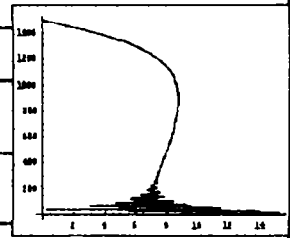


# TEZĂ DE DOCTORAT

## „ CONTRIBUTII PRIVIND STUDIUL REGIMURILOR TRANZITORII LA ACȚIONĂRILE ELECTRICE CU MAȘINI DE CURENT ALTERNATIV “

**Ing. GIURGIU VALENTIN - DANIEL**

$-311 \sin \theta - 16X + \left( 0.058 + \frac{0.643}{((X \cdot 10U \cdot R)^2 \cdot (Y \cdot Q)^2)^{\frac{1}{2}}} (Y + Q)^2 \right) \left( \frac{dX}{dt} + 10 \frac{dU}{dt} + \frac{dR}{dt} \right) - \frac{0.643(X \cdot 10U \cdot R)(Y \cdot Q) \left( \frac{dX}{dt} \cdot \frac{dQ}{dt} \right)}{((X \cdot 10U \cdot R)^2 \cdot (Y \cdot Q)^2)^{\frac{1}{2}}}$
$-w \left( \left( 0.058 \sqrt{(X + 10U + W)^2 + (Y + Q)^2} + 0.438 \right) \frac{Y \cdot Q}{\sqrt{(X \cdot 10U \cdot R)^2 \cdot (Y \cdot Q)^2}} + 0.015Y \right) + 0.01 \frac{dX}{dt}$
$311 \cos \theta - 16Y + \left( 0.058 + \frac{0.433}{((X \cdot 10U \cdot R)^2 \cdot (Y \cdot Q)^2)^{\frac{1}{2}}} (X + 10U + W)^2 \right) \left( \frac{dY}{dt} + \frac{dQ}{dt} \right) - \frac{0.433(X \cdot 10U \cdot R)(Y \cdot Q) \left( \frac{dY}{dt} \cdot 10 \frac{dU}{dt} \cdot \frac{dR}{dt} \right)}{((X \cdot 10U \cdot R)^2 \cdot (Y \cdot Q)^2)^{\frac{1}{2}}} +$
$+ w \left( \left( 0.058 \sqrt{(X + 10U + W)^2 + (Y + Q)^2} + 0.648 \right) \frac{X \cdot 10U \cdot R}{\sqrt{(X \cdot 10U \cdot R)^2 \cdot (Y \cdot Q)^2}} + 0.01X \right) + 0.015 \frac{dY}{dt}$
$82 - \left( 0.058 + \frac{0.643}{((X \cdot 10U \cdot R)^2 \cdot (Y \cdot Q)^2)^{\frac{1}{2}}} (Y + Q)^2 \right) \left( \frac{dX}{dt} + 10 \frac{dU}{dt} + \frac{dR}{dt} \right) - \frac{0.643(X \cdot 10U \cdot R)(Y \cdot Q) \left( \frac{dX}{dt} \cdot \frac{dQ}{dt} \right)}{((X \cdot 10U \cdot R)^2 \cdot (Y \cdot Q)^2)^{\frac{1}{2}}} + 100U + 0.2 \frac{dU}{dt} + 0.01 \frac{dR}{dt}$
$0 - \left( 0.058 + \frac{0.643}{((X \cdot 10U \cdot R)^2 \cdot (Y \cdot Q)^2)^{\frac{1}{2}}} (Y + Q)^2 \right) \left( \frac{dX}{dt} + 10 \frac{dU}{dt} + \frac{dR}{dt} \right) - \frac{0.643(X \cdot 10U \cdot R)(Y \cdot Q) \left( \frac{dX}{dt} \cdot \frac{dQ}{dt} \right)}{((X \cdot 10U \cdot R)^2 \cdot (Y \cdot Q)^2)^{\frac{1}{2}}} + 0.001 \frac{dR}{dt} + 0.01 \frac{dU}{dt} + 5W$
$0 - \left( 0.058 + \frac{0.433}{((X \cdot 10U \cdot R)^2 \cdot (Y \cdot Q)^2)^{\frac{1}{2}}} (X + 10U + W)^2 \right) \left( \frac{dY}{dt} + \frac{dQ}{dt} \right) - \frac{0.433(X \cdot 10U \cdot R)(Y \cdot Q) \left( \frac{dY}{dt} \cdot 10 \frac{dU}{dt} \cdot \frac{dR}{dt} \right)}{((X \cdot 10U \cdot R)^2 \cdot (Y \cdot Q)^2)^{\frac{1}{2}}} + 0.01 \frac{dQ}{dt} + 5Q$
$\frac{d\theta}{dt} + w - 314 = 0$
$Y \left( 0.058 \sqrt{(X + 10U + W)^2 + (Y + Q)^2} + 0.648 \right) \frac{X \cdot 10U \cdot R}{\sqrt{(X \cdot 10U \cdot R)^2 \cdot (Y \cdot Q)^2}} -$
$-X \left( 0.058 \sqrt{(X + 10U + W)^2 + (Y + Q)^2} + 0.438 \right) \frac{Y \cdot Q}{\sqrt{(X \cdot 10U \cdot R)^2 \cdot (Y \cdot Q)^2}} - 0.005XY - 5 - 0.01 \frac{d\theta}{dt}$
$X(0) = -3.826210184, Y(0) = -3.975126254, U(0) = 0.82, W(0) = 0, Q(0) = 0, w(0) = -314, \theta(0) = .701515146$



**CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:**

**Prof. Dr. Ing. SERACIN EUGEN**

BIbliotecA ȘTIINȚIFICĂ  
volum 6hh. 718  
nr. 369

2004

## PREFAȚĂ

Lucrarea de doctorat de față cu titlul “ *Contribuții privind studiul regimurilor tranzitorii la acționările electrice cu mașini de curent alternativ* ” se dorește a fi o contribuție adusă studiului regimurilor tranzitorii la acționările electrice cu mașini de curent alternativ pe baza modelului ortogonal al mașinilor electrice. Motivația fundamentală care stă la baza temei propuse este dată de importanța ( în primul rând practică ) cunoașterii funcționării sistemelor de acționare electrică în general respectiv a sistemelor de acționare electrică cu mașini de curent alternativ în special, în diverse regimuri tranzitorii întâlnite în exploatare, sub aspectul solicitărilor electromecanice care apar respectiv durata în timp a acestora. În literatura de specialitate, de obicei, funcționarea sistemelor de acționare electrică în regim tranzitoriu este studiată pe baza unor modele matematice care nu sunt prezentate detaliat, modele care sunt direct implementate în programele sursă ale unor soft-uri de simulare precum :Labview, Matlab Simulink,Flux, etc., motiv pentru care s-a manifestat o anumită rețineră în a le folosi. În dorința de a reprezenta mașina electrică fizică (reală) cât mai fidel posibil, în vederea obținerii unor rezultate cât mai (apropiate de realitate) sugestive din punct de vedere practic, pe baza modelului ortogonal, în prezenta lucrare de doctorat se prezintă un alt mod de abordare a regimurilor tranzitorii pe baza unui model matematic care să fie pe măsura complexității fenomenelor care însoțesc procesele tranzitorii.

Teza de doctorat propune o abordare matematică a sistemelor de ecuații diferențiale care modelează funcționarea sistemelor de acționare electrică cu mașini de curent alternativ în regim tranzitoriu pe baza unor soft-uri specializate precum Scientific Work Place versiunile 3.0, 4.0 și 5.0 respectiv Mathematica 4.0 , fără a pierde însă caracterul ingineresc în interpretarea rezultatelor obținute și în desprinderea unor concluzii practice.

În speranța că această lucrare va trezi un real interes, în cele ce urmează doresc să aduc mulțumirile mele tuturor celor care într-un fel sau altul și-au adus aportul.

Cu adânc respect aduc mulțumirile mele domnului *Prof.Dr.Ing.Eugen Seracin* pentru sprijinul deosebit acordat în realizarea acestei lucrări, exprimându-mi onoarea de a-l fi avut conducător de doctorat și în același timp exemplu de viață.

Doresc să mulțumesc deasemenea domnului *Prof.Dr.Ing.Marius Babescu* pentru sprijinul deosebit pe care mi l-a acordat în toți acești ani de studiu, pe parcursul cărora am realizat teza de doctorat.

Aduc mulțumirile mele deasemenea referenților științifici care au recenzat lucrarea de doctorat și m-au sprijinit în a o aduce la forma finală de prezentare.

Nu în ultimul rând, mulțumesc tuturor colegilor din catedra de M.A.U.E. a Facultății de Electrotehnică care m-au sprijinit prin sfaturile și prin experiența lor, în realizarea acestei lucrări.

Cu un gând deosebit aduc mulțumiri soției mele și părinților mei pentru înțelegerea și sprijinul de care au dat dovadă în toate situațiile dificile care au apărut în acești ani de studiu.

Timișoara , 15 Octombrie 2004

## CUPRINS

<b>1.INTRODUCERE</b> .....	0
<b>2.STADIUL LA NIVEL NAȚIONAL ȘI INTERNAȚIONAL PRIVIND UTILIZAREA MODELULUI ORTOGONAL LA STUDIUL FUNCȚIONĂRII ACȚIONĂRILOR ELECTRICE CU MAȘINI SINCRONE ȘI ASINCRONE</b> .....	2
<b>3.MODELUL ORTOGONAL</b> .....	4
3.1.Ecuatiile modelului ortogonal.....	4
3.2.Sisteme de ecuații diferențiale specifice modelului ortogonal Problema Cauchy.....	8
3.3.Parametrii mașinii sincrone.....	14
3.4.Parametrii mașinii asincrone.....	15
3.5.Echivalarea model – mașină reală.....	17
3.6.Concluzii.....	19
<b>4.DETERMINAREA PARAMETRILOR ACȚIONĂRILOR ELECTRICE CU MAȘINI SINCRONE</b> .....	20
4.1.Determinarea parametrilor de regim tranzitoriu ai mașinii sincrone din probe în axele d și q.....	21
4.1.1.Probe în axa d.....	21
4.1.2.Probe în axa q.....	24
4.2.Determinarea parametrilor mașinii sincrone pe baza datelor de catalog și a geometriei mașinii.....	28
4.3.Determinarea parametrilor mașinii sincrone în regim staționar din probele de gol respective scurtcircuit.....	34
4.4.Determinarea momentului de inerție axial.....	37
4.5.Concluzii.....	38
<b>5.DETERMINAREA PARAMETRILOR ACȚIONĂRILOR ELECTRICE CU MAȘINI ASINCRONE</b> .....	40
5.1.Determinarea parametrilor mașinii asincrone pe baza datelor de catalog și a probelor de mers în gol.....	40
5.2.Determinarea momentului de inerție axial.....	43
5.3.Concluzii.....	43
<b>6.MODELAREA ȘI SIMULAREA FUNCȚIONĂRII MAȘINILOR SINCRONE ÎN REGIM TRANZITORIU UTILIZÂND MODELUL ORTOGONAL</b> .....	44
6.1.Introducere.....	44
6.2.Funcționarea mașinii sincrone la tensiune și frecvență constante.....	44
6.2.1.Modelarea și simularea pornirii în asincron a motorului sincron.....	44
6.2.2.Modelarea și simularea încărcării bruște a motorului sincron.....	57
6.2.2.1.Încărcare bruscă de la 0% la 25% din $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial.....	64
6.2.2.2.Încărcare bruscă de la 0% la 50% din $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial.....	67
6.2.2.3.Încărcare bruscă de la 0% la 75% din $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial.....	70

6.2.2.4. Încărcare bruscă de la 0% la 100% din $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial .....	73
6.2.2.5. Limita de stabilitate la încărcare bruscă a motorului sincron, cu modificarea momentului de inerție axial .....	76
6.2.3. Modelarea și simularea descărcării bruște a motorului sincron .....	82
6.2.3.1. Descărcare bruscă de la 100% la 75% din $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial .....	82
6.2.3.2. Descărcare bruscă de la 100% la 50% din $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial .....	86
6.2.3.3. Descărcare bruscă de la 100% la 25% din $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial .....	89
6.2.3.4. Descărcare bruscă de la 100% la 0% din $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial .....	92
6.2.4. Modelarea și simularea reversării motorului sincron .....	95
6.2.4.1. Reversarea motorului sincron de la 0% din $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial .....	95
6.2.4.2. Reversarea motorului sincron de la 100% din $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial .....	100
6.3. Funcționarea mașinii sincrone la tensiune și frecvență variabile .....	105
6.3.1. Strategii de conducere și control a mașinii sincrone .....	105
6.3.2. Modelarea și simularea funcționării motorului sincron la <i>flux statoric controlat</i> cu <i>influența modificării momentului de inerție axial</i> .....	105
6.3.3. Modelarea și simularea funcționării motorului sincron la <i>flux rotoric controlat</i> cu <i>influența modificării momentului de inerție axial</i> .....	115
6.3.4. Modelarea și simularea funcționării motorului sincron la <i>flux statoric controlat</i> cu <i>influența modificării constantei de timp a reguletoarelor</i> .....	121
6.3.5. Modelarea și simularea funcționării motorului sincron la <i>flux rotoric controlat</i> cu <i>influența modificării constantei de timp a reguletoarelor</i> .....	123
6.4. Concluzii .....	125

<b>7. MODELAREA ȘI SIMULAREA FUNCȚIONĂRII MAȘINILOR ASINCRONE ÎN REGIM TRANZITORIU UTILIZÂND MODELUL ORTOGONAL .....</b>	<b>140</b>
7.1. Introducere .....	140
7.2. Funcționarea mașinii asincrone la tensiune și frecvență constante .....	140
7.2.1. Modelarea și simularea pornirii motorului asincron .....	140
7.2.2. Modelarea și simularea încărcării bruște a motorului asincron .....	142
7.2.2.1. Încărcare bruscă de la 0% la 25% din $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial .....	148
7.2.2.2. Încărcare bruscă de la 0% la 50% din $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial .....	151
7.2.2.3. Încărcare bruscă de la 0% la 75% din $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial .....	153
7.2.2.4. Încărcare bruscă de la 0% la 100% din $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial .....	156
7.2.2.5. Limita de stabilitate la încărcare bruscă a motorului asincron, cu modificarea momentului de inerție axial .....	158
7.2.3. Modelarea și simularea descărcării bruște a motorului asincron .....	161
7.2.3.1. Descărcare bruscă de la 100% la 75% din $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial .....	161

7.2.3.2. Descărcare bruscă de la 100% la 50% din $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial .....	164
7.2.3.3. Descărcare bruscă de la 100% la 25% din $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial .....	166
7.2.3.4. Descărcare bruscă de la 100% la 0% din $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial .....	168
7.2.4. Modelarea și simularea reversării motorului asincron .....	171
7.2.4.1. Reversarea motorului asincron de la 0% din $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial .....	171
7.2.4.2. Reversarea motorului asincron de la 100% din $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial .....	172
7.3. Funcționarea mașinii asincrone la tensiune și frecvență variabile .....	174
7.3.1. Strategii de conducere și control a mașinii asincrone .....	174
7.3.2. Modelarea și simularea funcționării motorului asincron la <i>flux statoric controlat</i> cu <i>influența modificării momentului de inerție axial</i> .....	174
7.3.3. Modelarea și simularea funcționării motorului asincron la <i>flux rotoric controlat</i> cu <i>influența modificării momentului de inerție axial</i> .....	182
7.3.4. Modelarea și simularea funcționării motorului asincron la <i>flux statoric controlat</i> cu <i>influența modificării constantei de timp a reguletoarelor</i> .....	187
7.3.5. Modelarea și simularea funcționării motorului asincron la <i>flux rotoric controlat</i> cu <i>influența modificării constantei de timp a reguletoarelor</i> .....	189
7.4. Concluzii .....	191
<b>8. DETERMINĂRI EXPERIMENTALE ȘI COMPARAREA REZULTATELOR OBȚINUTE PRIN SIMULARE ȘI EXPERIMENTAL</b> .....	203
8.1. Introducere .....	203
8.2. Mașina sincronă .....	203
8.3. Mașina asincronă .....	206
8.4. Concluzii .....	210
<b>9. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE</b> .....	211
9.1. Concluzii generale .....	211
9.2. Contribuții personale .....	214
<b>10. BIBLIOGRAFIE</b> .....	216
<b>11. ANEXE</b>	
Anexa A .....	A1-A2
Anexa B .....	B1-B5
Anexa C .....	C1
Anexa D .....	D1-D3

## Cap1.INTRODUCERE

Lucrarea de față abordează o problemă de o stringentă actualitate: regimurile tranzitorii în acționările electrice cu mașini de curent alternativ (cu mașini sincrone și mașini asincrone).

Teoria clasică a mașinilor electrice are în vedere în principal regimul permanent sinusoidal.

Pe baza acestei teorii, s-au proiectat, realizat și exploatat mașini electrice cu performanțe ridicate, avându-se în vedere o experiență în acest domeniu de peste o sută de ani.

Analiza regimurilor tranzitorii s-a impus în literatura de specialitate începând din anii '20 cu lucrările lui Doherty R.E., Nickle C.A. și mai ales având în vedere contribuția lui Park R.H.[P1] și Krong G. Au urmat apoi lucrările lui White D.C.[W1], Woodson H.H.[W1], Meisel J., Dordea T.[D3,D4] și mai recent ale lui Kovacs K.P.[K3], Racz I., Stepina J.[S3], Blaschke F. și Babescu M.[B1,B2].

În analiza regimurilor tranzitorii, prin contribuția celor de mai sus, s-a impus modelul ortogonal general sau modelul „d-q”. Modelul fazorial al mașinilor electrice se bazează tot pe modelul „d-q”, lucrări importante în acest sens fiind publicate de următorii: Yamamura S.[Y1], Lipo T.A.[L3], Boldea I., Nasar S.A.[B16], Miller T.J.E., Leonard W.[L4], Kelemen A.[K1].

Cunoașterea comportării sistemelor de acționare electrică în diversele regimuri tranzitorii întâlnite în practică este esențială, ținând cont de faptul că în timpul acestor procese tranzitorii apar solicitări electromecanice care pot să afecteze buna funcționare a sistemelor de acționare.

În sensul celor spuse mai sus, interesează atât amplitudinea solicitărilor care apar cât și durata în timp a acestora, în vederea stabilirii limitelor (cadrului) în care trebuie să funcționeze sistemele de acționare electrică, pentru a evita suprasolicitarea sau chiar distrugerea acestora. În funcție de comportarea diverselor sisteme de acționare electrică în diverse regimuri tranzitorii întâlnite în exploatare, se pot trasa și direcțiile lor de utilizare pe diverse aplicații industriale. În aceeași ordine de idei, cunoașterea comportării sistemelor de acționare electrică în regim tranzitoriu (prin simulare cu ajutorul unui model validat experimental), aduce avantaje deosebite încă din faza de proiectare și dimensionare a sistemului respectiv astfel ca el să facă față solicitărilor la care va fi supus. În contextul de mai sus, în lucrarea de față se prezintă un model matematic bazat pe teoria celor două axe a mașinilor electrice, model pe baza căruia se simulează funcționarea sistemelor de acționare electrică cu mașini sincrone și asincrone în regim tranzitoriu atât la tensiune și frecvență constante cât și la tensiune și frecvență variabile.

În cadrul simulării funcționării sistemelor de acționare electrică cu mașini sincrone și asincrone în regim tranzitoriu la tensiune și frecvență constante se prezintă câteva din cele mai importante regimuri care se întâlnesc în exploatare cum ar fi: pornirea, încărcarea și descărcarea bruscă de sarcină, reversarea, în condițiile modificării cuplului rezistent și a momentului de inerție axial.

În cadrul simulării funcționării sistemelor de acționare electrică cu mașini sincrone și asincrone în regim tranzitoriu la tensiune și frecvență variabile se prezintă funcționarea la frecvență variabilă și la flux controlat care s-a dezvoltat după patru direcții: flux statoric controlat, flux rotoric controlat, flux în întrefier controlat și flux de excitație controlat (la mașina sincronă). Dintre aceste patru strategii de modificare a turației, în această lucrare se prezintă pe larg doar primele două dintre ele dat fiind faptul că sunt cele mai folosite în prezent în acționările electrice reglabile[B3,B4]. În cadrul strategiilor de control prezentate în lucrare se prezintă și influența modificării parametrilor reguletoarelor precum și a momentului de inerție axial asupra (dinamicii) proceselor tranzitorii care au loc. Rezultatele obținute prin simulare se compară cu cele obținute experimental (testându-se astfel validitatea modelului matematic utilizat) și se prezintă interpretarea rezultatelor obținute, în vederea desprinderii unor concluzii care să fie utile în domeniul sistemelor de acționare electrică actuale cu mașini electrice de curent alternativ respectiv sincrone și asincrone.

În cele ce urmează, se prezintă conținutul tezei de doctorat pe capitole, prezentare din care să se poată desprinde logica succesiunii capitolului lucrării precum și modul în care a fost structurată și prezentată, în vederea unei mai bune înțelegeri a conținutului acesteia.

În *capitolul 2* se face o prezentare generală a modelului ortogonal (sau modelul d-q) al mașinilor electrice și anume se prezintă (în limitele cunoscute de autor) stadiul la nivel național și internațional privind utilizarea acestuia la studiul funcționării acționărilor electrice cu mașini sincrone și asincrone atât pentru regimul staționar de funcționare (situație foarte cunoscută și prezentată în literatura de specialitate) dar mai ales pentru regimurile dinamice (tranzitorii) de funcționare, regimuri care sunt mai dificil de studiat. Se precizează cadrul în care modelul ortogonal poate să fie utilizat în sensul în care acesta are și el limitări (de altfel acceptate ca premiză de această lucrare de doctorat) în ceea ce privește modelarea condițiilor reale (care sunt extrem de complexe și greu de evaluat) de funcționare a sistemelor de acționare electrică printre care se pot enumera: regimul deformant în alimentare, prezența saturației magnetice precum și alte fenomene complexe care sunt greu de cuantificat cantitativ și calitativ.

