1	YA
1	1	0.0000	2.0517	0.7187	1.0000	8.5350
2	2	0.0033	1.4679	0.3838	0.7154	6.1063
3	3	0.0067	1.1994	0.1818	0.5846	4.9894

CURBA EXPONENTIALA ESTE DE FORMA:

$$Y = Y_3 * \exp(-t/T_3)$$

UNDE:

Y₃ = VALOAREA INITIALA A CURENTULUI CE SE AMORTIZEAZA, IN U.R.

T₃ = CONSTANTA DE TIMP A ATENUARII CURENTULUI

S-A CALCULAT:

$$Y_3 = 0.0201$$

$$T_3 = 3.9239 \text{ U.R.}$$

$$T_3 = 0.0022 \text{ SEC.}$$

DECI:

$$Y = 0.0201 * \exp(-t / 3.9239)$$

PENTRU CURBA DE VARIATIE A CURENTULUI STATORIC DUPA AXA D
REZULTA EXPRESIA:

$$Y = Y_1 * \exp(-t/T_1) + Y_2 * \exp(-t/T_2) + Y_3 * \exp(-t/T_3)$$

$$Y = 0.0871 * \exp(-t / 796.2572) + 0.8923 * \exp(-t / 47.7727) + 0.0201 * \exp(-t / 3.9239)$$



GEN.TIP GMOSC 440/132-48;14250 KVA

DETERMINAREA UNOR PARAMETRI CE REZULTA DIN PROBELE DE STINGERE A CIMPULUI

1.PARAMETRII DUPA AXA TRANSVERSALA

Din proba de stingere a cimpului dupa axa q rezulta:

$Iq1 = 0.8971ur$ $Tq1 = 99.0966ur$

$Iq2 = 0.10151ur$ $Tq2 = 5.5655ur$

$Ra = 0.00886900$

1.1 Constanta de timp $T0$ a infasurarii de amortizare dupa axa q:

$T0 = Tq1 + Tq2 - Iq1 * Tq1 - Iq2 * Tq2$

Rezulta:

$T0 = 15.1985$

1.2 Coeficientul de dispersie al infasurarii de amortizare $D010$:

$D010 = Tq1 * Tq2 / (T0 * (Iq1 * Tq1 + Iq2 * Tq2))$

Rezulta:

$D010 = 0.40562$

1.3 Reactanta sincrona dupa axa transversala $X01$:

$X01 = (Iq1 * Tq1 + Iq2 * Tq2) * Ra$

Rezulta:

$X01 = 0.79345$

1.4 Reactanta supratranzitorie $X0''$ dupa axa q:

$X0'' = D010 * X01$

Rezulta:

$X0'' = 0.32184$

2. PARAMETRII DUPA AXA d

Din probe de stingere a cimpului in stator cu rotorul in gol rezulta:

$I_{d10} = 0.93597ur$ $T_{d10} = 138.1161ur$
 $I_{d20} = 0.08477ur$ $T_{d20} = 4.2058ur$
 $R_a = 0.00798600$

2.1 Constanta de timp a infasurarii de amortizare dupa axa longitudinala:

$TD = T_{d10} + T_{d20} - I_{d10} * T_{d10} - I_{d20} * T_{d20}$

Rezulta:

$TD = 12.7776$

2.2 Coeficientul de dispersie a infasurarii de amortizare dupa axa longitd:

$TD1 = T_{d10} * T_{d20} / (I_{d10} * T_{d10} + I_{d20} * T_{d20})$

Rezulta:

$TD1 = 0.35093$

2.3 Reactanta sincrona longitudinala:

$X1D = (I_{d10} * T_{d10} + I_{d20} * T_{d20}) R_a$

Rezulta:

$X1D = 1.03454$

Din proba de stingere a curentului in rotor cu statorul in gol rezulta:

$IF1 = 0.87778ur$ $TF1 = 666.9916ur$
 $IF2 = 0.12175ur$ $TF2 = 77.1181ur$
 $R_a = 0.21980000$

2.4 Coeficientul de dispersie al infasurarii de excitatie fata de infasurarea de amortizare:

$DFD = TF1 * TF2 / [(TF1 + TF2 - IF1 * TF1 - IF2 * TF2) (IF1 * TF1 + IF2 * TF2)]$

Rezulta:

$DFD = 0.57936$

Din proba de stingere in stator cu rotorul in scurt rezulta:

$I_{d1} = 0.08712ur$ $T_{d1} = 796.2572ur$
 $I_{d2} = 0.89226ur$ $T_{d2} = 47.7727ur$
 $I_{d3} = 0.02013ur$ $T_{d3} = 3.9239ur$
 $R_a = 0.00886900$

2.5 Constanta de timp a infasurarii de excitatie TF:

$TF = T_{d1} + T_{d2} + T_{d3} - I_{d1} * T_{d1} - I_{d2} * T_{d2} - I_{d3} * T_{d3} - TD$

Rezulta:

$TF = 723.1029$

2.6 Coeficientul de dispersie DD1F:

$DD1F = [T_{d1} * T_{d2} (1 - I_{d3}) + T_{d2} * T_{d3} (1 - I_{d1}) + T_{d1} * T_{d3} (1 - I_{d2})] / [(I_{d1} * T_{d1} + I_{d2} * T_{d2} + I_{d3} * T_{d3}) DFD] - TD1 * TD / DFD$

Rezulta:

$DD1F = 0.46000$

2.7 Coeficientul de dispersie global DD1FD:

$DD1FD = T_{d1} * T_{d2} * T_{d3} / [TF * TD (I_{d1} * T_{d1} + I_{d2} * T_{d2} + I_{d3} * T_{d3})]$

Rezulta:

$DD1FD = 0.14414$

2.8 Reactanta tranzitorie dupa axa longitudinala X'1D:

$X'1D = (TF * DD1F + TD * TD1) X1D / (TF + TD)$

Rezulta:

$X'1D = 0.47589$

2.9 Reactanta supratranzitorie dupa axa longitudinala X''1D

$X''1D = X'1D * DD1FD / (DD1F * DFD)$

Rezulta:

$X''1D = 0.25739$

GEN.TIP GMOSC 440/132-49;14250 KVA

DETERMINAREA CARACTERISTICILOR DE PORNIRE IN REGIM ASINCRON PE BAZA
PARAMETRILOR OBTINUTI DIN PROBELE DE STINGERE A CIMPULUI

1. Caracteristica curentului de pornire in regim asincron.
se utilizeaza relatiile:

$$I_d = I_0 d / j X_d$$

$$I_q = I_0 d / j X_q$$

CURBA CURENTULUI FUNCTIE DE ALUNECARE LA PORNIREA IN ASINCRON:

S	I _D	I _Q	I
1.00	-3.78016	-2.42780	4.49264
0.90	-3.75730	-2.41927	4.46880
0.80	-3.72637	-2.40750	4.43643
0.70	-3.68327	-2.39069	4.39112
0.60	-3.62117	-2.36556	4.32536
0.50	-3.52827	-2.32583	4.22589
0.40	-3.38395	-2.25842	4.06836
0.30	-3.15396	-2.13387	3.80800
0.20	-2.79741	-1.83392	3.37263
0.10	-2.34703	-1.40355	2.73468
0.00	-0.96661	-1.00000	1.39081

2. Caracteristica cuplului de pornire in asincron cu rotorul in gol:

$$M_a = 2 * M''_{qmax} / (S''_q / S + S / S''_q) + 2 * M''_{d0max} / (S''_{d0} / S + S / S''_{d0})$$

$$M''_{qmax} = Un * Un / 4 * (1 / XQ'' - 1 / XQ1)$$

$$M''_{qmax} = 0.46171$$

$$M''_{d0max} = Un * Un / 4 * (1 / X''_{1D} - 1 / X_{1D})$$

$$M''_{d0max} = 0.16221$$

$$S''_{d0} = 1 / (T_D * T_{D1})$$

$$S''_{d0} = 0.44695$$

$$S''_q = 1 / (T_Q * T_{Q1})$$

$$S''_q = 0.22301$$

GEN.TIP GMOSC 440/132-48;14250 KVA

CURBA CUPLULUI REZULTANT

S	M0''	M00''	MA
1.00	0.14595	0.18991	0.33585
0.90	0.16119	0.20869	0.36988
0.80	0.17984	0.23122	0.41106
0.70	0.20308	0.25854	0.46162
0.60	0.23264	0.29192	0.52456
0.50	0.27105	0.33255	0.60359
0.40	0.32158	0.38020	0.70178
0.30	0.38634	0.42799	0.81433
0.20	0.45176	0.44431	0.89608
0.10	0.41250	0.33373	0.74623
0.00	0.00000	0.00000	0.00001