În *capitolul 3* se prezintă o abordare matematică a ecuațiilor modelului ortogonal ale mașinilor sincronă și asincronă în sensul că se face un studiu asupra domeniilor în care trebuie să se situeze parametrii mașinilor sincronă respectiv asincronă (cu rotorul în scurtcircuit, care este cea mai răspândită în aplicațiile industriale) pentru ca sistemele de ecuații diferențiale care modelează procesele tranzitorii să fie determinate, stabile și să aibe soluție. Se prezintă de asemenea metode de analiză matematică a stabilității și existenței soluției sistemelor de ecuații diferențiale de ordinul I, cum sunt cele ale modelului ortogonal.

În *capitolul 4* se prezintă determinarea parametrilor acționărilor electrice cu mașini sincrone, prezentându-se trei din metodele cele mai întâlnite în prezent, în vederea desprinderii unor concluzii comparative care vizează rezultatele obținute. Se face de asemenea o analiză a celor trei metode în sensul că se precizează condițiile în care poate fi aplicată fiecare dintre ele cu observațiile de rigoare asupra volumului de calcul (cât de laborioasă este metoda respectivă) precum și asupra dificultăților de ordin experimental care pot să apară.

În *capitolul 5* se prezintă determinarea parametrilor acționărilor electrice cu mașini asincrone printr-o metodă relativ simplă (nu prezintă dificultăți de natură experimentală și nu este laborioasă) care oferă rezultate acceptabile, aceste calități recomandând-o pentru a fi utilizată.

În *capitolul 6* se prezintă modelarea și simularea funcționării mașinilor sincrone din acționările electrice în diverse regimuri tranzitorii (atât la frecvență și tensiune constante cât și la frecvență și tensiune variabile), pe baza modelului ortogonal prezentat în *capitolul 3* respectiv pentru o mașină sincronă a cărei parametri sunt determinați și analizați anterior în *capitolul 4*. În urma simulărilor se trag concluzii, se fac interpretările de rigoare și se stabilesc măsuri pentru evitarea unor posibile evenimente (fenomene) nedorite în funcționarea sistemelor de acționare electrică cu mașini sincrone.

În *capitolul 7* se prezintă modelarea și simularea funcționării mașinilor asincrone din acționările electrice în diverse regimuri tranzitorii (atât la frecvență și tensiune constante cât și la frecvență și tensiune variabile), pe baza modelului ortogonal prezentat în *capitolul 3* respectiv pentru o mașină asincronă a cărei parametri sunt determinați și analizați anterior în *capitolul 5*. În urma simulărilor se trag concluzii, se fac interpretările de rigoare și se stabilesc măsuri pentru evitarea unor posibile evenimente (fenomene) nedorite în funcționarea sistemelor de acționare electrică cu mașini asincrone.

În *capitolul 8* se prezintă determinările experimentale realizate precum și compararea rezultatelor obținute prin simulare cu cele obținute experimental în scopul de a valida modelul matematic realizat, prezentat și utilizat de autor.

În *capitolul 9* se prezintă concluziile generale respectiv contribuțiile originale care se desprind din lucrare.

În *capitolul 10* se prezintă bibliografia tezei de doctorat iar în *capitolul 11* sunt prezentate anexele lucrării.

**Cap2.STADIUL LA NIVEL NAȚIONAL ȘI INTERNAȚIONAL PRIVIND UTILIZAREA MODELULUI ORTOGONAL LA STUDIUL FUNCȚIONĂRII ACȚIONĂRILOR ELECTRICE CU MAȘINI SINCRONE ȘI ASINCRONE**

În dorința de a cunoaște cât mai profund procesele și fenomenele care au loc în sistemele de acționare electrică în general și în sistemele de acționare electrică cu mașini sincrone și asincrone în special sub aspect calitativ și cantitativ, se pune problema reprezentării mașinii reale într-un mod sau altul în vederea realizării unor modele (reprezentări imaginare) matematice, ale căror soluții să ne ofere cât mai multe informații despre comportarea sistemelor de acționare electrică în diverse situații.

Între aceste modele (reprezentări) și mașina reală trebuie să existe anumite relații de legătură prin care obținem informații despre mașina fizică sub aspect energetic precum și informații care ne ajută în mod real la stabilirea unor strategii de comandă și control al mașinilor electrice din sistemele de acționare.

În domeniul sistemelor de acționare electrică cu mașini de curent alternativ (sincrone și asincrone) pentru modelarea funcționării acestora există în prezent, pe lângă modelul natural de reprezentare care este o legătură între mărimile care intervin în mașina reală pe fiecare fază a mașinii pe baza legilor cunoscute în Electrotehnică, două modele de reprezentare: modelul ortogonal și modelul fazorial.

În prezent cel mai folosit model de reprezentare a mașinilor electrice în general și a mașinilor electrice de curent alternativ în special este modelul ortogonal, aceasta datorită avantajelor pe care le prezintă, avantaje expuse în cele ce urmează.

Modelul ortogonal al mașinilor electrice deși s-a consacrat în reprezentarea mașinii de curent continuu, s-a dovedit a fi deosebit de util și în reprezentarea mașinilor de curent alternativ, respectiv mașini sincrone și asincrone. Bazele modelului ortogonal au fost puse de Park în anul 1929, el fiind cel care a propus reprezentarea (modelarea) mașinilor electrice pe baza a două axe în cuadratură, teorie care mai întâi s-a aplicat mașinii de curent continuu iar mai apoi mașinilor de curent alternativ, și care avea să se numească până în zilele noastre “ *Teoria celor două axe* “. În prezent s-a ajuns în faza în care, pe baza cunoștințelor din Electrotehnică (cu referire în special la legi) se pot scrie ecuațiile mașinilor sincronă și asincronă pe baza modelului ortogonal de reprezentare. După cum se cunoaște, aceste ecuații sunt (în forma generală- pentru regimuri dinamice) diferențiale, deci ele se constituie în sisteme de ecuații diferențiale care modelează funcționarea mașinilor electrice atât în regim tranzitoriu cât și în regim staționar, situație în care derivatele sistemelor de ecuații se anulează. Din cele spuse mai sus se poate concluziona că pe baza modelului ortogonal, în regim staționar mărimile din model sunt constante în timp (sistemul de ecuații diferențiale transformându-se într-un sistem algebric) pe când în procesele tranzitorii mărimile din model sunt variabile în timp.

Pe baza modelului ortogonal se poate constitui foarte ușor modelul fazorial de reprezentare a mașinilor electrice care nu este altceva decât o reprezentare cu ajutorul unor fazori (vectori dispuși în planul complex) în a căror parte reală apar componentele după axa longitudinală (d) a modelului ortogonal respectiv în partea imaginară apar componentele după axa transversală (q) a modelului ortogonal.

În regim *sinusoidal*, situație în care modelul ortogonal poate fi folosit, aplicarea acestuia, din câte s-a constatat până în prezent are o serie de avantaje precum:

- coerență în reprezentarea cât mai fidelă a mașinii reale (fizice),
- ecuațiile modelului permit foarte ușor o interpretare simplă fenomenologică a proceselor care au loc în funcționarea mașinilor electrice de curent alternativ,
- modelul ortogonal poate să țină cont de fenomenele din mașină în toată complexitatea lor fără a complica prea mult aparatul matematic; din punct de vedere matematic,



ecuațiile modelului ortogonal nu prezintă probleme deosebite la soluționare în condițiile existenței unui suport matematic solid și a unei utilizări optime a acestuia.

În regim *nesinusoidal* (regimul real de alimentare a mașinilor electrice de curent alternativ din sistemele de acționare electrică) modelul ortogonal nu își are o aplicare directă, însă, el poate fi aplicat pentru fiecare armonică în parte, stabilindu-se astfel contribuția fiecărei armonici în mărimile din model precum și consecințele existenței acestor armonici în tensiune și curent asupra funcționării mașinii. Problema dificilă însă este legată de însumarea efectelor armonicilor în situația când modelul este neliniar, consecință a mediului neliniar.

Date fiind aceste probleme de superpoziție deosebit de dificile, probleme care stau în prezent în atenția specialiștilor, în dorința pe cât posibil de a le evita, lucru care face posibilă aplicarea modelului ortogonal, se consideră că regimul de alimentare este sinusoidal, ceea ce este practic realizabil în prezent prin utilizarea filtrelor active. În aceste condiții din urmă modelul ortogonal se poate aplica cu o precizie acceptabilă, putându-se beneficia de toate avantajele pe care le oferă.

Datorită faptului că modelul ortogonal prezintă totuși dezavantajul că nu poate fi folosit decât pentru regimul sinusoidal și cum regimul de alimentare real (fără utilizarea filtrelor active de armonici) al mașinilor electrice de curent alternativ este unul nesinusoidal, găsirea în viitor a unor modele prin care să se reprezinte mașinile electrice de curent alternativ, modele care să țină cont de situația reală de alimentare, nu mai este o opțiune ci devine o necesitate. Această necesitate devine din ce în ce mai acută pe de-o parte ținând cont de situația reală din sistemele electroenergetice în care există un regim de funcționare puternic deformat de consumatorii neliniari din sistem iar pe de altă parte această necesitate este impusă de normativele care apar pe plan mondial în legătură cu calitatea energiei electrice respectiv minimizarea pierderilor de energie electrică.

În concluzie, datorită avantajelor pe care le prezintă, modelul ortogonal este încă cel mai folosit pe plan internațional în modelarea funcționării sistemelor de acționare cu mașini electrice în general și a sistemelor de acționare electrică cu mașini electrice sincrone și asincrone în special, situație tratată în lucrarea de față.

## Cap3.MODELUL ORTOGONAL

## 3.1.Ecuatiile modelului ortogonal

Dinamica fenomenelor electromagnetice care au loc în mașinile electrice atunci când acestea funcționează în diverse regimuri tranzitorii, se poate studia atât sub aspect calitativ cât și cantitativ considerând un model de reprezentare a mașinii fizice, model prin ale cărui înfășurări, curenții (din model) au o anumită formă de variație în timp sau, în regim staționar aceștia sunt constanți în timp relativ la sistemul de axe legat de câmpul magnetic învârtitor. Prin acest mod de reprezentare și pe baza celor spuse în capitolul 2 rezultă un model simplu și deosebit de util - consacrat în literatura de specialitate prin numele de *modelul ortogonal* sau *modelul d-q*.

Modelul ortogonal, deși consacrat pentru reprezentarea mașinii de curent continuu, poate fi folosit cu succes și la reprezentarea (modelarea) mașinilor de curent alternativ, așa cum se va vedea în lucrarea de față.

Acest capitol își propune o analiză matematică a ecuațiilor modelului ortogonal sub aspectul existenței și unicității soluției în dorința de a încadra din punct de vedere matematic problemele care le ridică acest model: *influența preciziei de determinare a parametrilor asupra existenței și corectitudinii soluției sistemelor de ecuații diferențiale, convergența și stabilitatea sistemelor de ecuații diferențiale, metode de soluționare a sistemelor de ecuații diferențiale, etc.*

La *mașina sincronă* (MS), reprezentarea schematică în modelul ortogonal este dată în figura 3.1.1.

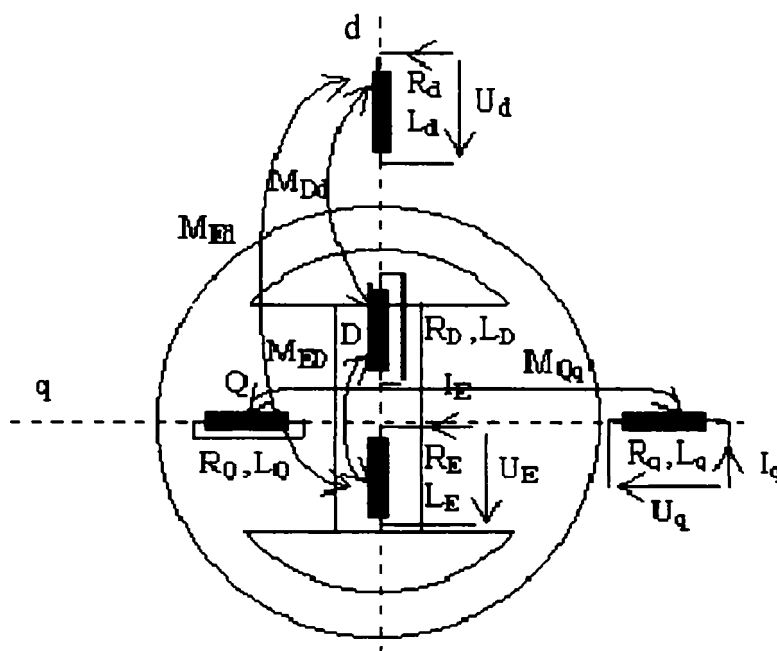


Fig.3.1.1.Mașina sincronă.

Modelul ortogonal este definit de relațiile dintre tensiunile care cad pe înfășurările din model și curenții care parcurg aceste înfășurări prin intermediul parametrilor mașinii. Scrierea matricială a ecuațiilor pentru regimul de motor este cea din relația 3.1.[B2,B4].

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_E \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_E \\ I_D \\ I_Q \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

cu matricea

$$M = \begin{bmatrix} R_d + L_d \cdot p & -\omega L_q & M_{Ed} \cdot p & M_{Dd} \cdot p & -\omega M_{Qd} \\ \omega L_d & R_q + L_q \cdot p & \omega M_{Eq} & \omega M_{Dq} & M_{Qq} \cdot p \\ M_{Ed} \cdot p & 0 & R_E + L_E \cdot p & M_{ED} \cdot p & 0 \\ M_{Dd} \cdot p & 0 & M_{ED} \cdot p & R_D + L_D \cdot p & 0 \\ 0 & M_{Qq} \cdot p & 0 & 0 & R_Q + L_Q \cdot p \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

unde cu  $p$  s-a notat operatorul de derivare  $\frac{d}{dt}$  iar coeficienții reprezintă:

$U_d, U_q, U_E, U_D = 0, U_Q = 0$  - tensiunile la bornele înfășurărilor,

$I_d, I_q, I_E, I_D, I_Q$  - curenții prin înfășurări

$\omega$  - pulsația electrică unghiulară ( $\omega = 2\pi f$ ),

$R_d, R_q, R_E, R_D, R_Q$  - rezistențele înfășurărilor,

$L_d, L_q, L_E, L_D, L_Q$  - inductanțele proprii ale înfășurărilor,

$M_{Ed}, M_{Eq}, M_{Dd}, M_{Dq}, M_{ED}, M_{Qd}$  - inductanțele de cuplaj ale înfășurărilor.

Prin ordonarea convenabilă a liniilor și coloanelor din  $M$  (scoaterea în evidență a simetriei matricii  $M$ ), sistemul (3.1) se mai scrie matricial sub forma:

$$A \cdot \begin{bmatrix} \frac{dI_d}{dt} \\ \frac{dI_E}{dt} \\ \frac{dI_D}{dt} \\ \frac{dI_Q}{dt} \\ \frac{dI_q}{dt} \end{bmatrix} + B \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_E \\ I_D \\ I_Q \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_d \\ U_E \\ 0 \\ 0 \\ U_q \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

unde

$$A = \begin{bmatrix} L_d & M_{Ed} & M_{Dd} & 0 & 0 \\ M_{Ed} & L_E & M_{ED} & 0 & 0 \\ M_{Dd} & M_{ED} & L_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_Q & M_{Qq} \\ 0 & 0 & 0 & M_{Qq} & L_q \end{bmatrix} \text{ și } B = \begin{bmatrix} R_d & 0 & 0 & -\omega M_{Qd} & -\omega L_q \\ 0 & R_E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_Q & 0 \\ \omega L_d & \omega M_{Eq} & \omega M_{Dq} & 0 & R_q \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Cuplul electromagnetic se determină cu relația[B4]:

$$M_{elmag.MS} = p_1 [I_d I_q (L_d - L_q) + I_q I_E M_{Eq} - I_Q I_d M_{Qd} + I_q I_D M_{Dq}] \quad (3.5)$$

unde  $p_1$  este numărul perechilor de poli.

La sistemul descris prin ecuația (3.3) se adaugă ecuația mișcării:

$$M_{elmag.MS} - M_{rezistent} = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (3.6)$$

unde  $J$  este momentul de inerție axial iar  $\Omega$  (viteza unghiulară mecanică) funcția definită prin:

$$\Omega = \frac{\omega}{p_1} \quad (3.7)$$

Pentru rezolvarea sistemului de ecuații diferențiale, matricea  $A$  formată cu coeficienții derivatelor are un rol decisiv. Determinantul acestei matrici are o valoare dată de expresia:

$$\det A = (-L_q L_Q + M_{Qq}^2) \cdot (L_E M_{Dd}^2 + L_d M_{ED}^2 + L_D M_{Ed}^2 - L_d L_E L_D - 2M_{Ed} M_{ED} M_{Dd}) \quad (3.8)$$

Se observă din relația (3.8) că pentru ca determinantul matricii  $A$  sa fie nul (situație ce corespunde mașinii sincrone ideale) trebuie îndeplinită condiția:

$$\begin{cases} (-L_q L_Q + M_{Qq}^2) = 0 \\ (L_E M_{Dd}^2 + L_d M_{ED}^2 + L_D M_{Ed}^2 - L_d L_E L_D - 2M_{Ed} M_{ED} M_{Dd}) = 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

de unde rezultă:

$$M_{Qq}^2 = L_q L_Q$$

În concluzie, pentru mașinile sincrone cu dispersie nulă (întrefierul  $\delta \rightarrow 0$ , coeficientul de dispersie  $\sigma \rightarrow 0 \Rightarrow M^2 \rightarrow L_1 L_2$ ) se pot scrie relațiile (3.10).

$$\begin{cases} M_{Qq}^2 = L_q L_Q \\ M_{Ed}^2 = L_E L_d \\ M_{ED}^2 = L_E L_D \\ M_{Dd}^2 = L_D L_d \end{cases} \quad (3.10)$$

În mod uzual însă determinantul matricii  $A$  este nenul deoarece pentru mașinile sincrone reale între inductanțe există următoarele inegalități:

$$\begin{cases} M_{Qq}^2 < L_q L_Q \\ M_{Ed}^2 < L_E L_d \\ M_{ED}^2 < L_E L_D \\ M_{Dd}^2 < L_D L_d \end{cases} \quad (3.11)$$

La mașina asincronă (MA) cu rotorul în scurtcircuit, mașină tratată în lucrarea de față, reprezentarea schematică în modelul ortogonal este dată în figura 3.1.2.

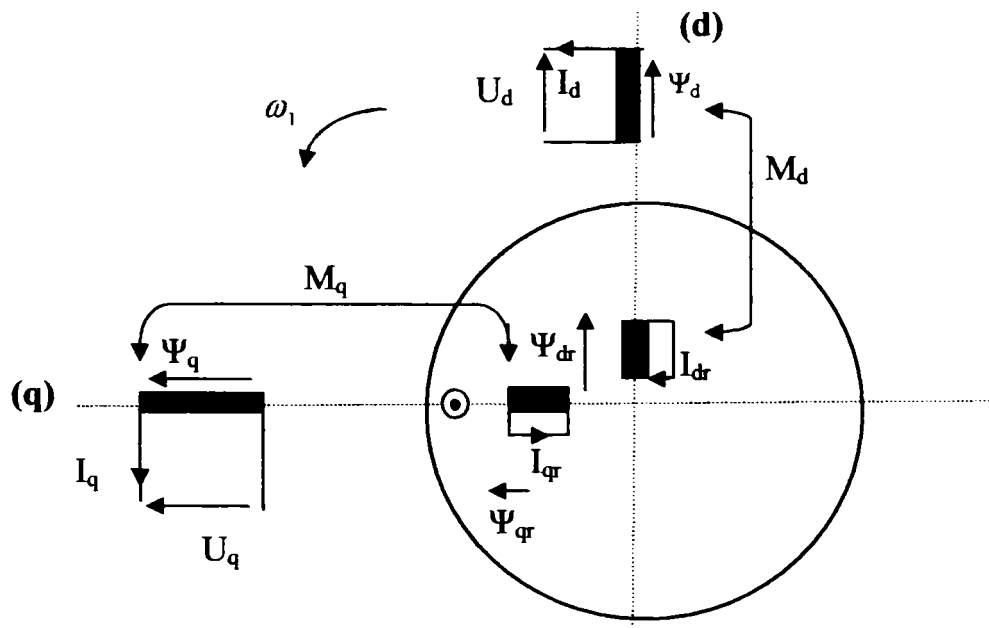


Fig.3.1.2. Mașina asincronă.

Scrierea matricială a ecuațiilor mașinii asincrone pentru regimul de motor este cea din relația 3.12. [B3].

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

cu matricea

$$M = \begin{bmatrix} R_{1d} + L_{1d} \cdot p & -\omega_1 \cdot L_{1q} & M_d \cdot p & -\omega_1 \cdot M_q \\ \omega_1 \cdot L_{1d} & R_{1q} + L_{1q} \cdot p & \omega_1 \cdot M_d & M_q \cdot p \\ M_d \cdot p & -M_q(\omega_1 - \omega) & R_{2d} + L_{2d} \cdot p & -L_{2q}(\omega_1 - \omega) \\ M_d(\omega_1 - \omega) & M_q \cdot p & L_{2d}(\omega_1 - \omega) & R_{2q} + L_{2q} \cdot p \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

unde cu  $p$  s-a notat operatorul de derivare  $\frac{d}{dt}$  iar coeficienții reprezintă:

$U_d, U_q, U_{dr} = 0, U_{qr} = 0$  - tensiunile la bornele înfășurărilor,

$I_d, I_q, I_{dr}, I_{qr}$  - curenții prin înfășurări

$\omega_1$  - viteza câmpului statoric ( $\omega_1 = 2\pi f$ ),

$\omega$  - viteza rotorului,

$R_{1d}, R_{1q}, R_{2d}, R_{2q}$  - rezistențele înfășurărilor,

$L_{1d}, L_{1q}, L_{2d}, L_{2q}$  - inductanțele proprii ale înfășurărilor,

$M_d, M_q$  - inductanțele de cuplaj dintre stator și rotor.

Prin ordonarea convenabilă a liniilor și coloanelor din matricea  $M$ , sistemul (3.12) se scrie matricial sub forma:

$$A \cdot \begin{bmatrix} \frac{dI_d}{dt} \\ \frac{dI_q}{dt} \\ \frac{dI_{dr}}{dt} \\ \frac{dI_{qr}}{dt} \end{bmatrix} + B \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

unde

$$A = \begin{bmatrix} L_{1d} & 0 & M_d & 0 \\ 0 & L_{1q} & 0 & M_q \\ M_d & 0 & L_{2d} & 0 \\ 0 & M_q & 0 & L_{2q} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

și

$$B = \begin{bmatrix} R_{1d} & -\omega_1 L_{1q} & 0 & -\omega_1 M_q \\ \omega_1 L_{1d} & R_{1q} & \omega_1 M_d & 0 \\ 0 & -M_q(\omega_1 - \omega) & R_{2d} & -L_{2q}(\omega_1 - \omega) \\ M_d(\omega_1 - \omega) & 0 & L_{2d}(\omega_1 - \omega) & R_{2q} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Cuplul electromagnetic se determină cu relația[B3]:

$$M_{el\text{mag.MA}} = p_1 M [I_q I_{dr} - I_d I_{qr}] ; (M_d = M_q = M) \quad (3.17)$$

unde  $p_1$  este numărul perechilor de poli.

La sistemul descris prin ecuația (3.14) se adaugă *ecuația mișcării*:

$$M_{el\text{mag.MA}} - M_{rezistent} = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (3.18)$$

unde  $J$  este momentul de inerție axial iar  $\Omega$  (viteza unghiulară mecanică) funcția definită prin:

$$\Omega = \frac{\omega}{p_1} \quad (3.19)$$

În practică, din motive de simetrie, se consideră MA cu:

$$L_{1d} = L_{1q} \stackrel{\text{not}}{=} L_1 \quad (3.20)$$

$$L_{2d} = L_{2q} \stackrel{\text{not}}{=} L_2$$

Pe baza celor spuse mai sus, matricea coeficienților derivatelor (3.15) devine:

$$A = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & M & 0 \\ 0 & L_1 & 0 & M \\ M & 0 & L_2 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_2 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

iar determinantul ei are valoarea dată de expresia:

$$\det A = (M^2 - L_1 L_2)^2 \quad (3.22)$$

În mod uzual  $L_1 L_2 > M^2$  și deci  $\det A \neq 0$ . La mașinile asincrone cu întrefier mic, deci cu un cuplaj magnetic între stator și rotor foarte bun,  $L_1 L_2 \rightarrow M^2$  și deci  $\det A \rightarrow 0$ .

În ecuația mișcării, deoarece:

$$\Omega(t) = \Omega_1(t)(1 - s(t)) = 2\pi n_1 (1 - s(t)) \quad (3.23)$$

se poate scrie:

$$J \frac{d\Omega}{dt} = -J \cdot 2\pi n_1 \frac{ds}{dt} \quad (3.24)$$

Alunecarea se poate scrie sub una din formele:

$$s = \frac{\Omega_1 - \Omega}{\Omega_1} = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (3.25)$$

și ecuația mișcării (3.18) devine:  $M_{el\text{mag.MA}} - M_{rezistent} = -J\Omega_1 \frac{ds}{dt} \quad (3.26)$

### 3.2.Sisteme de ecuații diferențiale specifice modelului ortogonal.Problema Cauchy

*Sistemele de ecuații diferențiale de ordinul întâi* se pot scrie matricial sub forma:

$$A \cdot \begin{bmatrix} \frac{dX_1}{dt} \\ \frac{dX_2}{dt} \\ \vdots \\ \frac{dX_p}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(t, X_1, X_2, \dots, X_p) \\ f_2(t, X_1, X_2, \dots, X_p) \\ \vdots \\ f_p(t, X_1, X_2, \dots, X_p) \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

unde

□  $A = [a_{jk}] (j, k = \overline{1, p})$  este o matrice dată, având drept coeficienți funcțiile continue  $a_{jk} : [t_0, +\infty] \rightarrow \mathfrak{R}$  (în majoritatea cazurilor studiate, coeficienții  $a_{jk}$  sunt constanți). Procesele evolutive se modelează, conform legilor specifice domeniului studiat, prin funcții a căror variabilă este timpul; în mod firesc domeniul de definiție al acestor funcții este un interval de forma  $[t_0, +\infty]$  unde momentul inițial  $t_0$  se consideră nul;

□  $X_1, X_2, \dots, X_p : [t_0, +\infty] \rightarrow \mathfrak{R}$  sunt funcțiile necunoscute iar

□  $f_1, f_2, \dots, f_p : [t_0, +\infty] \times D \subset \mathfrak{R}^{p+1} \rightarrow \mathfrak{R}$ ,  $D$  mulțime deschisă din  $\mathfrak{R}^p$  sunt funcții cunoscute de clasă  $C^1_{[t_0, +\infty] \times D}$  (adică funcții derivabile parțial pe  $[t_0, +\infty] \times D$  cu derivatele parțiale continue).

Sistemul de ecuații descris mai sus este *autonom* dacă variabila independentă  $t$  nu apare explicit în nici una dintre ecuații, sau altfel spus dacă:

□  $f_1, f_2, \dots, f_p : D \subset \mathfrak{R}^p \rightarrow \mathfrak{R}$  sunt de clasă  $C^1_D$  pe deschisa  $D$ .

O familie  $\{X_1(\cdot), X_2(\cdot), \dots, X_p(\cdot)\}$  (punctul din interiorul parantezei marchează locul în care apare variabila funcției) formată din  $p$  (aici  $p$  apare doar ca indice și nu se confundă cu operatorul de derivare) funcții reale de clasă  $C^1$  pe intervalul  $I$  care verifică identitatea [I2], [O1], [R2]:

$$A \cdot \begin{bmatrix} X_1'(t) \\ X_2'(t) \\ \vdots \\ X_p'(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(t, X_1(t), X_2(t), \dots, X_p(t)) \\ f_2(t, X_1(t), X_2(t), \dots, X_p(t)) \\ \vdots \\ f_p(t, X_1(t), X_2(t), \dots, X_p(t)) \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

oricare ar fi  $t$  în intervalul  $I$  se numește *soluție* a ecuației.

Sistemul dat (indiferent dacă este autonom sau nu) se poate scrie în *forma normală*

$$\begin{bmatrix} \frac{dX_1}{dt} \\ \frac{dX_2}{dt} \\ \vdots \\ \frac{dX_p}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_p \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

dacă și numai dacă determinantul matricei  $A$  este nenul (pe un interval inclus în  $[t_0, +\infty]$ ).

Evident, dacă  $A$  este o matrice constantă, funcțiile  $g_1, g_2, \dots, g_p$  din membrul drept al ecuațiilor sistemului sunt combinații liniare ale funcțiilor  $f_1, f_2, \dots, f_p$ :

$$\begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_p \end{bmatrix} = A^{-1} \cdot \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_p \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

deci sunt și ele de clasă  $C^1$  pe  $[t_0, +\infty] \times D \subset \mathbb{R}^{p+1}$  sau, după caz,  $D \subset \mathbb{R}^p$ .

*Problema Cauchy* asociată la momentul  $t_0$  ( $t_0 = 0$ ) setului de date inițiale  $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p\}$  constă în determinarea acelei soluții  $X(\cdot) = \{X_1(\cdot), X_2(\cdot), \dots, X_p(\cdot)\}$  a sistemului care verifică în plus condițiile:

$$\begin{cases} X_1(t_0) = \alpha_1 \\ X_2(t_0) = \alpha_2 \\ \vdots \\ X_p(t_0) = \alpha_p \end{cases} \quad (3.31)$$

Soluția problemei, dacă există, va fi notată pe scurt prin  $X(\cdot; t_0; \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p)$ .

O condiție *suficientă* pentru *existența și unicitatea* soluției problemei Cauchy:

$$\begin{cases} \frac{dX_1}{dt} = g_1 \\ \frac{dX_2}{dt} = g_2 \\ \vdots \\ \frac{dX_p}{dt} = g_p \\ X_1(t_0) = \alpha_1 \\ X_2(t_0) = \alpha_2 \\ \vdots \\ X_p(t_0) = \alpha_p \end{cases} \quad (3.32)$$

este următoarea:

Fie  $D$  o mulțime din  $\mathbb{R}^p$  care conține în interior punctul de coordonate  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p)$  și  $\varepsilon$  este un număr pozitiv arbitrar de valoare mică.

Dacă sunt îndeplinite următoarele condiții:

a) funcțiile  $g_1, g_2, \dots, g_p$  sunt continue pe vecinătatea  $I_{t_0} \times D_{(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p)}$  sau după caz, pe

$D_{(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p)}$ ; vecinătățile considerate aici sunt de forma  $I_{t_0} = (t_0 - \rho, t_0 + \rho)$  respectiv

$D_{(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p)} = \{x_1, x_2, \dots, x_p \mid |x_i - \alpha_i| < \sigma_i \ (i = \overline{1, p})\}$ ;



b) funcțiile  $g_1, g_2, \dots, g_p$  sunt derivabile parțial în raport cu  $X_1, X_2, \dots, X_p$  pe  $D_{(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p)}$ ;

c) derivatele parțiale  $\frac{\partial g_i}{\partial X_j}$  ( $i, j = \overline{1, p}$ ) sunt continue pe  $D_{(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p)}$

atunci problema Cauchy are soluție unică, adică există și sunt unic determinate  $p$  funcții derivabile:  $X_1, X_2, \dots, X_p : I_{t_0} \rightarrow D_i$  astfel încât să fie verificate toate cele  $2p$  egalități din problema Cauchy

Pentru o formulare mai riguroasă și pentru detalii interesante privind existența, unicitatea respectiv prelungibilitatea soluției unei probleme Cauchy se pot consulta manualele [O1, R2].

Rezultatul enunțat este o consecință imediată a teoremei Peano-Picard de existență și unicitate a soluției problemei Cauchy pentru sisteme de ecuații diferențiale sub formă normală; toate sistemele de ecuații diferențiale întâlnite în această lucrare verifică condițiile a), b) și c).

Determinarea efectivă a soluției (unice) pentru o problemă Cauchy nu este în general posibilă.

□ Dacă sistemul de ecuații diferențiale este liniar și are coeficienți constanți, se poate aplica o metodă pur algebrică pentru deducerea soluției, metodă ce are la bază *posibilitatea de a aduce la forma normală Jordan matricea coeficienților variabilelor dependente*  $X_1, X_2, \dots, X_p$ .

□ Dacă sistemul de ecuații diferențiale este liniar și are coeficienți constanți sau chiar funcții, se poate apela la *transformata Laplace*.

□ O altă posibilitate de a aborda problema este aceea de a alege una din metodele numerice cunoscute: Runge-Kutta, Adams-Bashforth-Moulton, predictor-corector sau Milne-Hamming ([M1], [I1], [N3]). Acest mod de abordare prezintă dezavantajul de a fi mare consumator de timp și energie întrucât impune crearea unui algoritm propriu și apoi transpunerea sa într-un limbaj de programare, aceasta fiind recomandabilă în procesul didactic dar nu în cazul unei cercetări asupra unui număr mare de situații concrete. Alternativa o constituie programele dedicate rezolvării problemelor de matematică cu ajutorul computerului și a pachetelor specializate ce le însoțesc. Ele sunt din ce în ce mai complexe, conținând experiența unui număr mare de cercetători și sunt relativ ușor de manevrat de utilizatorul care a înțeles spiritul problemei studiate dar care are pretenția eliminării rutinei oboșitoare. Gradul de stăpânire al acestor programe este însă direct proporțional cu calitatea și profunzimea cunoștințelor matematice ale utilizatorului. În această lucrare problemele sunt rezolvate cu nucleul Maple al programului Scientific Work Place 4.0 și cu Mathematica 4.0<sup>7</sup>. Ambele programe, în segmentul dedicat rezolvării sistemelor de ecuații diferențiale, se bazează pe algoritmi deosebit de eficienți, variante actualizate ale metodei Runge-Kutta de ordinul 4.

Oricare însă ar fi modul de rezolvare al sistemului de ecuații diferențiale, înaintea inițierii procedurii de rezolvare, este recomandabilă studierea stabilității. *Soluțiile sistemului algebric:*

$$\begin{cases} g_1(t, X_1, X_2, \dots, X_p) = 0 \\ g_2(t, X_1, X_2, \dots, X_p) = 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ g_p(t, X_1, X_2, \dots, X_p) = 0 \end{cases} \quad (3.33)$$

*obținut prin anularea termenilor liberi, se numesc puncte de echilibru.*

Fie  $(X_1, X_2, \dots, X_p)$  un astfel de punct; funcțiile constante:

$$\begin{cases} X_1(t) = X_1 \\ X_2(t) = X_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ X_p(t) = X_p \end{cases} \quad (3.34)$$

reprezintă o soluție a sistemului

$$\begin{cases} \frac{dX_1}{dt} = g_1 \\ \frac{dX_2}{dt} = g_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{dX_p}{dt} = g_p \end{cases} \quad (3.35)$$

și totodată unica soluție a problemei Cauchy cu condițiile inițiale:

$$\begin{cases} X_1(t_0) = X_1 \\ X_2(t_0) = X_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ X_p(t_0) = X_p \end{cases} \quad (3.36)$$

(cu alte cuvinte  $X(\cdot; t_0; X_1, X_2, \dots, X_p)$  este chiar  $\{X_1, X_2, \dots, X_p\}$ ). Se pune problema comportării soluției sistemului la abateri mici ale condițiilor inițiale  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p$  de la valorile de echilibru  $X_1, X_2, \dots, X_p$ . Soluția  $\{X_1, X_2, \dots, X_p\}$  este **stabilă** dacă, oricare ar fi  $\varepsilon > 0$ , există un număr pozitiv  $\delta_{\varepsilon, t_0}$  astfel încât, pentru toate condițiile inițiale  $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p\}$  verificând

$$\|(X_1, X_2, \dots, X_p) - (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p)\| \leq \delta_{\varepsilon, t_0} \quad (3.37)$$

soluția  $X(\cdot; t_0; \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p)$  este definită pe semiaxa  $[t_0, +\infty]$  și verifică inegalitatea:

$$\|X(t, t_0; \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p) - (X_1, X_2, \dots, X_p)\| \leq \varepsilon \quad (t \geq t_0) \quad (3.38)$$

Soluția  $\{X_1, X_2, \dots, X_p\}$  este **asimptotic stabilă** dacă este stabilă și dacă există  $\mu_{t_0} > 0$  astfel încât

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|X(t, t_0; \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p) - (X_1, X_2, \dots, X_p)\| = 0 \quad (3.39)$$

pentru toate condițiile inițiale  $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p\}$  verificând

$$\|(X_1, X_2, \dots, X_p) - (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p)\| \leq \mu_{t_0} \quad (3.40)$$

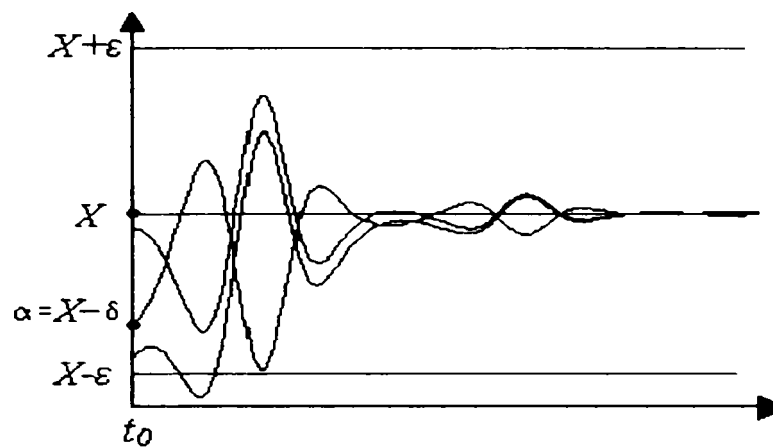


Fig.3.2.1. X este un punct de echilibru asimptotic stabil[B2].

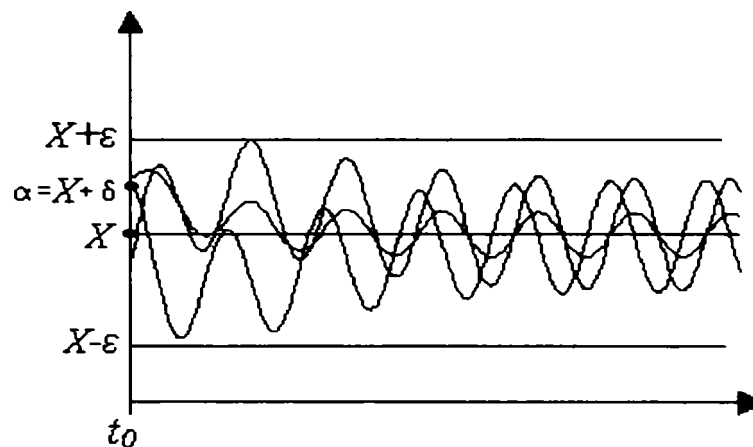


Fig.3.2.2. X este un punct de echilibru stabil dar nu asimptotic stabil[B2].

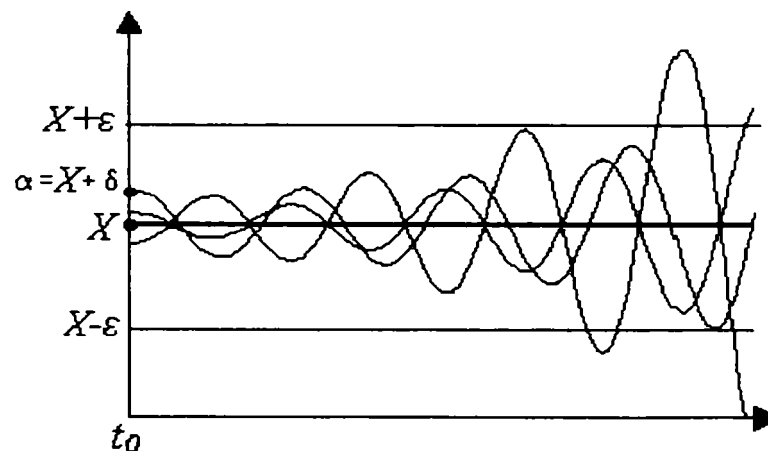


Fig.3.2.3. X este un punct de echilibru instabil[B2].

În practică este utilă următoarea condiție suficientă de stabilitate:

Dacă matricea lui Jacobi atașată termenilor liberi ai sistemului în punctul de echilibru  $(X_1, X_2, \dots, X_p)$ :

$$G'(X_1, X_2, \dots, X_p) = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial X_1} & \frac{\partial g_1}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial X_p} \\ \frac{\partial g_2}{\partial X_1} & \frac{\partial g_2}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial g_2}{\partial X_p} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial g_p}{\partial X_1} & \frac{\partial g_p}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial g_p}{\partial X_p} \end{bmatrix} (X_1, X_2, \dots, X_p) \quad (3.41)$$

are toate valorile proprii cu partea reală negativă, atunci acesta este un punct de echilibru asimptotic stabil.

Dacă cel puțin una dintre valorile proprii are partea reală strict pozitivă atunci punctul de echilibru este instabil.