Din curba rezulta:

ALUNECAREA CRITICA,SK= 0.18964
CUPLUL MAXIM Cpmax= 0.89727

3. Caracteristica cuplului de pornire in asincron cu rotorul in scurt
 $Ma=2M''q_{max}/(S''q/S+S/S''q)+2M''d_{max}/(S''d/S+S/S''d)+2M'd_{max}/(S+S/S''d)$

$M''q_{max}= 0.46171$
 $M''d_{max}=Un*Un/4*(1/X''1D-1/X'1D)$
 $M'd_{max}= 0.16221$
 $M'd_{max}=Un*Un/4*(1/X'1D-1/X1D)$
 $M'd_{max}= 0.44595$
 $S''q= 0.25015$
 $S''d=TD1/(TF*DD1F)+DD1F/(TD*DD1F)-1/(TF*DD1F+TD*TD1)$
 $S'd= 0.28348$
 $S'd=1/(TF*DD1F+TD*TD1)$
 $S'd= 0.00297$

BIBLIOGRAFIE

1. ASKA OVICI, B.N., Metod apredelenia parametrov sinhronnih mašin na A.V.M.
2. ATKINS, D., Obsiaia teoria electriceskikh mašin S.S.S.R., Moskva, 1960.
3. ANDRIEV, V.S., Isledovanie na A.V.M. neravnovesnykh stacionarnykh rezhimov raboty sinhronnogo gneratoro, Electrotehnika, nr.12-1977.
4. ALEAȘIU, GHE., Transformări de variabile în teoria mașinilor electrice, Conferința Națională de Electrotehnică și Energetică, 1983.
5. BALA, C., Mașini Electrice, E.D.P. București, 1979.
6. BATALOV, I.N., BEȘCIASINOV, G.A., IUDOV, M.I., Pusk mașinogo sinhronnogo gneratoro v regime dvigatel'ia., Electrotehnika, nr.8-1965.
7. BOLDIA, I., Analiza unitară a mașinilor electrice, Editura academiiei RSR, 1983.
8. BIRIBESCU, M., Determinarea unor parametri electromagnetici și caracteristici ale câmpului magnetic din întrefier la mașini sincrone de putere mare, teză de doctorat, 1983.
9. CIORAN, I., K rascetu perehodnykh protessov v dempfernykh konturnykh electriceskikh mašin Elektricitstvo, nr.6-1973.
10. CIOC, I., BOROS, I., CRISTEA, N., SICHIR, N., Mașini Electrice. Indrumar de proiectare, vol. I, II, III, Craiova, Editura Scrisul Românesc, 1976.
11. CIMPEANU, A., Mașini Electrice, Craiova, Ed. Scrisul Românesc, 1977.
12. CONCORDIA, C., Sinhronnye mașini. Perehodnye regimi Gosenergoizdat, 1969.