### 3.3. Parametrii mașinii sincrone

Ecuțiile modelului ortogonal al mașinii sincrone se reprezintă concentrat sub forma dată de relațiile (3.1) și (3.2) iar printr-o ordonare convenabilă a liniilor și coloanelor (astfel ca să fie pusă în evidență simetria matricii  $M$ ) rezultă:

$$M \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_E \\ I_D \\ I_Q \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & M_{Ed} & M_{Dd} & 0 & 0 \\ M_{Ed} & L_E & M_{ED} & 0 & 0 \\ M_{Dd} & M_{ED} & L_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_Q & M_{Qq} \\ 0 & 0 & 0 & M_{Qq} & L_q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dI_d}{dt} \\ \frac{dI_E}{dt} \\ \frac{dI_D}{dt} \\ \frac{dI_Q}{dt} \\ \frac{dI_q}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_d & 0 & 0 & -\omega M_{Qd} & -\omega L_q \\ 0 & R_E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_Q & 0 \\ \omega L_d & \omega M_{Eq} & \omega M_{Dq} & 0 & R_q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_E \\ I_D \\ I_Q \\ I_q \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

Punctul de echilibru, dacă există, este soluție a sistemului algebric obținut prin anularea termenilor liberi ceea ce revine la determinarea curenților ce verifică ecuația matricială:

$$\begin{bmatrix} R_d & 0 & 0 & -\omega M_{Qd} & -\omega L_q \\ 0 & R_E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_Q & 0 \\ \omega L_d & \omega M_{Eq} & \omega M_{Dq} & 0 & R_q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_E \\ I_D \\ I_Q \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_d \\ U_E \\ 0 \\ 0 \\ U_q \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

Matricea formată cu coeficienții derivatelor are determinantul:

$$\det A = (-L_q L_Q + M_{Qq}^2) \cdot (L_E M_{Dd}^2 + L_d M_{ED}^2 + L_D M_{Ed}^2 - L_d L_E L_D - 2M_{Ed} M_{ED} M_{Dd}) \quad (3.44)$$

În general, așa cum se poate observa din relația (3.44), relațiile între parametrii ce intervin în expresia determinantului sunt de forma:

$$\begin{aligned} M_{Qq} &= \theta \sqrt{L_Q L_q} \quad \text{cu } \theta \in (0,1] \\ M_{Ed} &= x \sqrt{L_E L_d} \quad \text{cu } x \in (0,1] \\ M_{ED} &= y \sqrt{L_E L_D} \quad \text{cu } y \in (0,1] \\ M_{Dd} &= z \sqrt{L_D L_d} \quad \text{cu } z \in (0,1] \end{aligned} \quad (3.45)$$

deci determinantul matricii  $A$  devine:

$$\det A = L_d L_q L_D L_Q L_E (-1 + \theta^2) (x^2 + y^2 + z^2 - 2xyz - 1) \quad (3.46)$$

Pe baza relației (3.46) se poate determina domeniul parametrilor  $x, y, z$  la mașina sincronă:

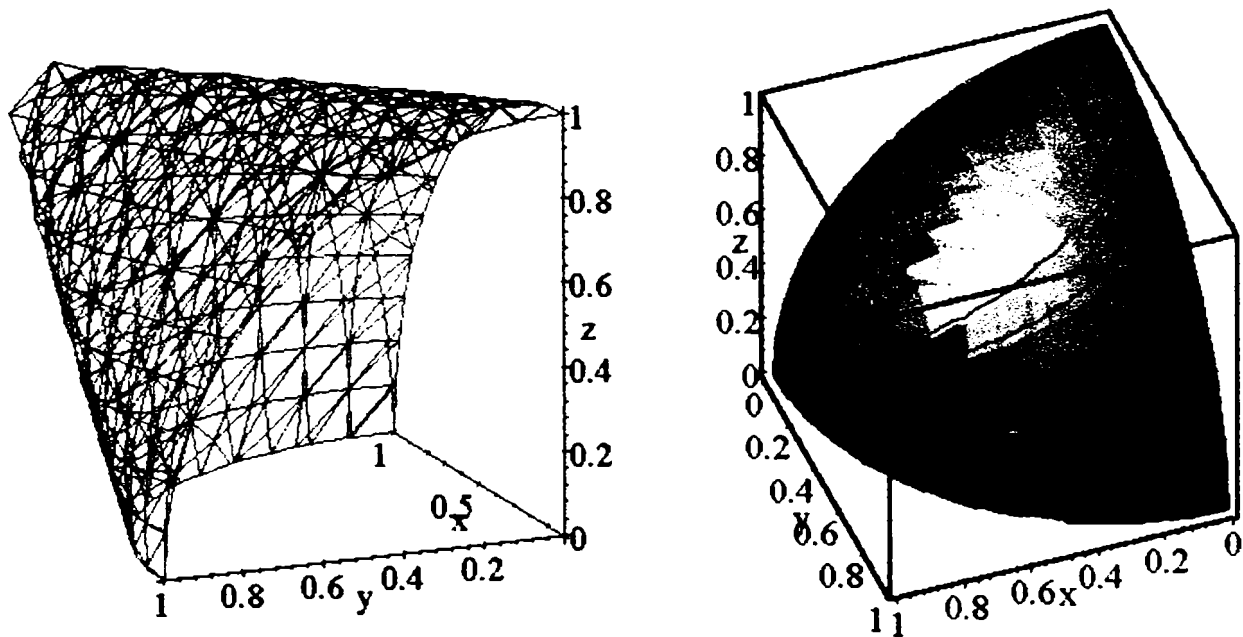


Fig.3.3.1. Domeniul parametrilor  $x, y, z$  la mașina sincronă.

În cazul *mașinilor sincrone reale*, punctul de coordonate  $(x,y,z)$  se găsește în interiorul cubului unitate în zona situată spre origine, dedesubtul suprafeței de ecuație:

$$x^2 + y^2 + z^2 - 2xyz = 1 \quad (3.47)$$

La *mașina sincronă ideală* ( $\theta = x = y = z = 1$ ), punctul de coordonate  $(x,y,z)$  ocupă (este chiar) vârful opus originii. Dacă determinantul matricii formate cu coeficienții derivatelor este nul dar doar unul dintre cei patru parametri are valoarea 1, mașina sincronă din model este doar *aproape ideală* ceea ce fizic semnifică existența unor dispersii dar dificil de cuantificat din punct de vedere energetic.

### 3.4. Parametrii mașinii asincrone

Ecuațiile modelului ortogonal al mașinii asincrone se reprezintă concentrat sub forma dată de relațiile (3.12) și (3.13) iar printr-o ordonare convenabilă a liniilor și coloanelor (astfel ca să fie pusă în evidență simetria matricii  $M$ ) rezultă:

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{1d} & 0 & M_d & 0 \\ 0 & L_{1q} & 0 & M_q \\ M_d & 0 & L_{2d} & 0 \\ 0 & M_q & 0 & L_{2q} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dI_d}{dt} \\ \frac{dI_q}{dt} \\ \frac{dI_{dr}}{dt} \\ \frac{dI_{qr}}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{1d} & -\omega_1 L_{1q} & 0 & -\omega_1 M_q \\ \omega_1 L_{1d} & R_{1q} & \omega_1 M_d & 0 \\ 0 & -M_q(\omega_1 - \omega) & R_{2d} & -L_{2q}(\omega_1 - \omega) \\ M_d(\omega_1 - \omega) & 0 & L_{2d}(\omega_1 - \omega) & R_{2q} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

Matricea coeficienților derivatelor este:

$$A = \begin{bmatrix} L_{1d} & 0 & M_d & 0 \\ 0 & L_{1q} & 0 & M_q \\ M_d & 0 & L_{2d} & 0 \\ 0 & M_q & 0 & L_{2q} \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

și are determinantul:

$$\det A = L_{1d}L_{1q}L_{2d}L_{2q} - L_{1d}M_q^2L_{2d} - M_d^2L_{1q}L_{2q} + M_d^2M_q^2 = (-L_{1d}L_{2d} + M_d^2)(L_{1q}L_{2q} - M_q^2) \quad (3.50)$$

În expresia acestui determinant se regăesc șase parametri ai mașinii asincrone: inductanțele proprii ale înfășurărilor statorice:  $L_{1d}, L_{1q}$ , inductanțele proprii ale înfășurărilor rotorice:  $L_{2d}, L_{2q}$  respectiv inductanțele mutuale  $M_d$  și  $M_q$ . Acești parametri se supun următoarelor relații:

$$\begin{aligned} M_d^2 &\leq L_{1d}L_{2d} \\ M_q^2 &\leq L_{1q}L_{2q} \end{aligned} \quad (3.51)$$

cu alte cuvinte, inductanțele mutuale sunt de forma:

$$\begin{aligned} M_d &= \mu \sqrt{L_{1d}L_{2d}} \quad \text{cu } \mu \in (0,1] \\ M_q &= \lambda \sqrt{L_{1q}L_{2q}} \quad \text{cu } \lambda \in (0,1] \end{aligned} \quad (3.52)$$

$$\text{iar determinantul devine: } \det A = L_{1d}L_{2d}L_{1q}L_{2q}(-1 + \mu^2)(1 - \lambda^2) \quad (3.53)$$

Pe baza relației (3.53) se poate determina domeniul parametrilor  $\mu$  și  $\lambda$  la mașina sincronă (figura.3.4.1):

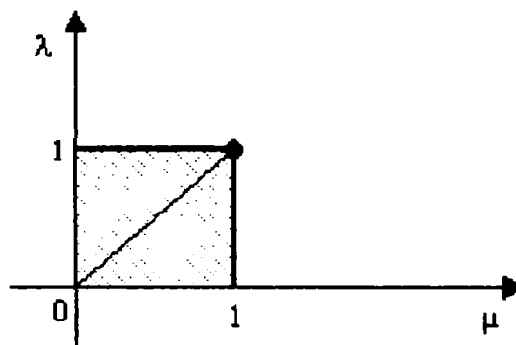


Fig.3.4.1. Domeniul parametrilor  $\mu$  și  $\lambda$  la mașina asincronă.

În cazul *mașinilor asincrone reale*, parametrii  $\mu$  și  $\lambda$  se găsesc în interiorul pătratului unitate (în practică, din motive de simetrie, chiar pe diagonala principală), în timp ce la *mașina asincronă ideală* ( $\mu = \lambda = 1$ ) aceștia ocupă colțul de nord-est (a se vedea figura 3.4.1), deci cel opus originii. În sens fizic, mașina ideală presupune existența unui cuplaj perfect între stator și rotor adică dispersiile nule.

Dacă determinantul matricii formate cu coeficienții derivatelor este nul dar numai unul dintre cei doi parametri are valoarea 1, mașina asincronă din model este doar *aproape ideală*.

### 3.5. Echivalarea model – mașină reală

Echivalența dintre modelul ortogonal și mașina fizică are în vedere egalitatea solenațiilor și cea a energiilor.

Mașina reală are înfășurările decalate la  $120^\circ$ , așa ca în figura 3.5.1 iar mașina model la  $90^\circ$ .

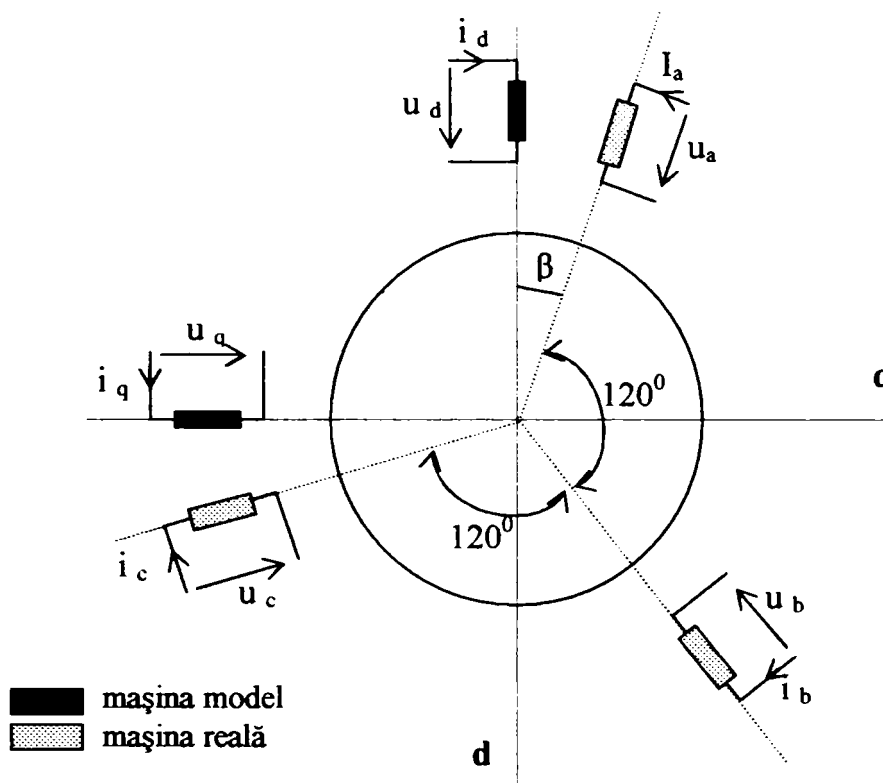


Fig.3.5.1. Echivalarea mașină model – mașină reală.

Mărimile reale  $i_a, i_b, i_c, u_a, u_b, u_c$  se găsesc din transformarea Park inversă, proiectând pe axele fazelor mărimile corespunzătoare modelului. Rezultă pentru curenți și tensiuni următoarele relații, cunoscute în literatură:

$$i_a = \sqrt{\frac{2}{3}}(I_d \cos \omega t - I_q \sin \omega t) \quad (3.54)$$

$$i_b = \sqrt{\frac{2}{3}}[I_d \cos(\omega t - 120) - I_q \sin(\omega t - 120)] \quad (3.55)$$

$$i_c = \sqrt{\frac{2}{3}}[I_d \cos(\omega t + 120) - I_q \sin(\omega t + 120)] \quad (3.56)$$

rezultând:

$$\underline{I}_s = I_d + jI_q = \sqrt{\frac{2}{3}}(i_a + \underline{a}i_b + \underline{a}^2i_c) \cdot e^{-j(\omega t + \theta_0 + \varphi)}; \quad \left( \underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} \right) \quad (3.57)$$

și analog pentru tensiuni:

$$u_a = \sqrt{\frac{2}{3}}(U_d \cos \omega t - U_q \sin \omega t) \tag{3.58}$$

$$u_b = \sqrt{\frac{2}{3}}[U_d \cos(\omega t - 120) - U_q \sin(\omega t - 120)] \tag{3.59}$$

$$u_c = \sqrt{\frac{2}{3}}[U_d \cos(\omega t + 120) - U_q \sin(\omega t + 120)] \tag{3.60}$$

rezultând:

$$\underline{U}_s = U_d + jU_q = \sqrt{\frac{2}{3}}(u_a + \underline{a}u_b + \underline{a}^2 u_c) \cdot e^{-j(\omega t + \theta_0)}; \quad \left( \underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} \right) \tag{3.61}$$

Pe baza celor prezentate mai sus, se prezintă în figurile 3.5.2 și 3.5.3 blocurile de transformare pentru tensiune respectiv pentru curent.

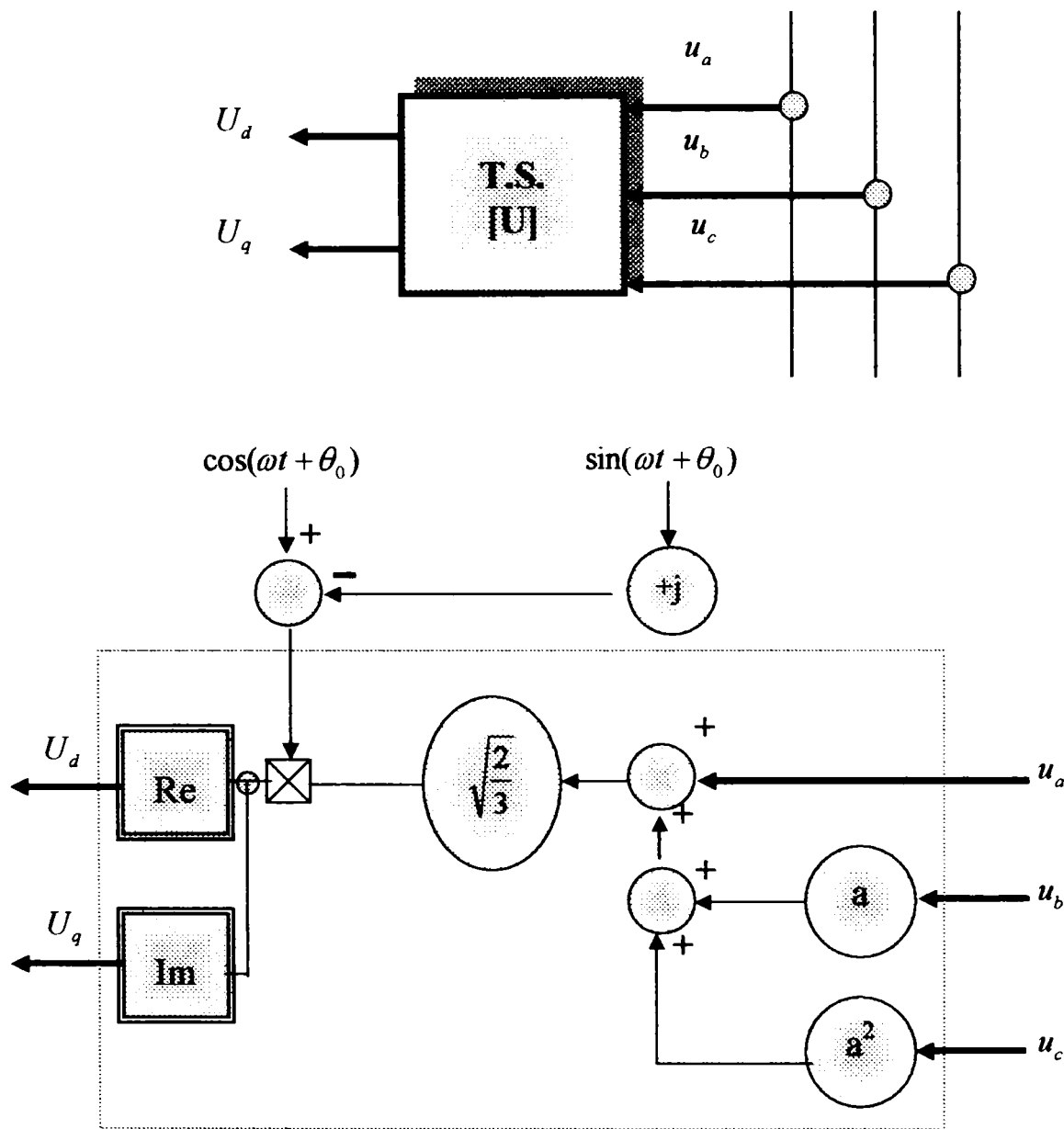


Fig.3.5.2.Blocul transformării de sistem (trifazat - d-q) pentru tensiune.



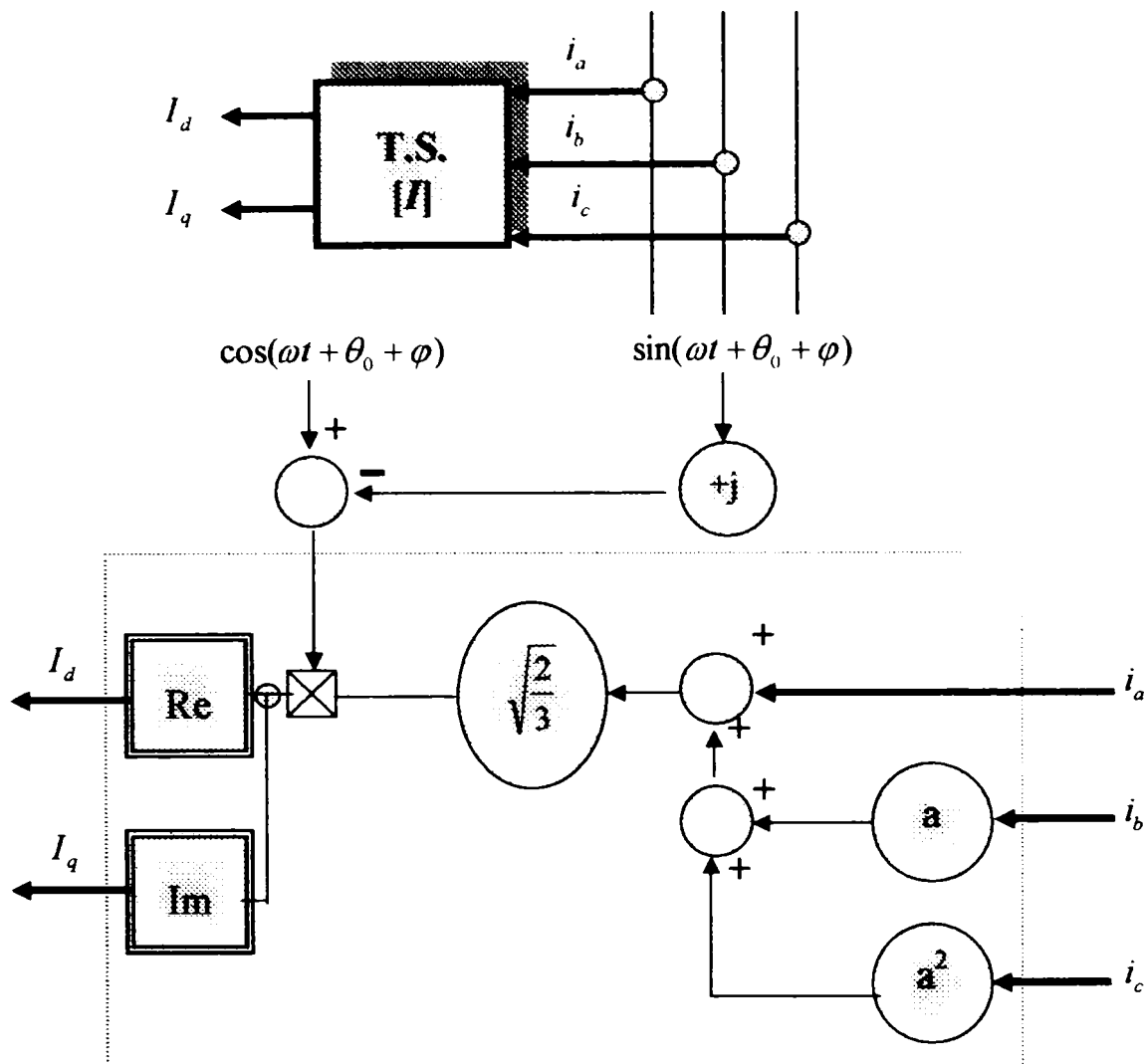


Fig.3.5.3.Blocul transformării de sistem (trifazat - d-q) pentru curent.

### 3.6.Concluzii

- Ecuțiile modelului ortogonal, sub aspect matematic, așa cum rezultă din paragraful 3.1, prezintă simplitate și coerență, avantaje care fac ca modelul ortogonal să fie deosebit de util în vederea unei reprezentări cât mai simple și în același timp cât mai exhaustive și fidele a mașinii electrice fizice (reale);
- În urma celor arătate în paragraful 3.2, se poate concluziona că din punctul de vedere al problemei Cauchy, sistemele de ecuații diferențiale obținute din scrierea matricială a ecuațiilor mașinii (sincrone și asincrone) sunt bine analizate și sub aspectul existenței, unicității și stabilității soluției, aparatul matematic este complet și bine conturat;
- Din paragrafele 3.3 și 3.4 se desprinde concluzia că pornind de la matricea formată din coeficienții derivatelor sistemului de ecuații diferențiale, pe baza expresiei (literale) a determinantului acestei matrici, se poate găsi domeniul parametrilor mașinilor electrice sincrone (la care domeniul parametrilor este un domeniu volumic- *cub unitate*) și asincrone (la care domeniul parametrilor este un domeniu suprafață- *pătrat unitate*);
- Din paragraful 3.5 se poate conchide că între mașina reală (fizică) și model trebuie să existe anumite relații de legătură, absolut necesare, relații prezentate sintetic în figurile 3.5.2 respectiv 3.5.3.

Cap4.DETERMINAREA PARAMETRILOR ACȚIONĂRILOR ELECTRICE  
CU MAȘINI SINCRONE

În vederea determinării parametrilor sistemelor de acționare electrică cu mașini sincrone, se consideră un sistem de acționare electrică în care mașina sincronă(disponibilă în laboratorul de mașini electrice al catedrei) are următoarele date de catalog furnizate de firma constructoare:

$$\begin{aligned}
 S_N &= 3,965[KVA] \\
 P_N &= 2,5[KW] \\
 n &= 1500[rpm] \\
 U_N &= 380/220[V] \\
 I_N &= 4,5[A] \\
 \cos\varphi &= 0,8 \\
 U_{E\max} &= 110[V] \\
 I_{E\max} &= 1,5[A] \\
 M_N &= 15,924[Nm] \\
 J &= 0,008663[Kg \cdot m^2]
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Se cunoaște și geometria mașinii prin următoarele mărimi:

- raza rotorului:  $R = 0,1[m]$ ;
- diametrul rotorului:  $D = 2R = 0,2[m]$ ;
- distanța dintre poli:  $2a = 0,12[m]$ ;
- lățimea polului:  $b = 0,05[m]$ ;
- lungimea mașinii:  $l_{MS} = 0,3[m]$  și
- numărul de spire din înfășurarea de amortizare din axa q:  $N = 134[spire]$ .

În figura 4.1.1 se dă o explicativă privind geometria mașinii sincrone considerate mai sus, în figură fiind reprezentați, din motive de simetrie, doar 2 poli.

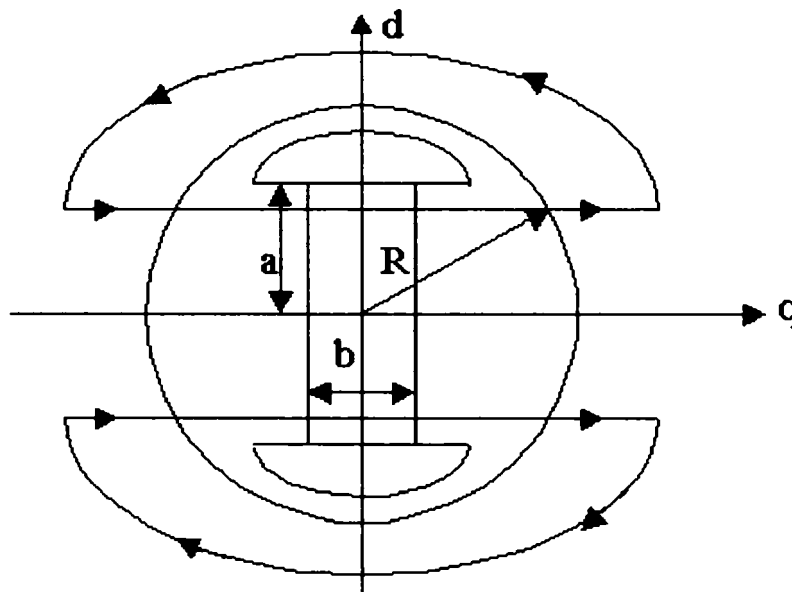


Fig.4.1.1.Explicativă privind geometria mașinii sincrone.

Pe baza cunoașterii dimensiunilor geometrice ale mașinii sunt cunoscute și constantele de timp, ca mărimi de catalog (date de firma constructoare):

$$\begin{aligned}
 T'_d &= 0,082[s] \\
 T''_d &= 4,63 \cdot 10^{-3}[s] \\
 T'_{d0} &= 0,45[s] \\
 T''_{d0} &= 6,64 \cdot 10^{-3}[s] \\
 T''_q &= 7,09 \cdot 10^{-3}[s] \\
 T''_{q0} &= 8,27 \cdot 10^{-3}[s] \\
 T_D &= 5,6 \cdot 10^{-3}[s]
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

Având la dispoziție toate aceste informații (prezentate mai sus), se pune problema mai întâi de a determina parametrii mașinii sincrone cu datele de mai sus iar apoi se determină ceilalți parametri ai sistemului de acționare în ansamblu.

Pentru determinarea parametrilor mașinii sincrone considerate (mașină care există în laboratorul de mașini electrice al facultății) se prezintă trei metode de determinare:

- determinarea parametrilor de regim tranzitoriu ai mașinii sincrone din probe în axele d și q;
- determinarea parametrilor mașinii sincrone pe baza datelor de catalog și a geometriei mașinii;
- determinarea parametrilor mașinii sincrone în regim staționar din probe de gol respectiv scurtcircuit.

**4.1.Determinarea parametrilor de regim tranzitoriu ai mașinii sincrone din probe în axele d și q**

Parametrii înfășurărilor de amortizare se calculează din probe în axele d și q.

**4.1.1.Probe în axa d**

a) axa fazei “A” este în axa polară și excitația este scurtcircuitată

Se execută montajul din figura 4.1.2 și se alimentează faza “A” cu tensiunea rețelei industriale a<sub>roa</sub> e sinusoidală la frecvența rețelei.

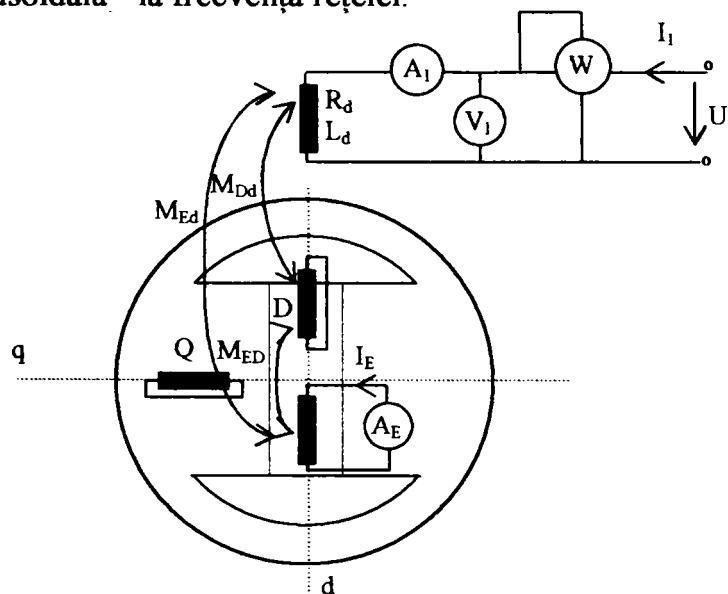


Fig.4.1.2.Măsurători în axa longitudinală.

În cazul când excitația este în scurtcircuit fiind parcursă de curentul  $I_E$  măsurat cu ampermetrul  $A_E$  schema electrică este dată în figura 4.1.3.

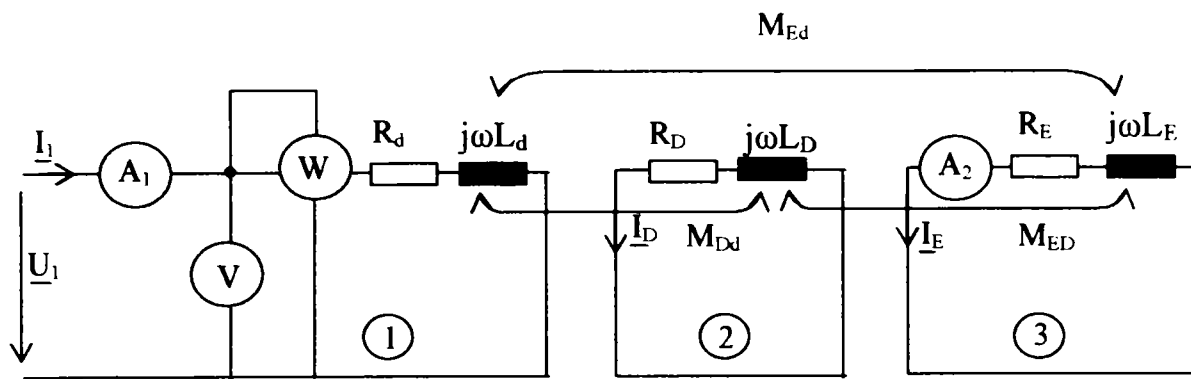


Fig.4.1.3.Schema electrică de calcul după axa d cu excitația în scurtcircuit.

Pentru circuitele 1,2 și 3 se pot scrie ecuațiile:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{I}_1 (R_d + j\omega L_d) - j\omega M_{Dd} \underline{I}_2 - j\omega M_{dE} \underline{I}_E \\ 0 = (R_D + j\omega L_D) \underline{I}_2 + j\omega M_{ED} \underline{I}_E - j\omega M_{Dd} \underline{I}_1 \\ 0 = (R_E + j\omega L_E) \underline{I}_E + j\omega M_{ED} \underline{I}_2 - j\omega M_{dE} \underline{I}_1 \end{cases} \quad (4.3)$$

și se obțin curenții  $\underline{I}_2$  și  $\underline{I}_E$  în funcție de curentul  $\underline{I}_1$ :

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{I}_1 [j\omega M_{Dd} R_E + \omega^2 (-M_{Dd} L_E + M_{ED} M_{dE})]}{R_E R_D + \omega^2 (M_{ED}^2 - L_E L_D) + j\omega (L_E R_D + L_D R_E)} \quad (4.4)$$

$$\underline{I}_E = \frac{\underline{I}_1 [j\omega M_{dE} R_D + \omega^2 (-M_{dE} L_D + M_{ED} M_{Dd})]}{R_E R_D + \omega^2 (M_{ED}^2 - L_E L_D) + j\omega (L_E R_D + L_D R_E)} \quad (4.5)$$

Impedanța circuitului alimentat la tensiunea  $\underline{U}_1$  este:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} = & \frac{R_d R_E R_D + \omega^2 (M_{ED}^2 R_d + M_{dE}^2 R_D + M_{Dd}^2 R_E - L_E L_D R_d - L_E L_d R_D - \\ & - L_D L_d R_E) + j\omega [L_E R_D R_d + L_D R_E R_d + L_d R_E R_D + \omega^2 (M_{ED}^2 L_d + M_{Dd}^2 L_E + M_{dE}^2 L_D - \\ & + \omega^2 (M_{ED}^2 - L_E L_D) + \\ & - L_E L_D L_d - 2M_{ED} M_{dE} M_{Dd})]}{R_E R_D + \\ & + j\omega (L_E R_D + L_D R_E)} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Curentul prin excitație se măsoară cu ampermetrul  $A_2$ , iar cel prin faza "A" se măsoară cu ampermetrul  $A_1$ .

Pătratul valorii impedanței  $Z_1$  prin măsurarea lui  $U_1$  și  $I_1$  este cunoscut și are valoarea:

$$Z_1^2 = \frac{R_d R_D R_E + \omega^2 (M_{ED}^2 R_d + M_{dE}^2 R_D + M_{Dd}^2 R_E - L_E L_D R_d - L_E L_d R_D - L_D L_d R_E)}{[R_E R_D + \omega^2 (M_{ED}^2 - L_E L_D)]^2 + \omega^2 (L_E R_D R_d + L_D R_E R_d + L_d R_E R_D + \omega^2 (M_{ED}^2 L_d + M_{Dd}^2 L_E + \omega^2 (M_{ED}^2 - L_E L_D))^2 + \omega^2 (M_{dE}^2 L_D - L_E L_D L_d - 2M_{ED} M_{dE} M_{Dd})^2} + \omega^2 (L_E R_D + L_D R_E)^2 \quad (4.7)$$

Prin măsurarea puterii active cu wattmetrul se obține rezistența echivalentă a circuitului:

$$R_{e1} = P / I_1^2 \quad (4.8)$$

și din relația impedanței  $Z_1$  se poate scrie:

$$R_{e1} = \frac{R_d R_E^2 R_D^2 + \omega^2 (L_E^2 R_D^2 R_d + L_D^2 R_E^2 R_d + 2M_{ED}^2 R_d R_E R_D + M_{Dd}^2 R_E^2 R_D + \omega^2 (M_{ED}^4 R_d + M_{Dd}^2 R_E M_{ED}^2 + M_{dE}^2 R_D M_{ED}^2 - 2M_{ED}^2 L_E L_D R_d + \omega^2 (M_{ED}^2 - L_E L_D))^2 + L_E^2 L_D^2 R_d + M_{Dd}^2 L_E^2 R_D + M_{dE}^2 L_D^2 R_E - 2M_{ED} M_{dE} M_{Dd} L_E R_D - 2M_{ED} M_{dE} M_{Dd} L_D R_E)}{[R_E R_D + \omega^2 (M_{ED}^2 - L_E L_D)]^2 + \omega^2 (L_E R_D + L_D R_E)^2} \quad (4.9)$$

Relațiile (4.7) și (4.9) sunt independente între ele și formează cele două ecuații din sistemul de 5 ecuații ce-l formăm în necunoscutele  $R_D, L_D, M_{Dd}, M_{dE}$ , și  $M_{ED}$ .

Din relația (4.5) cunoscând pe  $I_E$  și  $I_1$  se obține ecuația (4.10):

$$\left(\frac{I_1}{I_E}\right)^2 = \frac{[R_E R_D + \omega^2 (M_{ED}^2 - L_E L_D)]^2 + \omega^2 (L_E R_D + L_D R_E)^2}{\omega^4 (M_{ED} M_{Dd} - M_{Dd} L_D)^2 + \omega^2 M_{dE}^2 R_D^2} \quad (4.10)$$

b) Se deschide circuitul în excitație și se alimentează faza statorică. Încă două ecuații se obțin prin deschiderea circuitului de excitație ( $I_E = 0$ ), folosind schema electrică dată în figura 4.1.4.

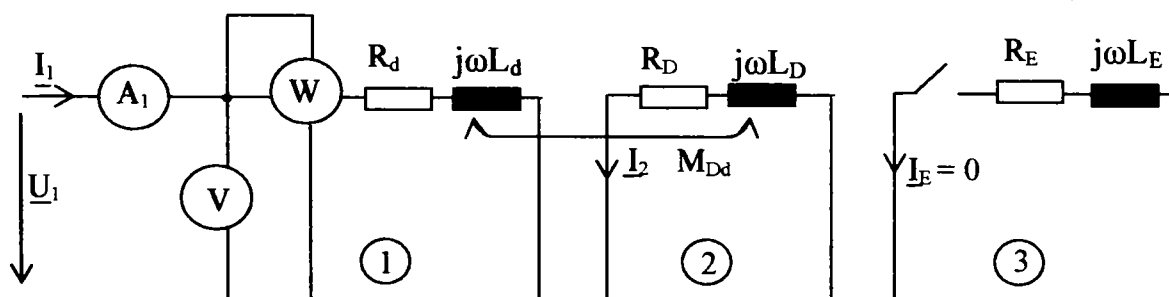


Fig. 4.1.4. Schema electrică de calcul după axa d cu excitația în gol.

Pentru circuitele 1 și 2 se scriu ecuațiile:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{I}_1 (R_d + j\omega L_d) - j\omega M_{Dd} \underline{I}_2 \\ 0 = (R_D + j\omega L_D) \underline{I}_2 - j\omega M_{Dd} \underline{I}_1 \end{cases} \quad (4.11)$$

și se obține curentul  $I_1$ :

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\left[ R_d + \frac{\omega^2 M_{Dd}^2 R_D}{R_D^2 + \omega^2 L_D^2} + j \left( \omega L_d - \frac{\omega^3 M_{Dd}^2 L_D}{R_D^2 + \omega^2 L_D^2} \right) \right]} \quad (4.12)$$

Se poate astfel cunoaște pătratul impedanței echivalente:

$$Z_e^2 = \left| \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} \right|^2 = \left( R_d + \frac{\omega^2 M_{Dd}^2 R_D}{R_D^2 + \omega^2 L_D^2} \right)^2 + \omega^2 \left( L_d - \frac{\omega^2 M_{Dd}^2 L_D}{R_D^2 + \omega^2 L_D^2} \right)^2 \quad (4.13)$$

Relația (4.13) constituie a patra relație din sistemul de ecuații în necunoscutele precizate mai înainte. Ultima ecuație se obține din puterea activă:

$$P = R_e I_1^2 \rightarrow R_e = P / I_1^2 \quad (4.14)$$

și se ajunge la relația:

$$R_e = R_d + \frac{\omega^2 M_{Dd}^2 R_D}{R_D^2 + \omega^2 L_D^2} \quad (4.15)$$

Au rezultat astfel, cinci ecuații (4.7,4.9,4.10,4.13,4.15) cu cinci necunoscute:  $L_D, R_D, M_{Dd}, M_{dE}, M_{ED}$ .

#### 4.1.2. Probe în axa q

a) axa fazei "A" este în cuadratură cu axa polară

Se folosește montajul din figura 4.1.5 și se alimentează faza "A" de la rețea prin intermediul unui autotransformator.

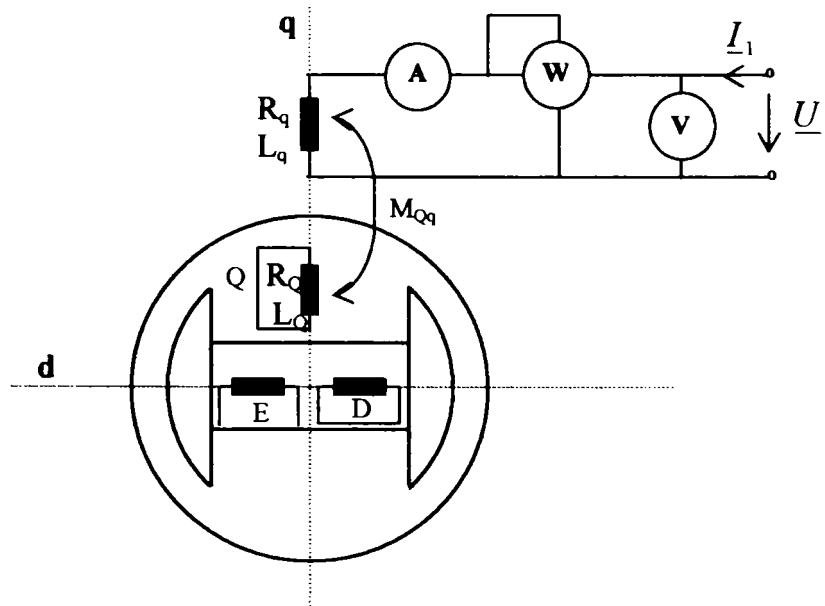


Fig.4.1.5.Măsurători în axa transversală.

La alimentarea fazei "A" ( figura 4.1.5), fazele "B" și "C" fiind în gol se obțin încă două relații între parametrii. Schema electrică echivalentă este dată în figura 4.1.6.

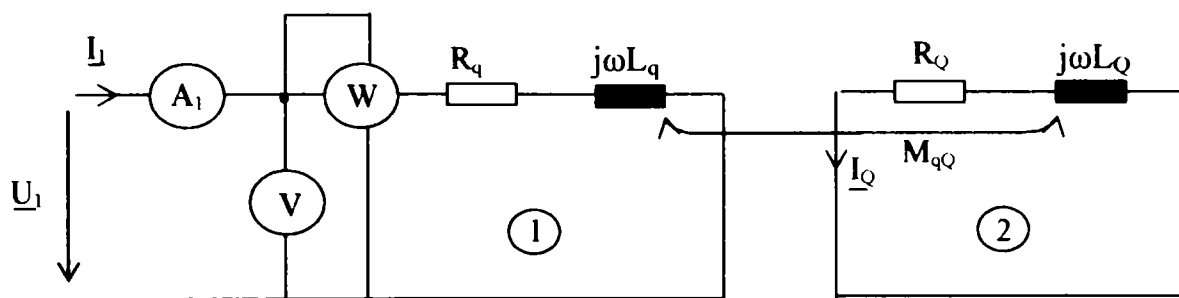


Fig.4.1.6.Schema electrică echivalentă de calcul după axa q.

Pentru cele două circuite 1 și 2 se pot scrie următoarele relații:

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_1(R_q + j \cdot \omega \cdot L_q) - j \cdot \omega \cdot M_{qQ} \cdot \underline{I}_Q \quad (4.16)$$

$$0 = \underline{I}_Q(R_Q + j \cdot \omega \cdot L_Q) - j \cdot \omega \cdot M_{qQ} \cdot \underline{I}_1 \quad (4.17)$$

și rezultă: 
$$\underline{U}_1 = \underline{I}_1 \left( R_q + j \cdot \omega \cdot L_q + \frac{\omega^2 \cdot M_{qQ}^2}{R_Q + j \cdot \omega \cdot L_Q} \right) = \underline{I}_1 \left[ R_q + \frac{\omega^2 \cdot M_{qQ}^2 \cdot R_Q}{R_Q^2 + \omega^2 \cdot L_Q^2} + j \left( \omega L_q - \frac{\omega^3 \cdot M_{qQ}^2 \cdot L_Q}{R_Q^2 + \omega^2 \cdot L_Q^2} \right) \right] \quad (4.18)$$

cu rezistența echivalentă: 
$$R_e = R_q + \frac{\omega^2 \cdot M_{qQ}^2 \cdot R_Q}{R_Q^2 + \omega^2 \cdot L_Q^2} = \frac{P}{I_1^2} \quad (4.19)$$

și reactanța echivalentă: 
$$X_e = \omega L_q - \frac{\omega^3 \cdot M_{qQ}^2 \cdot L_Q}{R_Q^2 + \omega^2 \cdot L_Q^2} = \frac{Q}{I_1^2} \quad (4.20)$$

b) faza A este alimentată și fazele B și C sunt în scurtcircuit

Se folosește montajul din figura 4.1.7 și se alimentează faza “A” de la rețea prin intermediul unui autotransformator în condițiile în care celelalte două faze B și C sunt scurtcircuitate fiecare printr-un ampermetru, respectiv ampermetrele A21 și A22.