13. DANCEA, I., Programarea calculatoarelor numerice, Editura Dacia-Cluj, 1973.
14. DANILEVICI, I. B., DOMBROVSKI, V. V., KAZOVSKI, E. Ia., Parametri electriceskih mašin peremennogo toka, Nauka-Moskva-Leningrad, 1965.
15. DORDEA, T., Mașini Electrice, E.P.P. București, 1970.
16. DORDEA, T., Asupra ecuațiilor mașinilor electrice de curent alternativ, Studii și Cercetări de Energetică și Electrotehnică, Tom XVI nr.1, p.17-32.
17. DORDEA, T., BIRNIESCU, E., LIUBA, GH., VOIA, V., Cercetări experimentale în domeniul încercării și determinării unor parametri funcționali ai mașinilor sincrone și asincrone din profilul I.C.M. Reșița, Contract de cercetare nr.124/1981, I.P.T.V. Timișoara-I.C.M. Reșița.
18. DORDEA, T., BIRNIESCU, E., SORA, I., LIUBA, GH., Cercetări experimentale privind determinarea unor parametri la mașinile sincrone și asincrone de medii și mare putere din profilul I.C.M. Reșița, Contract de cercetare nr.22/1982, I.P.T.V. Timișoara-I.C.M. Reșița.
19. DORDEA, T., Asupra câmpului electromagnetic al mașinilor electrice., Studii și cercetări de Energetică și Electrotehnică, Tom. XVIII, nr.1, p.131-146.
20. DORDEA, T., Beitrag zur Zweiachsentheorie der elektrischen Maschinen, : "Archiv für Elektrotechnik", 50 Bd. 6 Heft, 1960.
21. DMITRIEV, V. M., IVANOV-SMOLENSKI A. V., Rasčiot tokov v dempfernoi obmotke sinhronnoi iavropoluisnoi mașini s ucetom dvukstroennoi zubčiatosfi i mașiscenia. Elektricesstvo, nr.4, 1981.
22. DRAGANESCU, O. GH., Încercările mașinilor electrice rotative, E. I. București, 1987.
23. DRAGANESCU, O. GH., GALBINU, GH. D., Cercetări experimentale asupra comportării diverselor variante constructive de mașini sincrone și asincrone în preloada pornirii. București, I. P. T. - 1965.

24. DRAGANESCU, O. GH., GALBENU, GH., CIMPIANU A., Cercetări experimentale asupra caracteristicii de pornire a mașinilor electrice sincrone și asincrone., Electrotehnica, nr. 8-1964, București.
25. DRAGANESCU, O. GH., GALBENU, GH., Cercetări experimentale asupra caracteristicilor de pornire a mașinilor sincrone. Comunicări tehnice-Electroputere, 1964.
26. DRAGANESCU, O. GH., CIMPIANU, A., GALBENU, GH., Cercetări experimentale asupra caracteristicii de pornire a mașinilor sincrone. Comunicări tehnice Electroputere Craiova, 1963.
27. DRAGANESCU, O. GH., metode pentru determinarea impedanței homopolare la mașinile sincrone, Electrotehnică, Electronică, Automatică, nr. 7-1976.
28. FRANȘIA, AL., MAGUREANU, R., CIMPEANU, A., CONDROU, M., TOCACI, M., Mașini și sisteme de acționări electrice, Probleme fundamentale, Editura tehnică București, 1978.
29. FRANȘIA, AL., Mașini și acționări electrice, E.D.P. București, 1967.
30. FRANȘIA, AL., MAGUREANU, R., mașini și acționări electrice. Culegere de probleme, București, 1977.
31. GHEORGHIU, I. S., FRANȘIA, AL., Tratat de mașini electrice, vol. I.-II, Editura Academiei RSR, 1970.
32. GHEORGHIU, I. S., Mașini electrice. Probleme și aplicații industriale, vol. I-II, Ed. Tehnică București, 1966.
33. MARRIS, M. R., LAWERSON, P. I., STEPHENSON, I. M., Sisteme otrositennih edinit v teorii elektriceskih mašin. Perevod s angl. Energia Moskva, 1975.
34. JERVE, G. K., Incercările mașinilor electrice rotative, Traducere din limba rusă, Editura Tehnică, București, 1972.
35. KANTER, V. K., Horakteristiki i parametrf iavnopoluisnih sinhronnih mašin s mașisenia magnitoprovodin, Elektricesstvo, nr. 8-1979.