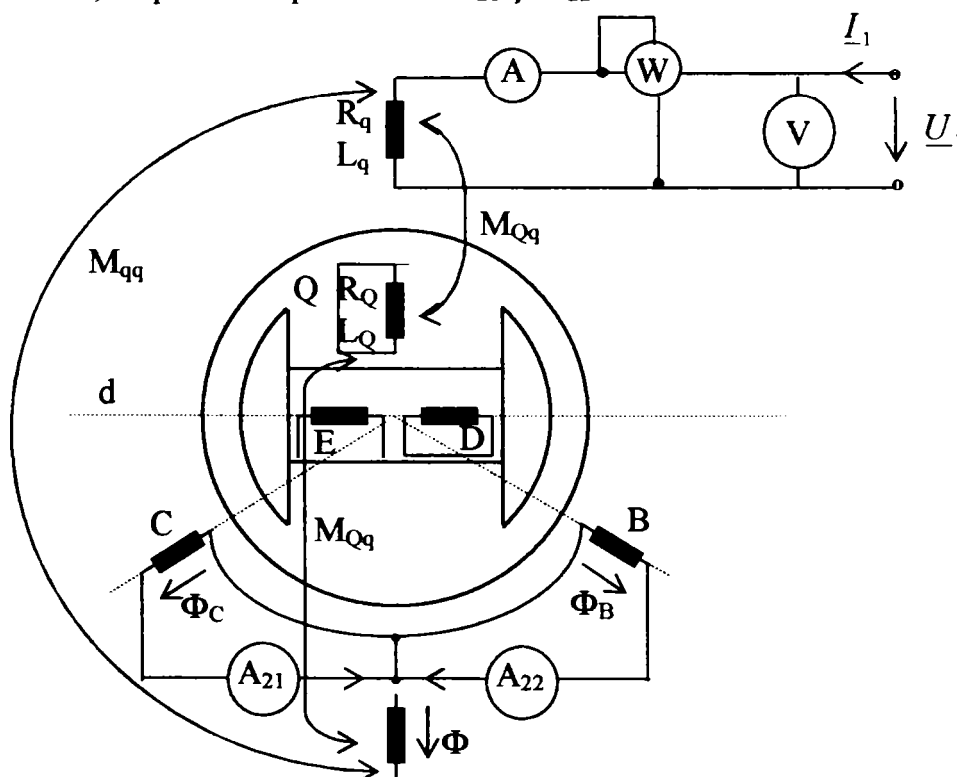


Fig.4.1.7.Măsurători în axa transversală cu fazele B și C scurtcircuitate.

Schema electrică este dată în figura 4.1.8:

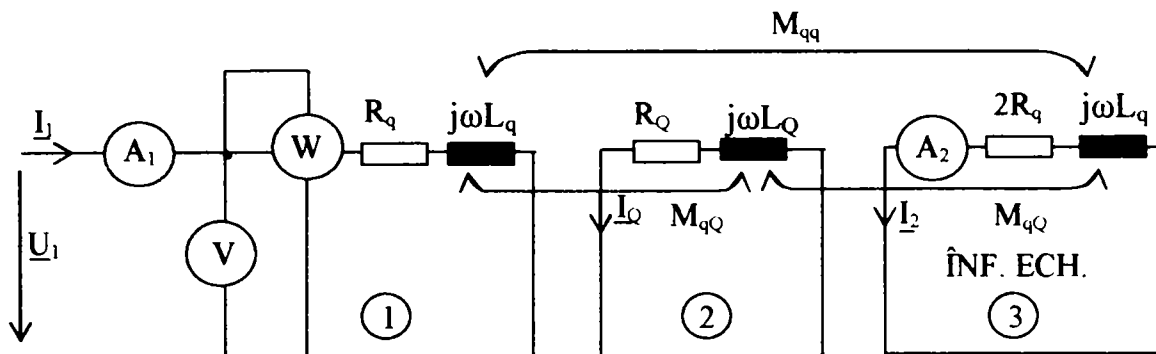


Fig.4.1.8.Schema electrică de calcul după axa q cu fazele nealimentate scurtcircuitate.

Pentru circuitele 1, 2 și 3 se scriu ecuațiile:

$$U_1 = I_1(R_q + j \cdot \omega \cdot L_q) - j \cdot \omega \cdot M_{qQ} \cdot I_2 - j \cdot \omega \cdot M_{qq} \cdot I_2 \quad (4.21)$$

$$0 = (R_Q + j \cdot \omega \cdot L_Q) \cdot I_2 + j \cdot \omega \cdot M_{qQ} \cdot I_2 - j \cdot \omega \cdot M_{qQ} \cdot I_1 \quad (4.22)$$

$$0 = (2R_q + j \cdot \omega \cdot L_q) \cdot I_2 + j \cdot \omega \cdot M_{qQ} \cdot I_2 - j \cdot \omega \cdot M_{qq} \cdot I_1 \quad (4.23)$$

Din sistemul de mai sus se poate scrie:

$$I_2 = \frac{I_1 [j\omega M_{qq} \cdot R_Q + \omega^2 (M_{qQ}^2 - M_{qQ} \cdot L_Q)]}{2R_q \cdot R_Q + \omega^2 (M_{qQ}^2 - L_q \cdot L_Q) + j\omega (L_q \cdot R_Q + L_Q \cdot 2R_q)} \quad (4.24)$$

sau:

$$\left(\frac{I_1}{I_2}\right)^2 = \frac{[2R_q \cdot R_Q + \omega^2 (M_{qQ}^2 - L_q \cdot L_Q)]^2 + \omega^2 (L_q \cdot R_Q + L_Q \cdot 2R_q)^2}{\omega^4 \cdot (M_{qQ}^2 - M_{qQ} L_Q)^2 + \omega^2 \cdot M_{qq}^2 \cdot R_Q^2} \quad (4.25)$$

Pătratul impedanței echivalente se obține prin măsurarea lui  $U_1$  și  $I_1$  și este:

$$\left(\frac{U_1}{I_1}\right)^2 = \frac{[R_q \cdot R_Q \cdot 2R_q + \omega^2 (3M_{qQ}^2 \cdot R_q + M_{qq}^2 \cdot R_Q - 3L_q \cdot L_Q \cdot R_q - L_q^2 \cdot R_Q)]^2 + \omega^2 [3L_q \cdot R_Q \cdot R_q + L_Q \cdot 2R_q \cdot R_q + \omega^2 (2M_{qQ}^2 \cdot L_q + M_{qq}^2 \cdot L_Q - L_q^2 \cdot L_Q - 2M_{qQ} \cdot M_{qq})]^2}{[2R_q \cdot R_Q + \omega^2 (M_{qQ}^2 - L_q \cdot L_Q)]^2 + \omega^2 (L_q \cdot R_Q + L_Q \cdot 2R_q)^2} \quad (4.26)$$

În acest caz s-au obținut două relații între parametrii axei q.

Rezistența înfășurării statorice respectiv rezistența înfășurării de excitație se determină prin măsurare directă iar inductanțele  $L_d$ ,  $L_q$  și  $L_E$  se determină dintr-o probă de stingere a curentului (vezi anexa A-A1,A2).

Cele patru relații (4.19), (4.20), (4.25) și (4.26) formează sistemul de patru ecuații în necunoscutele  $R_Q$ ,  $L_Q$ ,  $M_{Qq}$  și  $M_{qq}$ .

**Precizare:** Având în vedere că au aceeași reluctanță magnetică, între inductanțele corespunzătoare t.e.m. prin pulsație:  $M_{Ed}, M_{Qq}, M_{Dd}$  și cele prin rotație:  $M_{Qd}, M_{Eq}, M_{Dq}$ , există egalitățile[B1]:



$$\begin{aligned} M_{Ed} &= M_{Eq} \\ M_{Qq} &= M_{Qd} \\ M_{Dd} &= M_{Dq} \end{aligned} \quad (4.27)$$

În concluzie, pentru determinarea parametrilor mașinii sincrone considerate, se formează un sistem de 9 ecuații (5 ecuații în axa d: 4.7,4.9,4.10,4.13,4.15 respectiv 4 ecuații în axa q: 4.19,4.20,4.25,4.26) cu 9 necunoscute, de forma:

$$\left\{ \begin{aligned} Z_1^2 &= \frac{[R_d R_D R_E + \omega^2 (M_{ED}^2 R_d + M_{\mathcal{AE}}^2 R_D + M_{Dd}^2 R_E - L_E L_D R_d - L_E L_d R_D - L_D L_d R_E)]^2 + \omega^2 [L_E R_D R_d + L_D R_E R_d + L_d R_E R_D + \omega^2 (M_{ED}^2 L_d + M_{Dd}^2 L_E + \omega^2 (M_{ED}^2 - L_E L_D))]^2 + M_{\mathcal{AE}}^2 L_D - L_E L_D L_d - 2M_{ED} M_{\mathcal{AE}} M_{Dd}}{[R_E R_D + \omega^2 (L_E R_D + L_D R_E)]^2} \\ R_{e1} &= \frac{R_d R_E^2 R_D^2 + \omega^2 (L_E^2 R_D^2 R_d + L_D^2 R_E^2 R_d + 2M_{ED}^2 R_d R_E R_D + M_{Dd}^2 R_E^2 R_D + M_{\mathcal{AE}}^2 R_D^2 R_E) + \omega^4 (M_{ED}^4 R_d + M_{Dd}^2 R_E M_{ED}^2 + M_{\mathcal{AE}}^2 R_D M_{ED}^2 - 2M_{ED}^2 L_E L_D R_d + \omega^2 (M_{ED}^2 - L_E L_D))]^2 + L_E^2 L_D^2 R_d + M_{Dd}^2 L_E^2 R_D + M_{\mathcal{AE}}^2 L_D^2 R_E - 2M_{ED} M_{\mathcal{AE}} M_{Dd} L_E R_D - 2M_{ED} M_{\mathcal{AE}} M_{Dd} L_D R_E}{\omega^2 (L_E R_D + L_D R_E)^2} \\ \left(\frac{I_1}{I_E}\right)^2 &= \frac{[R_E R_D + \omega^2 (M_{ED}^2 - L_E L_D)]^2 + \omega^2 (L_E R_D + L_D R_E)^2}{\omega^4 (M_{ED} M_{Dd} - M_{Dd} L_D)^2 + \omega^2 M_{\mathcal{AE}}^2 R_D^2} \\ Z_e^2 &= \left| \frac{U_1}{I_1} \right|^2 = \left( R_d + \frac{\omega^2 M_{Dd}^2 R_D}{R_D^2 + \omega^2 L_D^2} \right)^2 + \omega^2 \left( L_d - \frac{\omega^2 M_{Dd}^2 L_D}{R_D^2 + \omega^2 L_D^2} \right)^2 \\ R_{ed} &= R_d + \frac{\omega^2 M_{Dd}^2 R_D}{R_D^2 + \omega^2 L_D^2} \\ R_{eq} &= R_q + \frac{\omega^2 \cdot M_{qQ}^2 \cdot R_Q}{R_Q^2 + \omega^2 \cdot L_Q^2} = \frac{P}{I_1^2} \\ X_e &= \omega L_q - \frac{\omega^3 \cdot M_{qQ}^2 \cdot L_Q}{R_Q^2 + \omega^2 \cdot L_Q^2} = \frac{Q}{I_1^2} \\ \left(\frac{I_1}{I_2}\right)^2 &= \frac{[2R_q \cdot R_Q + \omega^2 (M_{qQ}^2 - L_q \cdot L_Q)]^2 + \omega^2 (L_q \cdot R_Q + L_Q \cdot 2R_q)^2}{\omega^4 \cdot (M_{qQ}^2 - M_{qQ} L_Q)^2 + \omega^2 \cdot M_{qq}^2 \cdot R_Q^2} \\ \left(\frac{U_1}{I_1}\right)^2 &= \frac{[R_q \cdot R_Q \cdot 2R_q + \omega^2 (3M_{qQ}^2 \cdot R_q + M_{qq}^2 \cdot R_Q - 3L_q \cdot L_Q \cdot R_q - L_q^2 \cdot R_Q)]^2 + [2R_q \cdot R_Q + \omega^2 (M_{qQ}^2 - L_q \cdot L_Q)]^2 + \omega^2 [3L_q \cdot R_Q \cdot R_q + L_Q \cdot 2R_q \cdot R_q + \omega^2 (2M_{qQ}^2 \cdot L_q + M_{qq}^2 \cdot L_Q - L_q^2 \cdot L_Q - 2M_{qQ}^2 \cdot M_{qq})]^2}{[2R_q \cdot R_Q + \omega^2 (M_{qQ}^2 - L_q \cdot L_Q)]^2 + \omega^2 (L_q \cdot R_Q + L_Q \cdot 2R_q)^2} \\ R_d = R_q &= 1,6[\Omega]; R_E = 41,3[\Omega]; L_d = 0,0795859 [H]; L_q = 0,067[H]; L_E = 18,514[H]; \omega = 314[s^{-1}]; \\ Z_1 &= 4,8[\Omega]; R_{e1} = 2,2[\Omega]; I_1 / I_E = 21,739135; Z_e = 12,5[\Omega]; R_{ed} = 6,4[\Omega]; R_{eq} = 2,974[\Omega]; \\ X_e &= 17,311[\Omega]; I_1 / I_2 = 5/4; U_1 / I_1 = 54/5[\Omega] \end{aligned} \right.$$

(4.28)

Sistemul de ecuații algebrice (4.28) este un sistem puternic neliniar de ordinul 8 care nu poate fi soluționat decât cu un soft specializat.

În urma soluționării cu ajutorul programului Mathematica 4.0, se obține o soluție multiplă formată din soluții complexe și reale (pozitive și negative). Dintre toate aceste soluții, evident după înlăturarea soluțiilor complexe respectiv a celor reale negative, pe baza celor prezentate în capitolul 3 paragraful 3.1 (vezi relațiile 3.11), se alege(identifică) următoarea soluție reală pozitivă (și unică în sensul îndeplinirii condițiilor 3.11):

$$\begin{aligned}
 R_D &= 7,9525[\Omega]; \\
 L_D &= 0,0673[H]; \\
 M_{Dd} &= 0,05587[H]; \\
 M_{ED} &= 0,6216[H]; \\
 M_{Ed} &= 1,21489[H]; \\
 R_Q &= 30,2247[\Omega]; \\
 L_Q &= 0,25844[H]; \\
 M_{Qq} &= 0,05878[H]; \\
 M_{qq} &= 0,047[H].
 \end{aligned}
 \tag{4.29}$$

**Precizare:** Având în vedere că au aceeași reluctanță magnetică, între inductanțele corespunzătoare tensiunilor electromotoare induse prin pulsație și cele induse prin rotație există următoarele relații:

$$\begin{aligned}
 M_{Ed} &= M_{Eq} \stackrel{\text{not}}{=} M_E \\
 M_{Qq} &= M_{Qd} \stackrel{\text{not}}{=} M_Q \\
 M_{Dd} &= M_{Dq} \stackrel{\text{not}}{=} M_D
 \end{aligned}
 \tag{4.30}$$

#### 4.2.Determinarea parametrilor mașinii sincrone pe baza datelor de catalog și a geometriei mașinii

Pe baza cunoașterii mărimilor de catalog (inclusiv a constantelor de timp) ale mașinii sincrone și a geometriei acesteia, se pot determina parametrii mașinii prin intermediul relațiilor de legătură dintre aceștia și constantele de timp, relații care se constituie într-un sistem de ecuații algebric a cărui soluție reală pozitivă se poate determina, ea fiind unică pentru mașina sincronă considerată.

Ecuatiile rotorice ale mașinii sincrone cu excitația alimentată în curent continuu sunt:

$$\begin{cases}
 I_E R_E - U_E = -\frac{d\psi_E}{dt} \rightarrow \text{circuitul de excitație} \\
 I_D R_D = -\frac{d\psi_D}{dt} \rightarrow \text{circuitul de amortizare din axa „d”} \\
 I_Q R_Q = -\frac{d\psi_Q}{dt} \rightarrow \text{circuitul de amortizare din axa „q”}
 \end{cases}
 \tag{4.31}$$

și în operațional devin:

$$\begin{cases} I_E R_E - \frac{U_E}{p} = -p\psi_E \\ I_D R_D = -p\psi_D \\ I_Q R_Q = -p\psi_Q \end{cases} \quad (4.32)$$

Deoarece fluxurile rotorice  $\psi_E, \psi_D, \psi_Q$  au forma:

$$\begin{aligned} \psi_E &= L_E I_E + M_{Ed} I_d + M_{ED} I_D \\ \psi_D &= L_D I_D + M_{Dd} I_d + M_{ED} I_E \\ \psi_Q &= L_Q I_Q + M_{Qq} I_q \end{aligned} \quad (4.33)$$

ecuațiile rotorice devin:

$$\begin{cases} I_E p M_{ED} + I_D (R_D + p L_D) = -p M_{Dd} I_d \\ I_E (R_E + p L_E) + I_D p M_{ED} = \frac{U_E}{p} - p M_{Ed} I_d \\ I_Q (R_Q + p L_Q) = -p M_{Qq} I_q \end{cases} \quad (4.34)$$

și se obțin astfel curenții  $I_E, I_D, I_Q$  sub forma:

$$\begin{cases} I_E = \frac{p^2 (M_{ED} M_D - M_E L_D) I_d - p R_D M_E I_d + L_D U_E + R_D U_E / p}{p^2 (L_D L_E - M_{ED}^2) + p (R_D L_E + R_E L_D) + R_D R_E} \\ I_D = \frac{p^2 (M_{ED} M_E - M_D L_E) I_d - p R_E M_D I_d - M_{ED} U_E}{p^2 (L_D L_E - M_{ED}^2) + p (R_D L_E + R_E L_D) + R_D R_E} \\ I_Q = \frac{-p M_{Qq} I_q}{R_Q + p L_Q} \end{cases} \quad (4.35)$$

Cu aceste valori pentru curenții rotorici, fluxurile statorice  $\psi_{dp}$  și  $\psi_{qp}$  sunt:

$$\begin{cases} \psi_{dp} = L_d I_d + M_E I_E + M_D I_D \\ \psi_{qp} = L_q I_q + M_Q I_Q \end{cases} \quad (4.36)$$

și, prin înlocuire din (4.35) în (4.36), se pun sub forma:

$$\begin{aligned} \psi_{dp} &= \left\{ \frac{p^2 [(L_D L_E - M_{ED}^2) L_d + M_E (M_{Ed} M_D - M_E L_D) + M_D (M_{ED} M_E - M_D L_E)]}{p^2 (L_D L_E - M_{ED}^2) + p (R_D L_E + R_E L_D) + R_D R_E} + \right. \\ &+ \frac{p [(R_D L_E + R_E L_D) L_d - R_D M_E^2 - R_E M_D^2]}{p^2 (L_D L_E - M_{ED}^2) + p (R_D L_E + R_E L_D) + R_D R_E} + \\ &+ \left. \frac{L_d R_D R_E}{p^2 (L_D L_E - M_{ED}^2) + p (R_D L_E + R_E L_D) + R_D R_E} \right\} \cdot I_d + \\ &+ \frac{M_E L_D + M_E R_D / p - M_D M_{ED}}{p^2 (L_D L_E - M_{ED}^2) + p (R_D L_E + R_E L_D) + R_D R_E} U_E, \\ \psi_{qp} &= \frac{p (L_q L_Q - M_{Qq}^2) + R_Q L_q}{R_Q + p L_Q} I_q \end{aligned} \quad (4.37)$$

Fluxurile se pot pune sub următoarea formă[B4]:

$$\begin{cases} \psi_d = L_{d(p)}I_d + G_{(p)}U_E \\ \psi_q = L_{q(p)}I_q \end{cases} \quad (4.38)$$

rezultând astfel:

$$\begin{aligned} L_{d(p)} &= \frac{p^2 \left[ (L_D L_E - M_{ED}^2) L_d + M_E (M_{Ed} M_D - M_E L_D) + M_D (M_{ED} M_E - M_D L_E) \right]}{p^2 (L_D L_E - M_{ED}^2) + p(R_D L_E + R_E L_D) + R_D R_E} + \\ &+ \frac{p \left[ (R_D L_E + R_E L_D) L_d - R_D M_E^2 - R_E M_D^2 \right]}{p^2 (L_D L_E - M_{ED}^2) + p(R_D L_E + R_E L_D) + R_D R_E} + \\ &+ \frac{L_d R_D R_E}{p^2 (L_D L_E - M_{ED}^2) + p(R_D L_E + R_E L_D) + R_D R_E}, \quad (4.39) \\ G_{(p)} &= \frac{M_E L_D + M_E R_D / p - M_D M_{ED}}{p^2 (L_D L_E - M_{ED}^2) + p(R_D L_E + R_E L_D) + R_D R_E}, \\ L_{q(p)} &= \frac{p(L_q L_Q - M_{Qq}^2) + R_Q L_q}{R_Q + pL_Q} \end{aligned}$$

Deoarece constantele de timp sunt[B4],[D1]:

$$L_{d(p)} = \frac{L_d \overbrace{(1 + T_d p)}^{p_5 = -1/T_d} \overbrace{(1 + T_d p)}^{p_6 = -1/T_d}}{\underbrace{(1 + T_{d0} p)}_{p_1 = -1/T_{d0}} \underbrace{(1 + T_{d0} p)}_{p_2 = -1/T_{d0}}} \quad (4.40)$$

$$L_{q(p)} = \frac{\overbrace{L_q + L_q T_q p}^{p_6 = -1/T_q}}{\underbrace{1 + T_{q0} p}_{p_3 = -1/T_{q0}}} \quad (4.41)$$

$$G_{(p)} = \frac{\overbrace{M_d (1 + T_D p)}^{p_4 = -1/T_D}}{R_E (1 + T_{d0} p) (1 + T_{d0} p)} \quad (4.42)$$

sau

$$T_d = -1/p_6; T_d = -1/p_5; T_{d0} = -1/p_2; T_{d0} = -1/p_1; T_q = -1/p_6; T_{q0} = -1/p_3; T_D = -1/p_4; \quad (4.43)$$

rezultă că  $T_{d0}, T_{d0}$  se pot calcula din rădăcinile ecuației:

$$p^2 (L_D L_E - M_{ED}^2) + p(R_D L_E + R_E L_D) + R_D R_E = 0 \quad (4.44)$$

$$p_{1,2} = \frac{-(R_D L_E + L_D R_E) \pm \sqrt{(R_D L_E - L_D R_E)^2 + 4R_E R_D M_{ED}^2}}{2(L_D L_E - M_{ED}^2)} \quad (4.45)$$

$$T_{d0}' = \frac{2(L_D L_E - M_{ED}^2)}{R_D L_E + R_E L_D - \sqrt{(R_D L_E - R_E L_D)^2 + 4R_D R_E M_{ED}^2}}$$

$$T_{d0}'' = \frac{2(L_D L_E - M_{ED}^2)}{R_D L_E + R_E L_D + \sqrt{(R_D L_E - R_E L_D)^2 + 4R_D R_E M_{ED}^2}}$$
(4.46)

În mod asemănător, rezultă și  $T_q''$  și  $T_{q0}''$ :

$$T_q'' = \frac{L_q L_Q - M_{Qq}^2}{R_Q L_q}$$

$$T_{q0}'' = \frac{L_Q}{R_Q}$$
(4.47)

Constantele de timp  $T_d''$  și  $T_d'$  se obțin din rădăcinile ecuației de la numărătorul expresiei lui  $L_{d(p)}$  din (4.39) care este:

$$p^2[(L_D L_E - M_{ED}^2)L_d + M_E(M_{ED}M_D - M_E L_D) + M_D(M_{ED}M_E - M_D L_E)] + p[(R_D L_E + R_E L_D)L_d - R_D M_E^2 - R_E M_D^2] + L_d R_D R_E = 0$$
(4.48)

cu soluțiile  $p_{5,6}$ .

$$T_d' = \frac{2[(L_D L_E - M_{ED}^2)L_d + M_E(M_{ED}M_D - M_E L_D) + M_D(M_{ED}M_E - M_D L_E)]}{(R_D L_E + R_E L_D)L_d - R_D M_E^2 - R_E M_D^2 - \sqrt{A}}$$
(4.49)

$$T_d'' = \frac{2[(L_D L_E - M_{ED}^2)L_d + M_E(M_{ED}M_D - M_E L_D) + M_D(M_{ED}M_E - M_D L_E)]}{(R_D L_E + R_E L_D)L_d - R_D M_E^2 - R_E M_D^2 + \sqrt{A}}$$

unde

$$A = R_D^2(L_E L_d - M_E^2)^2 + R_E^2(L_D L_d - M_D^2)^2 + 2(L_D L_d + M_D^2)(L_E L_d + M_E^2)R_D R_E + 4R_D R_E L_d^2(M_{ED}^2 - L_D L_E) - 8M_{ED}M_E M_D L_d R_D R_E$$
(4.50)

Constanta de timp  $T_D$  se obține din anularea numărătorului lui  $G_{(p)}$  din (4.39), rezultând:

$$T_D = \frac{M_E L_D - M_{ED} M_D}{R_D M_E}$$
(4.51)

Inductanțele standard  $L_d'', L_q'', L_d$  și  $L_q$  sunt următoarele[B4]:

- inductanța tranzitorie longitudinală  $L_d''$ :

$$L_d'' = \lim_{p \rightarrow \infty} L_{d(p)} = \frac{L_d T_d' T_d''}{T_{d0}' T_{d0}''}$$

$$p \rightarrow \infty$$

$$(t \rightarrow 0)$$
(4.52)

- inductanța tranzitorie transversală:

$$L_q'' = \lim_{\substack{p \rightarrow \infty \\ (t \rightarrow 0)}} L_{q(p)} = \frac{L_q T_q''}{T_{q0}} \quad (4.53)$$

- inductanța sincronă longitudinală:

$$L_d = \lim_{\substack{p \rightarrow 0 \\ (t \rightarrow \infty)}} L_{d(p)} \quad (4.54)$$

- inductanța sincronă transversală:

$$L_q = \lim_{\substack{p \rightarrow 0 \\ (t \rightarrow \infty)}} L_{q(p)} \quad (4.55)$$

Fiind date constantele de timp (4.2) și fiind cunoscuți parametrii  $R_d, R_q, L_d, L_q, R_E, L_E, M_E$ , se pune problema determinării parametrilor  $R_D, R_Q, L_D, L_Q, M_D, M_Q$  și  $M_{ED}$  (din rotor, la care nu avem acces pe la borne).

Din relația constantei de timp  $T_d'$ , cu următoarele notații:

$$\begin{aligned} a &= \left[ (L_D L_E - M_{ED}^2) L_d + M_E (M_{ED} M_D - M_E L_D) + M_D (M_{ED} M_E - M_D L_E) \right] \\ b &= (R_D L_E + R_E L_D) L_d - R_D M_E^2 - R_E M_D^2; \\ c &= R_D R_E L_d \end{aligned} \quad (4.56)$$

rezultă

$$\begin{aligned} T_d' &= \frac{2a}{b - \sqrt{b^2 - 4ac}} = \frac{1}{\frac{b}{2a} - \sqrt{\left(\frac{b}{2a}\right)^2 - \frac{c}{a}}}; \\ \frac{b}{2a} - \sqrt{\left(\frac{b}{2a}\right)^2 - \frac{c}{a}} &= \frac{1}{T_d'}; \\ \frac{b}{T_d' \cdot a} - \frac{c}{a} &= \frac{1}{T_d'^2}; \\ T_d' \cdot b - T_d'^2 \cdot c &= a \end{aligned} \quad (4.57)$$

În ultima relație din (4.57), înlocuind notațiile făcute, rezultă prima ecuație a sistemului în axa d:

$$\begin{aligned} (L_D L_E - M_{ED}^2) L_d + M_E (M_{ED} M_D - M_E L_D) + M_D (M_{ED} M_E - M_D L_E) &= \\ = T_d' \left[ (R_D L_E + R_E L_D) L_d - R_D M_E^2 - R_E M_D^2 \right] - T_d'^2 R_D R_E L_d; \end{aligned} \quad (4.58)$$

Din relația constantei  $T_d''$ , cu notațiile de mai sus, rezultă expresia:

$$T_d'' \cdot b - T_d''^2 \cdot c = a. \quad (4.59)$$

În relația (4.59), înlocuind notațiile făcute mai sus, rezultă a doua ecuație a sistemului în axa longitudinală d:

$$\begin{aligned} & (L_D L_E - M_{ED}^2) L_d + M_E (M_{ED} M_D - M_E L_D) + M_D (M_{ED} M_E - M_D L_E) = \\ & = T_d'' [(R_D L_E + R_E L_D) L_d - R_D M_E^2 - R_E M_D^2] - T_d'' R_D R_E L_d. \end{aligned} \quad (4.60)$$

În relația constantei de timp  $T_{d0}'$ , cu următoarele notații, rezultă:

$$\begin{aligned} a_1 &= L_D L_E - M_{ED}^2; \\ b_1 &= R_E L_D + R_D L_E; \\ c_1 &= R_E R_D \end{aligned} \quad (4.61)$$

$$T_{d0}' = \frac{2a_1}{b_1 - \sqrt{b_1^2 - 4a_1 c_1}} = \frac{1}{\frac{b_1}{2a_1} - \sqrt{\left(\frac{b_1}{2a_1}\right)^2 - \frac{c_1}{a_1}}}$$

$$T_{d0}' \cdot b_1 - T_{d0}'^2 \cdot c_1 = a_1 \quad (4.62)$$

În relația (4.62), introducând notațiile făcute, rezultă a treia ecuație a sistemului în axa d:

$$L_E L_D - M_{ED}^2 = T_{d0}' (R_E L_D + R_D L_E) - T_{d0}'^2 R_E R_D. \quad (4.63)$$

În relația constantei de timp  $T_{d0}''$ , cu aceleași notații, avem:

$$T_{d0}'' = \frac{2a_1}{b_1 + \sqrt{b_1^2 - 4a_1 c_1}} = \frac{1}{\frac{b_1}{2a_1} + \sqrt{\left(\frac{b_1}{2a_1}\right)^2 - \frac{c_1}{a_1}}}, \quad (4.64)$$

$$T_{d0}'' \cdot b_1 - T_{d0}''^2 \cdot c_1 = a_1 \quad (4.65)$$

În relația (4.65), cu notațiile făcute, rezultă a patra ecuație a sistemului în axa d:

$$L_E L_D - M_{ED}^2 = T_{d0}'' (R_E L_D + R_D L_E) - T_{d0}''^2 R_E R_D \quad (4.66)$$

A cincea ecuație a sistemului în axa d, rezultă din expresia constantei de timp  $T_D$ :

$$L_E M_E - M_D M_{ED} = T_D R_D M_E \quad (4.67)$$

În axa q, ecuațiile sistemului rezultă din expresiile constantelor de timp  $T_q''$  și  $T_{q0}''$ , astfel:

$$\begin{aligned} L_Q L_q - M_Q^2 &= T_q'' R_Q L_q, \\ L_Q &= T_{q0}'' R_Q. \end{aligned} \quad (4.68)$$

Introducând valorile parametrilor cunoscuți în ecuațiile (4.58), (4.60), (4.63), (4.66) și (4.67),

$$\text{rezultă sistemul: } \begin{cases} -1,28 \cdot 10^{-4} L_D - 0,08 M_{ED}^2 + 2,2 M_{ED} M_D - 0,01 R_D = 15,12 M_D^2 \\ 0,25 L_D - 0,08 M_{ED}^2 + 2,2 M_{ED} M_D - 1,2 \cdot 10^{-3} R_D = 18,31 M_D^2 \\ -0,07 L_D - M_{ED}^2 = -0,03 R_D \\ 18,24 L_D - M_{ED}^2 = 0,12 R_D \\ M_{ED} M_D = 1,1 L_D - 6,16 \cdot 10^{-3} R_D \end{cases} \quad (4.69)$$

Rezolvând sistemul (4.69) rezultă următoarele valori pentru parametrii mașinii sincrone în axa d:

$$\begin{aligned} L_D &= 0,0638364[H] \\ R_D &= 7,54927[\Omega] \\ M_{ED} &= 0,675971[H] \\ M_D &= 0,042014[H] \\ M_E &= 1,1[H] \end{aligned} \quad (4.70)$$

Pentru determinarea parametrilor din axa q se rezolvă sistemul format de relațiile (4.68):

$$\begin{cases} 0,07L_Q - M_Q^2 = 7,09 \cdot 10^{-3} \cdot 0,07R_Q \\ L_Q = 8,27 \cdot 10^{-3} R_Q \end{cases} \quad (4.71)$$

Sistemul (4.71) are două ecuații cu trei necunoscute:  $R_Q, L_Q$  și  $M_Q$ .

Pentru rezolvarea sistemului (4.71) este necesar ca unul din parametrii, de exemplu  $L_Q$ , să fie determinat din dimensiunile geometrice ale mașinii, date de firma producătoare.

Pe baza dimensiunilor geometrice date la începutul capitolului (figura 4.1.1) rezultă reluctanța magnetică a înfășurării de amortizare Q:

$$R_{m2} = \frac{N \cdot I}{\Phi} = \frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,3 \cdot 37,1} = 71534,44 [A/Wb] \quad (4.72)$$

unde:

$$\Phi = \mu_0 N I I_{MS} \cdot \left[ \arcsin \frac{a}{R} + \frac{b}{\sqrt{4R^2 - b^2}} \ln \left| \frac{\frac{a}{\sqrt{4R^2 - a^2}} + \sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}}}{\frac{a}{\sqrt{4R^2 - a^2}} - \sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}}} \right| \right] \quad (4.73)$$

Expresia (4.73) a fost dedusă în anexa B-B1-B5 (relația b25).

Inductanța înfășurării de amortizare  $L_Q$  va fi:

$$L_Q = \frac{N^2}{R_{m2}} = \frac{134^2}{71534,44} = 0,25 [H] \quad (4.74)$$

Cunoscând inductanța  $L_Q$ , calculată din dimensiunile geometrice ale mașinii, se pot determina ceilalți parametri din axa q, rezolvând sistemul:

$$\begin{cases} 0,07 \cdot 0,25 - M_Q^2 = 6,94478 \cdot 10^{-3} \cdot 0,07 \cdot R_Q \\ 0,25 = 8,27 \cdot 10^{-3} \cdot R_Q \end{cases} \quad (4.75)$$

Rezolvând sistemul (4.75) rezultă valorile parametrilor necunoscuți ai mașinii sincrone în axa q:

$$\begin{aligned} R_Q &= 30,2 [\Omega] \\ M_Q &= 0,032232 [H] \end{aligned} \quad (4.76)$$

### 4.3. Determinarea parametrilor mașinii sincrone în regim staționar din probele de gol respectiv scurtcircuit

În regim staționar, mașina sincronă are următorii parametri:

- $R_d = R_q = R$  - (rezistența fazei se măsoară direct - vezi anexa A1);
- $L_d$  - inductanța proprie longitudinală;
- $L_q$  - inductanța proprie transversală;
- $M_E$  - inductanța mutuală dintre înfășurarea indusului q și înfășurarea de excitație E, coprespunzătoare t.e.m. induse prin rotație.

Inductanța mutuală  $M_E$  se determină dintr-o probă de gol, mașina sincronă funcționând în paralel cu rețeaua de tensiune  $U$  și frecvență  $f$  pentru  $I_d = I_q = 0$  la  $I_E = I_E^*$  și deci:

$$U = U_{eE} \quad (4.77)$$

sau

$$U_q = \omega M_E I_E^* \quad (4.78)$$



obținându-se:

$$M_E = \frac{U\sqrt{3}}{\omega I_E^*} \quad (4.79)$$

unde:  $U$  - tensiunea pe fază la mașina sincronă reală măsurată cu voltmetrul V.

$I_E^*$  - curentul prin excitație măsurat cu ampermetrul AE.

$\omega = 2\pi f$  ( $f$  - frecvența tensiunii de alimentare).

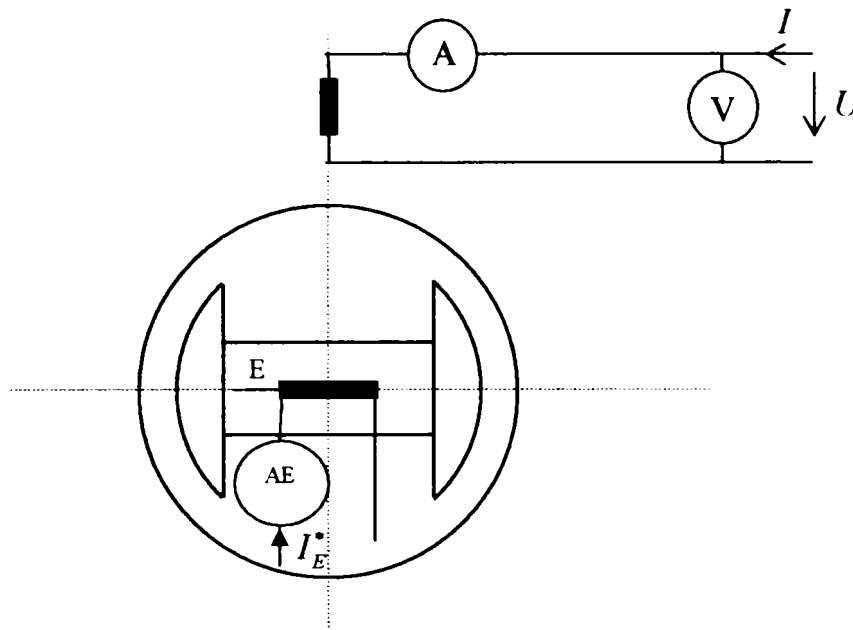


Fig.4.3.1.Proba de gol a mașinii sincrone pentru determinarea lui  $M_E$ .

La mașina sincronă considerată în lucrare, la  $U = 220V$ ,  $f = 50Hz$ , la gol s-a măsurat  $I_E^* = 1A$ . Inductanța  $M_E$  are valoarea:

$$M_E = \frac{U\sqrt{3}}{\omega I_E^*} = \frac{220 \cdot \sqrt{3}}{2\pi \cdot 50 \cdot 1} = 1,2[H] \quad (4.80)$$

Inductanța proprie  $L_d$  se determină tot dintr-o probă de gol cu  $I_d \neq 0$  în sensul următor:

$$L_d = \frac{U \cos\theta - U_{eE}}{\omega L_d} = \frac{U - U_{eE}}{\omega L_d} \quad (4.81)$$

sau

$$L_d = \frac{U - U_{eE}}{\omega I_d} = \frac{\sqrt{3}U_0 - \sqrt{3}U_{eE0}}{\omega \sqrt{3}I_0} = \frac{U_0 - U_{eE0}}{\omega I_0} \quad (4.82)$$

obținându-se:

$$L_d = \frac{|U_0 - U_{eE0}|}{\omega I_0} \quad (4.83)$$

unde:

$U_0$  - tensiunea rețelei (măsurată cu voltmetrul V);

$I_0$  - curentul măsurat cu ampermetrul A;

$U_{eE0}$  - tensiunea la borne imediat după deconectarea (deschiderea lui K) de la rețea a mașinii sincrone, măsurată cu voltmetrul V (se presupune că turația mașinii se menține aceeași imediat după deschiderea lui K).

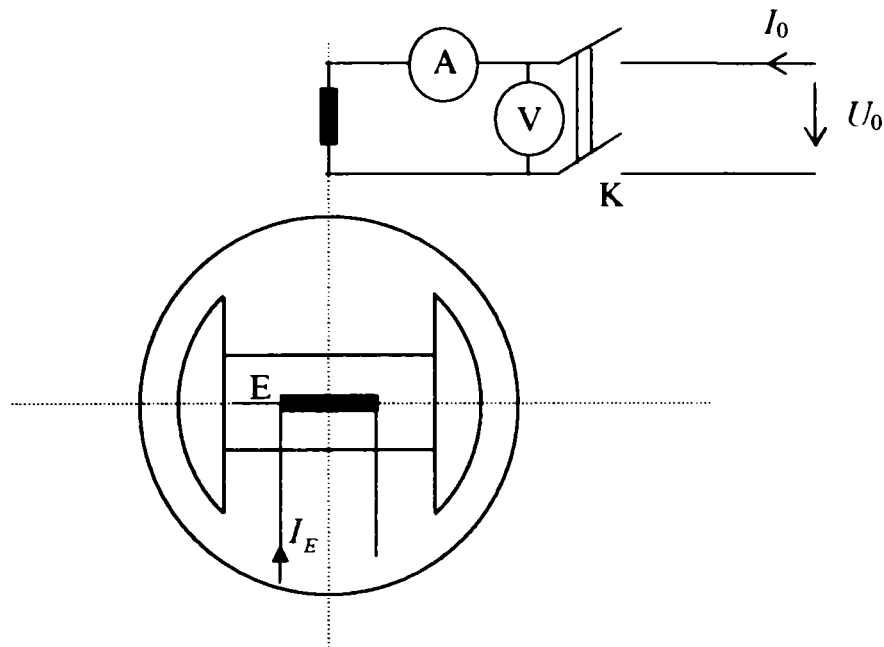


Fig.4.3.2.Proba de gol a mașinii sincrone pentru determinarea lui  $L_d$ .

La mașina sincronă considerată în lucrare inductanța proprie  $L_d$  are valoarea:

$$L_d = \frac{|U_0 - U_{eE0}|}{\omega I_0} = 0,08[H] \quad (4.84)$$

Inductanța proprie  $L_q$  se poate determina dintr-o probă de scurtcircuit, prin rezolvarea

sistemului:

$$\begin{cases} 0 = R_d I_d - \omega L_q I_q \\ 0 = \omega L_d I_d + R_q I_q + \omega M_E I_E \\ I^2 = I_d^2 + I_q^2 \end{cases} \quad (4.85)$$

curenții  $I_E$  și  $I$  fiind măsurați de ampermetrele AE respectiv A din următoarea figură:

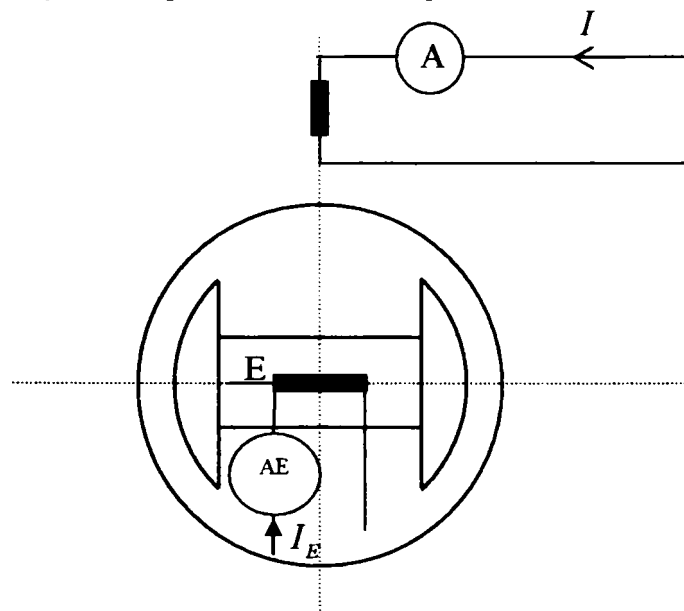


Fig.4.3.3.Proba de scurtcircuit a mașinii sincrone pentru determinarea lui  $L_q$ .

La mașina sincronă considerată, cu  $L_d = 0,08[H]$ ,  $M_E = 1,2[H]$ , anterior determinate, la scurtcircuit s-au măsurat curenții:

$$I = \frac{5}{\sqrt{3}} = 2,9[A] \text{ și } I_E = \frac{0,334}{\sqrt{3}} = 0,193[A]. \quad (4.86)$$

$$(I_{\text{mod el}} = 5[A], I_{E \text{ mod el}} = 0,334[A]) \quad (4.87)$$

Din rezolvarea sistemului:

$$\begin{cases} 0 = 1,6I_d - 314L_q I_q \\ 0 = 314 \cdot 0,08I_d + 1,6I_q + 314 \cdot 1,2 \cdot 0,334 \\ 25 = I_d^2 + I_q^2 \end{cases} \quad (4.88)$$

s-au obținut valorile:

$$\begin{aligned} L_q &= 0,07[H] \\ I_d &= -4,98[A], I_q = -0,36[A] \end{aligned} \quad (4.89)$$

#### 4.4.Determinarea momentului de inerție axial

Pe lângă parametrii mașinilor electrice sincrone din sistemele de acționare electrică un alt parametru important care caracterizează sistemul de acționare electrică în ansamblu este momentul de inerție axial.