36. KAZAVSKI, E. Ia., KOSILKO, M. P., *Sovremennoe metod' rasnotrenia perehodnykh protesov v elektriceskikh mashinakh peremennogo toka*, *Izvestia akademii i avtomatika* nr. 4, 1959.
37. KAZAVSKI, E. Ia., NASIKOV, V. A., *Perehodnye protesi pri otklucenii kratkovremennykh korotkikh zamkaniy sinhronnykh mashin*, *Izv. A. N. S. S. S. R. Energetika* nr. 5, 1972.
38. KAZAVSKI, E. Ia., *Perehodnye protesi elektriceskikh mashin peremennogo toka*, A. N. S. S. S. R. Moskva-Leningrad, 1962.
39. KAZAVSKI, E. Ia., *Opredelenie perehodnykh protessov v mashinakh peremennogo toka s pomogciyu chastotnykh harakteristik* *Elektricesstvo* nr. 4-1960.
40. KAZAVSKI, E. Ia., KOZOLIN, G. G., *Experimentalnye opredelenie chastotnykh harakteristik turbogeneratorov*, *Elektricesstvo*, nr. 12-1962.
41. KAZAVSKI, E. Ia., BERNER, L. S., SIDELNIKOV, A. V., *Sintez shem zamescenia mashin peremennogo toka po perehodnym protessam i chastotnym harakteristicam*, *Elektrotehnika*, nr. 5-1979.
42. KAZAVSKI, E. Ia., BERNER, L. S., SIDELNIKOV, A. V., *K voprosu o sinteze shem zamescenia elektriceskikh mashin peremennogo toka po perehodnym protessam i chastotnym harakteristicam*, *Elektrotehnika*, nr. 7-1980.
43. KARPOV, G. V., *Metod experimentalnogo issledovaniya sinhronnoe magnit v dvuh osiah* *Elektricesstvo*, nr. 9-1970.
44. KIMBARK, E., *Sinhronnye magnity i ustoychivosti elektriceskikh sistem*. G. E. I. Moskva, 1960.
45. KIRKIN, B. I., *Experimentalnoe opredelenie chastotnykh harakteristik asinhronnykh dvigatelei*. *Elektricesstvo*, nr. 1-1963.
46. KOSTINKO, M. P., KAZOVSKI, E. Ia., DANILEVICI, Ia., *Experimentalnoe issledovanie novykh metodov opredeleniya parametrov mashin peremennogo toka*. *Elektricesstvo*, nr. 6-1960.
47. KOSTINKO, M. P., PIGUROVSKI, L. M., *Elektriceskie magnity*, Gosenergoizdat Moskva, 1962.
48. KOSTINKO, M. P., PIGUROVSKI, L. M., *Elektriceskie magnity*, *Energhia*, 1973.

49. KOSIENKO, A.P., SIBULOV, I.S., KAZOVSKI, E. Ia., (opredelenie ciastotnaia metodom preskovih harakteristik sinhronnih dvigatelei., Izv.A.N., SSSR nr.1, 1962.
50. KOSIENKO, A.P., KAZOVSKI, E. Ia., SIBULOV, I., Eksperimentalnoe issledovanie parametrov sinhronnoi mashini novimi metodami Izv.A.N.SSSR, OIN Energetika i avtomatika, nr.4-1960.
51. KOSIENKO A.P., KAZOVSKI, E. Ia., Metodika opredelenia ciastot i harakteristik mashin peremennogo toka. Elektrichestvo nr.12-1962.
52. KOVACS, K. I., Analiza regimurilor tranzitorii ale masinilor electrice, Traducere din limba maghiara, I.T. Bucuresti 1980.
53. LAIBIS, TH., Teoria sinhronnoi mashini pri perehodnih protsekh. G.E.I. Moskva, 1957.
54. LEVNER, L.G., SIDELNIKOV, A.V., Sintez shem zamescenia dlia rasceta perehodnih i ustanovivaiakaa protessov sinhronnih i asinhronnih mashin. Elektrotehnika, nr.9-1975.
55. LEVNER, L.G., SIDELNIKOV, A.V., Postroenie shem zamescenia elektricheskikh mashin po zadanniu ciastotnaia harakteristika, Elektrotehnika, nr.11-1974.
56. LIUBA, GH., BIRIYESCU, I., GIANDO, I., Analiza cimfului magnetic util la generatoarele de mare putere cu ajutorul filtrelor de spatiu, Buletinul stiintific si tehnic al I.E.T.v. Timisoara, Tom 24 fascicula 2-1979.
57. LIUBA G., BIRIYESCU, I., Experimental identification of "d" axis reactances of synchronous machines. International conference on electrical machines and drive systems. INCOMAD'S 86, Mforie Nord-Romania 16-17 sept. 1986.
58. LIUBA GH., BIRIYESCU, I., Determinarea experimentală a reactanțelor transversale la mașini sincrone cu prelucrarea numerică la înregistrării, comparație cu metoda grafică., Sesiune de comunicări științifice, Electromotor Timișoara, 1986.
59. LIUBA, GH., BIRIYESCU, I., CRUZA, V., Aparat pentru determinarea reactanțelor longitudinale și transversale ale mașinilor electrice sincrone. Brevet OSIA nr.97323-89.

60. LIUBA, G.H., BĂRILESCU, M., Asupra încercării în sarcină a mașinilor asincrone, eficiența în proiectarea, fabricarea și exploatarea mașinilor electrice, Sesiunea de comunicări științifice, Electromotor Timișoara, 1988.
61. LIUBA, G.H., BĂRILESCU, M., Încercarea la încălzire a mașinilor asincrone de mare putere pe un stand de probă industrial prin metoda celor două frecvențe. Conferința națională de electrotehnică și electroenergetică, Craiova, 20-21 sept. 1984.
62. МАВКОНЕАНТ Л.Г., СУВАЛОВ, С.А., Асинхронии режим, несинхронное включение и ресинхронизация генераторов Куибисевской, Электричество, nr. 111957.
63. МАВКОНЕАНТ, Л.Г., Ток и моменты асинхронных и синхронных машин при изменении скорости их вращения, Электричество, nr. 6-1956.
64. МАВКОНЕАНТ, Л.Г., О переходных процессах в синхронных машинах с усложненными контурами на статорах. Электричество, nr. 7-1954.
65. МАТИНОВ, А.Н., Уточнение метода расчета характеристик холостого хода исправленных синхронных машин. Электричество, nr. 1-1964.
66. МАЛАКЧЕ, М., Paramètres de régime transitoire de la machine synchrone. Definition et methodes de determination. Rev. Sci. techn. 1976-23 nr. 3.
67. МАЛАКЧЕ, М., Cu privire la rezolvarea numerică a ecuațiilor Park cu parametri tranzitorii. Electrotehnica, nr. 7 1976.
68. МАЛАКЧЕ, М., Identificarea dinamică a parametrilor din axa longitudinală a mașinii sincrone, Electrotehnica, nr. 7-1979.
69. МИКЛАШ, М.С., ГАБАИ, М.М., Определение электромагнитных параметров синхронных машин по частотным характеристикам, Электричество, nr. 9-1976.
70. МИКЛАШ, М.С., С синтеза схем замещения электрических машин переменного тока по переходным функциям и частотным характеристикам.

71. А.И.КЛЕБАНОВ, М.С., Metodika opredelenia ciastotnih harakteristik maşinah peremennogo toka., Elektrotehnika, nr.6-1965.
72. А.И.КЛЕБАНОВ, М.С., C opredelenie parametrov i ciastotnih harakteristik sinhronnih maşin po perehodnim funkciam. Elektrotehnika, nr.6-1969.
73. А.И.КЛЕБАНОВ, М.С., Metod opredelenia perehodnoi provodnosti maşin peremennogo toka., Elektrotehnika, nr.4-1969.
74. KRUGOWSKY, H., Parameterbestimmung für synchronmaschinen aus charakteristischen Betriebsdaten und kenlinien, Elektrik 34(1968), H2.
75. NÂDELCU, V., Maşini electrice, E.D.P. Bucureşti, 1968.
76. NÂDELCU, V., Regimurile de funcţionare ale maşinilor electrice de curent alternativ, Editura Tehnică, 1966.
77. NICOLAIDE, A., Maşini Electrice. Teorie, proiectare vol. I, II, Ed. Scrisul Românesc, Craiova, 1975.
78. NICOLAIDE, A., DRĂGĂNESCU, O.G.H., Caracteristicile de pornire ale motoarelor sincrone cu poli aparenti. Electrotehnica, nr.6-1963, Bucureşti.
79. NICOLAIDE, A., DRĂGĂNESCU O.G.H., Influenţa saturaţiei asupra caracteristicilor de pornire în asincron ale maşinilor sincrone cu poli aparenti. Electrotehnica, nr.4, 1970, Bucureşti.
80. NICOLAIDE, A., DRĂGĂNESCU, O.G.H., Sistemele de amortizare artificial şi natural al maşinilor sincrone cu poli aparenti, Electrotehnica, nr.9-1965, Bucureşti.
81. NICOLAIDE, A., DRĂGĂNESCU, O.G.H., Efectul tioului înfigurării de amortizare asupra constatărilor maşinii cu poli aparenti, Electrotehnica, nr.3-1967.
82. NURNBERG, W., Die Prüfung elektrischer Maschinen, Berlin, Göttingen, Heidelberg Springer-Verlag, 1959.
83. OPRILAN, P., Cu privire la determinarea parametrilor interni ai maşinii sincrone. Comunicare la a II-a Conferinţă naţională a electricienilor, Bucureşti, 1969.
84. PAWLIK, K., BUDNARSK, G., Pusk i asinhronnie regimi sinhronnih dvigatelei, "Energia", Moskva, 1971.

85. PAWLIK, K., Methode statique de mesure des constantes de temps et des reactances d'une machine synchrone. Revue Generale d'Electricite Juin 1962.
86. PANICENKO, G.A., SPANNUT, V.S., Experimentalnoe opredelenie sinhronnih reaktivnosti., Elektrotehnika, nr.5-1965.
87. PETROV, G.A., Elektriceskie maşini, G.E.I. Moskva, 1963.
88. POSNIKOV, I.M., Proektirovanie elektriceskih maşin Kiev, 1960.
89. POSNIKOV, I.M., Obobščennaja teorija i perehodnie proteţi elektriceskih maşin, Kiev, 1966.
90. POSNIKOV, I.M., Magnitnoe pole i parametri zareţcenija maşinno-rotornoi maşini pri kalih skoljenijah. Elektricesstvo, nr.9-1977.
91. POSNIKOV, I.M., Obščajaia teorija elektriceskih maşin, Kiev, 1966.
92. RAFLAN, E., Determination of synchronous machine phase-coordinate parameters. Proc. IEEE Vol.123-c/1976.
93. RGOZIN, G.C., GOMAN, V. Ia., Opredelenie ciatotnih harakteristik krupnih turbogeneratorov. Elektrotehnika, nr.5-1960.
94. ROZIG, R.V., Izmerenie garmonik dolia v sazere asinhronnih maşin s pomogčiu izmeritelnih obmetok. Elektromehanika, nr.6-1967.
95. SALVATORE, L., SAVONI, M., TORCIBELLO, A., Determinazione dei parametri della machina sincrona utilizzando un minicalcolatore., Elektrotechnika, nr.7-1979.
96. SCHAKSHAFT, G., New approach to the determination of synchronous machine parameters from tests, Proc. IEE Vol.126/3-1979.
97. SIDELNIKOV, A.V., LIBSCIT, A.G., Nekotorie rezultati analiza perehodnih proteţov visokeispolizovannogo sinhronnogo generatora., Elektricesstvo, nr.7-1967.
98. SIDELNIKOV, A.V., MIKLEAEV, M.C., GALIBAI, I.M., Vlianie masiţcenija na ciatotnie harakteristiki i perehodnie reaktivnosti sinhronnih maşin. Elektrotehnika, nr.9-1962.
99. SINOVOV, N.S., MIKLEAEV, M.S., Metod aproksimačii grafika perehodnogo proteţa pri isledovanii maşin peremennogo teka s pomogčiu ciatotnih harakteristik, Elektricesstvo, nr.2-1964.

100. SIGAEV, V. E., Asinhronni pusk sinhronnogo dvigatelja so sverhprovodeagcej obmotkoi vozbydenia, Elektrotehnika, nr. 9-1982.
101. SIVOKOBILENKO, V. F., O sinteze shem zomegcenia asinhronnih meşin po ciatotnih harakteristikam. Elektricestvo, nr. 7-1975.
102. SOKOLOV, N. I., KIRKIN, S. I., Opredelenie ciatotnih harakteristik sinhronnih meşin., Elektricestvo, nr. 1-1962.