Pentru mașinile electrice fabricate de un anumit producător, de obicei, momentul de inerție axial se dă alături de celelalte date de catalog, așa cum se poate observa și în datele de catalog ale mașini sincrone considerate în lucrarea de față.

Determinarea momentelor de inerție se face prin calcul, sau experimental. Dacă se cunosc dimensiunile geometrice ale corpurilor, momentul de inerție axial se poate determina prin calcul analitic. Calculul analitic fiind uneori foarte laborios, sau dacă dimensiunile geometrice ale corpurilor nu se cunosc, se folosesc metode experimentale, sau se mai pot utiliza relații empirice sau diagrame date de firmele constructoare.

În cazul frecvent întâlnit în acționări, al corpurilor în mișcare de rotație, momentul de inerție axial se calculează cu ajutorul următoarelor relații[S1]:

$$J = \int r^2 dm \quad (4.90)$$

sau

$$J = \sum_{x=1}^k m_x r_x^2 \quad (4.91)$$

unde:

$dm, m_x$  - masa elementelor de volum infinitezimal respectiv finit mic, situate la distanțele  $r$ , respectiv  $r_x$  de axă.

Considerând că masa totală  $m$  este concentrată într-un punct situat la distanța  $r$  față de axa de rotație, astfel aleasă, încât

$$J = mr^2 = m \left( \frac{D}{2} \right)^2 = \frac{GD^2}{4g} \quad (4.92)$$

se definesc următoarele mărimi de calcul:

$r$  - raza de inerție

$D$  - diametrul de inerție

Știind că forța de greutate este dată de expresia:

$$G = mg \quad (4.93)$$

unde  $g = 9,81m/s^2$ , se definește momentul de girație sau de volant:

$$GD^2 = 4gJ \quad (4.94)$$

Cunoscându-se momentul de inerție axial, ecuația fundamentală a mișcării este următoarea:

$$M - M_R = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (4.95)$$

unde:  $M$  -cuplul electromagnetic

$M_R$  -cuplul rezistent

$\Omega = \frac{2\pi n}{60}$  - viteza unghiulară mecanică

În calculele practice, momentul de inerție axial al rotorului unei mașini electrice se determină descompunându-l în componente de forme geometrice simple, pentru care momentele de inerție se pot calcula ușor sau sunt date direct în tabele, urmând ca momentul de inerție al rotorului să se obțină însumând momentele de inerție ale componentelor.

Printre metodele experimentale de determinare a momentului de inerție axial sunt următoarele[S1]:

1. *Metoda căderii greutății* care se bazează pe măsurătorile efectuate în timpul rotirii directe a rotorului de către o greutate în cădere liberă.
2. *Metoda pendulului auxiliar* care se bazează pe măsurarea perioadei de oscilație a rotorului antrenat de un pendul montat rigid pe arbore.
3. *Metoda lansării sau opririi naturale* care se bazează pe măsurătorile efectuate în timpul opririi mașinii electrice, de la o turație corespunzătoare funcționării în gol, prin deconectare de la sursa de energie.Mașina se oprește datorită cuplului rezistent  $M_R$  corespunzător acelei părți  $P_R$  din pierderile la mers în gol care produce frânarea rotorului.

Ecuția mișcării devine pentru cel din urmă caz:

$$-M_R = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (4.96)$$

După înmulțirea cu  $\Omega$  rezultă în final expresia:

$$J = -\frac{P_R}{\Omega \frac{d\Omega}{dt}} \quad (4.97)$$

Valorile pentru  $P_R$ ,  $\Omega$  și  $\frac{d\Omega}{dt}$  se iau la aceeași viteză  $\Omega_x$  din curbele  $\Omega = f(t)$ , determinate în timpul opririi naturale și  $P_R = f(\Omega)$ , măsurată la mers în gol. Curbele se ridică în aceleași condiții.

În lucrarea de față, pentru momentul de inerție axial nu se recurge la determinarea lui(aceasta nefăcând obiectul tezei de doctorat), considerându-se valoarea dată de firma constructoare(a se vedea relațiile 4.1).

#### 4.5.Concluzii

- *Determinarea parametrilor de regim tranzitoriu ai mașinii sincrone din probe în axele d și q*, după cum se poate observa din cele prezentate în paragraful 4.1, este o metodă laborioasă care implică atât o parte experimentală (probe în axele d respectiv q) cât și o parte de calcul (soluționarea unui sistem algebric de nouă ecuații, puternic neliniar) care uneori ridică probleme deosebite.Avantajul principal al acestei metode stă în faptul că probele în cele două axe se fac static (fără a pune în mișcare rotorul mașinii sincrone, lucru care ar fi practic imposibil la mașinile sincrone de putere mare).

- *Determinarea parametrilor mașinii sincrone pe baza datelor de catalog și a geometriei mașinii* este o metodă care implică doar partea de calcul (care nu prezintă probleme deosebite) fiind potrivită situației în care sunt cunoscute datele de catalog (inclusiv constantele de timp) inclusiv dimensiunile geometrice ale mașinii.
- *Determinarea parametrilor mașinii sincrone în regim staționar din probele de gol respectiv scurtcircuit* este de astă dată o metodă care implică partea experimentală, partea de calcul fiind extrem de simplă.
- În funcție de situație, oricare dintre cele trei metode prezentate își găsește utilitatea, în raport cu avantajele și dezavantajele pe care le prezintă respectiv posibilitatea practică de aplicare. Un criteriu fundamental însă de a alege o metodă sau alta este precizia cu care sunt determinați parametrii mașinii. Pentru mașina sincronă considerată în această lucrare se poate trage concluzia că parametrii mașinii, determinați pe baza celor trei metode prezentate mai sus prezintă foarte mici diferențe (acceptabile ținând cont de erorile de calcul). Drept referință se consideră rezultatele obținute prin prima metodă, argumentul fiind că această metodă de determinare a parametrilor îmbină atât o parte experimentală consistentă de unde se culeg multe informații cât și o parte deasemenea consistentă de calcul care în condițiile unui aparat matematic solid se pretinde a fi destul de precisă.
- *Determinarea momentului de inerție axial* se face pe baza metodelor clasice cunoscute în literatura de specialitate și prezentate în paragraful 4.4. De obicei în ultimul timp, valoarea momentului de inerție axial este dată de firma constructoare.

Cap5.DETERMINAREA PARAMETRILOR ACȚIONĂRILOR ELECTRICE  
CU MAȘINI ASINCRONE

La mașinile asincrone din sistemele de acționare electrică, parametrii acestora se determină pe baza datelor de catalog respectiv a unor probe de mers în gol.

La valori ale inducției magnetice din miez până în „cotul” curbei de magnetizare inductanțele au valori care nu depind de curentul de magnetizare  $I_m$  (valorile *nesaturate*). La valori mai mari ale inducției electromagnetice, inductanțele se modifică cu  $I_m$  (curentul de magnetizare) și în calcule se lucrează cu valorile *saturate*.

În acest capitol se prezintă o metodă de determinare a parametrilor mașinii asincrone (cu rotorul în scurtcircuit), în situația în care inductanțele au valori care nu depind de curentul de magnetizare  $I_m$  (valorile *nesaturate*), deci mașina asincronă considerată funcționează la valori ale inducției magnetice din miez până în „cotul” curbei de magnetizare.

5.1.Determinarea parametrilor mașinii asincrone pe baza datelor de catalog și a probelor de mers în gol

Funcționarea în gol presupune  $s = 0$  și schema electrică este cea din figura 5.1.1:

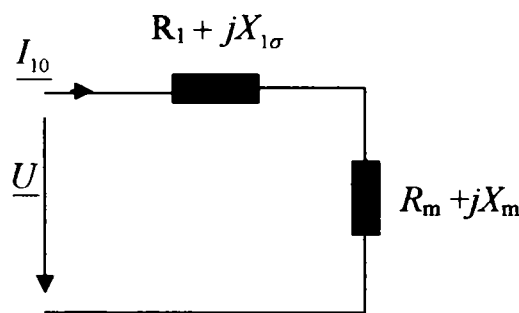


Fig.5.1.1.Schema electrică a MA la funcționarea în gol.

Rezistența înfășurării satorice  $R_1$  se determină prin măsurare directă cu ohmmetrul așa cum se poate vedea în anexa C1.

Din ecuația matricială sau din schema electrică echivalentă, la  $s = 0, I_{dr} = I_{qr} = 0$  rezultă:

$$I_{10} = \frac{U}{(R_1 + R_m) + j\omega_1 L_1} \tag{5.1}$$

de unde:

$$R_1 + R_m = \frac{P_{10}}{3I_{10}^2} \tag{5.2}$$

Inductanța proprie a înfășurării satorice se determină cu următoarea relație:

$$L_1 = \frac{1}{\omega_1} \sqrt{\left(\frac{U}{I_{10}}\right)^2 - (R_1 + R_m)^2} \tag{5.3}$$

Observație: La funcționarea în gol,  $I_{01} = I_{10}$ . În general însă, la  $s \neq 0$  între cei doi curenți există inegalitatea:

$$I_{01} < I_{10} \quad (5.4)$$

La funcționarea în regim nominal ( $s = s_N$ ) din ecuația matricială a mașinii asincrone rezultă:

$$\frac{U}{I_N} = \frac{\sqrt{[R_1 R_2 + s_N \omega_1^2 (M^2 - L_1 L_2)]^2 + [\omega_1 (L_1 R_2 + s_N R_1 L_2)]^2}}{\sqrt{R_2^2 + (s_N \omega_1 L_2)^2}} \quad (5.5)$$

Se obține astfel o expresie mai simplă:

$$\cos \varphi_N = \frac{R_1 R_2^2 + R_1 (s_N \omega_1 L_2)^2 + s_N \omega_1^2 M^2 R_2}{[R_2^2 + (s_N \omega_1 L_2)^2] \frac{U}{I_N}} \quad (5.6)$$

sau

$$\operatorname{tg} \varphi_N = \frac{R_2^2 \omega_1 L_1 + s_N^2 \omega_1^3 L_2 (L_1 L_2 - M^2)}{R_2^2 R_1 + R_2 s_N \omega_1^2 M^2 + R_1 s_N^2 \omega_1^2 L_2^2} \quad (5.7)$$

Cuplul nominal fiind[B3]:

$$M_{\operatorname{el}magN} = p_1 M \operatorname{Im} ag(\underline{I}_1 \underline{I}_2^*) = p_1 M \operatorname{Im} ag \left( \underline{I}_1 \frac{\underline{I}_2^* (-s_N^2 \omega_1^2 L_2 M + j s_N \omega_1 M R_2)}{R_2^2 + (s_N \omega_1 L_2)^2} \right) = \frac{3 p_1 M^2 I_N^2 R_2 s_N \omega_1}{R_2^2 + (s_N \omega_1 L_2)^2} \quad (5.8)$$

rezultă cea de-a treia relație pentru calculul parametrilor:

$$M_{\operatorname{el}magN} = \frac{3 p_1 M^2 R_2 s_N \omega_1}{R_2^2 + (s_N \omega_1 L_2)^2} I_N^2 \quad (5.9)$$

Precizare:

Mărimile rotorice  $R_2, L_2$  în relațiile de mai sus sunt considerate raportate la stator.

Rezistența rotorică raportată la stator  $R_2$  se poate calcula cu relația:

$$R_2 = \frac{M_N s_N \Omega_1}{3 I_N^2} \quad (5.10)$$

unde, pe baza rezultatelor din [V1], se poate scrie:

$$I_N = \frac{1,32 P_N}{3 U_{e1} (1 - s_N)} \quad (5.11)$$

$$U_{e1} = \left( 0,85 - \frac{0,08 p_1}{\sqrt[3]{P_N}} \right) U_N \quad (5.12)$$

Relațiile (5.6,5.9,5.10) stau la baza determinării parametrilor  $R_2, L_2, M$ , așa cum se va vedea și în continuare prin considerarea unei mașini asincrone cu rotorul în scurtcircuit (existentă în cadrul laboratorului de mașini electrice al facultății) care are următoarele date de catalog:

$$\begin{aligned}
 P_N &= 3 [KW] \\
 M_N &= 20,103[Nm] \\
 n_N &= 1425[rpm] \\
 U_N &= 220/380[V] \\
 I_N &= 12,1/7[A] \\
 \cos\varphi_N &= 0,81 \\
 J &= 0,017663[Kg \cdot m^2] \\
 \left. \begin{aligned} P_{10} &= 220[W] \\ I_{10} &= 2,916[A] \end{aligned} \right\} \text{la } U = 400/\sqrt{3}[V]
 \end{aligned}
 \tag{5.13}$$

Din proba de gol rezultă:

$$R_1 + R_m = \frac{P_{10}}{3I_{10}^2} = \frac{220}{3 \cdot 2,916^2} = 8,624[\Omega] \quad (R_1 = 1,9[\Omega]) \tag{5.14}$$

deasemenea

$$L_1 = \frac{1}{\omega_1} \sqrt{\left(\frac{U}{I_{10}}\right)^2 - (R_1 + R_m)^2} = \frac{1}{314} \sqrt{\left(\frac{400}{2,196\sqrt{3}}\right)^2 - 8,624^2} = 0,25[H] \tag{5.15}$$

Din (5.10) se obține  $R_2$ :

$$R_2 = \frac{M_N s_N \Omega_1}{3I_{rN}^2} = \frac{20,103 \cdot 0,05 \cdot 2\pi \cdot 1500}{3 \cdot 7,528^2 \cdot 60} = 0,928[\Omega] \tag{5.16}$$

deoarece

$$U_{e1} = \left(0,85 - \frac{0,08 p_1}{\sqrt[3]{P_N}}\right) U_N = \left(0,85 - \frac{0,08 \cdot 2}{\sqrt[3]{3000}}\right) 220 = 184,56[V] \tag{5.17}$$

și

$$I_{rN} = \frac{1,32 P_N}{3U_{e1}(1-s_N)} = \frac{1,32 \cdot 3000}{3 \cdot 184,56 \cdot 0,95} = 7,528[A] \tag{5.18}$$

Prin soluționarea sistemului format de relațiile (5.7,5.9) și după alegerea soluției reale pozitive (unice) rezultă:

$$L_2 = 0,597[H] \tag{5.19}$$

$$M = 0,373[H] \tag{5.20}$$

soluție care verifică relația:

$$M^2 = 0,139659 < L_1 L_2 = 0,149381 \tag{5.21}$$

Coeficientul global de dispersie al mașinii este:

$$\sigma = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 L_2} = \frac{0,25 \cdot 0,597 - 0,13965}{0,25 \cdot 0,597} = 0,06432 \tag{5.22}$$



La mașinile cu dispersie nulă  $\sigma = 0$ , iar la mașinile cu dispersie mare,  $M \rightarrow 0$  și deci  $\sigma = 1$ .

Mașina asincronă considerată în această lucrare, după cum se poate observa are un coeficient global de dispersie foarte mic, drept consecință a unui cuplaj magnetic foarte bun între stator și rotor. Ca urmare a acestei constatări, deja se poate trage o concluzie importantă care vizează dificultatea soluționării sistemelor de ecuații diferențiale pentru diverse regimuri tranzitorii și anume faptul că determinantul matricii coeficienților derivatelor din sistem (a se vedea relațiile 3.21;3.22) având o valoare foarte mică, în vederea evitării nedeterminărilor matematice (împărțiri cu zero), trebuie să se lucreze cu un număr foarte mare de zecimale ceea ce complică mult calculele.

Pe lângă parametrii determinați mai sus, momentul de inerție axial  $J$  de obicei este dat de firma constructoare (cazul mașinii asincrone prezentate în această lucrare), el fiind determinat prin una din metodele prezentate în paragraful 4.4.

### **5.2.Determinarea momentului de inerție axial**

Determinarea momentului de inerție axial se face pe baza metodelor clasice cunoscute în literatura de specialitate și prezentate în paragraful 4.4. De obicei valoarea momentului de inerție axial este dată de firma constructoare lucru care este valabil și în cazul mașinii asincrone considerate în această lucrare.

Determinarea momentului de inerție axial pe o aplicație concretă (numeric) nu face obiectul acestei lucrări de doctorat, această valoare a lui  $J$  fiind considerată din datele de catalog, așa cum este dată de firma constructoare.

### **5.3.Concluzii**

- *Determinarea parametrilor mașinii asincrone pe baza datelor de catalog și a probelor de mers în gol este o metodă simplă care implică atât partea experimentală (mers în gol la tensiunea nominală) care nu ridică probleme deosebite (nici chiar la mașinile de putere mare unde pornirea în gol se face cu tensiune variabilă pentru a evita șocurile de putere în rețea și în mașină) cât și partea de calcul (care nici ea nu prezintă dificultăți) fiind potrivită situației în care sunt cunoscute datele de catalog ale mașinii.*
- *Determinarea momentului de inerție axial se face pe baza metodelor clasice cunoscute în literatura de specialitate și prezentate în paragraful 4.4., cu mențiunile făcute în paragraful 5.2.*

**Cap6.MODELAREA ȘI SIMULAREA FUNCȚIONĂRII MAȘINILOR SINCRONE ÎN REGIM TRANZITORIU UTILIZÂND MODELUL ORTOGONAL**

**6.1.Introducere**

În acest capitol se prezintă modelarea și simularea funcționării mașinii sincrone considerate în lucrare (pentru regimul de motor) în diverse regimuri tranzitorii (dinamice) întâlnite în exploatare, în vederea cunoașterii comportării acesteia din punctul de vedere al solicitărilor electromecanice care apar. Interesează atât funcționarea motorului sincron la tensiune și frecvență constante, în procese dinamice precum: pornirea, încărcarea, descărcarea, reversarea, etc, cât și funcționarea acestuia la tensiune și frecvență variabile.

Pentru regimurile de funcționare enumerate mai sus, se studiază și influența modificării momentului de inerție axial al acționării electrice considerate (motor sincron în arbore electric cu o mașină de curent continuu) asupra dinamicii proceselor tranzitorii (ca durată și amplitudine), în condițiile modificării cuplului rezistent.

În cazul funcționării la tensiune și frecvență variabile se studiază, pe lângă influența modificării momentului de inerție axial, și influența modificării (valorii) constantelor de timp ale reguletoarelor, asupra proceselor tranzitorii, acestea fiind situațiile cele mai des întâlnite în exploatare.

**6.2.Funcționarea mașinii sincrone la tensiune și frecvență constante**

În situația alimentării motorului sincron cu tensiune constantă (tensiunea rețelei), respectiv frecvență constantă (frecvența industrială), după pornirea în asincron respectiv sincronizarea cu rețeaua, motorul sincron își păstrează turația de sincronism până la sarcina nominală, după care prin încărcare suplimentară, se ajunge la limita de stabilitate la încărcare, când motorul sincron iese din sincronism.

**6.2.1. Modelarea și simularea pornirii în asincron a motorului sincron**

Pornirea în asincron a motorului sincron presupune parcurgerea a două etape:

Etapa I. Excitația motorului sincron este scurtcircuitată

Etapa II. Excitația motorului sincron este conectată la sursa de tensiune continuă

**Etapa I. Excitația motorului sincron este scurtcircuitată**

În prima etapă a pornire în asincron, înfășurarea de excitație a motorului sincron se închide (scurtcircuitează) printr-o rezistență adițională de aproximativ  $10R_E$  ( $R_E$  – rezistența înfășurării de excitație) [D1, D2]. Astfel rotorul motorului sincron este perceput în faza de pornire în asincron ca un rotor nesimetric (a se vedea nesimetria rotorică adică o fază întreruptă la mașina asincronă). Prezența rotorului nesimetric, în vederea modelării și simulării pornirii, impune considerarea a două mașini asincrone [B2]:

1. o mașină asincronă cu câmp direct și rotor simetric alimentată în stator la tensiunea rețelei,
2. o mașină asincronă cu câmp invers și rotor simetric (care acum este inductorul mașinii asincrone) alimentat la aceeași tensiune rotorică ca și secvența directă.

Scrierea matricială a ecuațiilor pentru prima mașină (1) este [B2]:

$$\begin{bmatrix} U\sqrt{3} \\ 0 \\ U_{dr} \\ U_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + L_1p & -\omega_1 L_1 & Mp & -M\omega_1 \\ \omega_1 L_1 & R_1 + L_1p & M\omega_1 & Mp \\ Mp & -sM\omega_1 & R_2 + L_2p & -s\omega_1 L_2 \\ sM\omega_1 & Mp & s\omega_1 L_2 & R_2 + L_2p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

iar pentru cea de-a doua(2):

$$\begin{bmatrix} U_{dr} \\ U_{qr} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_2 + L_2 p & -s\omega_1 L_2 & Mp & -sM\omega_1 \\ s\omega_1 L_2 & R_2 + L_2 p & sM\omega_1 & Mp \\ Mp & (1-2s)M\omega_1 & R_1 + L_1 p & (1-2s)\omega_1 L_1 \\ (2s-1)M\omega_1 & Mp & (2s-1)\omega_1 L_1 & R_1 + L_1 p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \\ I_{di} \\ I_{qi} \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

obținându-se astfel opt ecuații cu opt necunoscute:  $I_d, I_q, I_{dr}, I_{qr}, I_{di}, I_{qi}, U_{dr}, U_{qr}$ .

Tensiunile  $U_{dr}$  și  $U_{qr}$  au aceleași valori atât pentru secvența directă cât și pentru cea inversă, așa cum se poate vedea din teoria mașinii asincrone cu o fază rotorică întreruptă[B3].

Curentul statoric prin mașina reală este suma celor doi curenți:

$$I_{direct}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (I_d \cos \omega_1 t - I_q \sin \omega_1 t) \quad \text{cu } \omega_1 = 2 \cdot 50 \cdot \pi [\text{rad/s}] \quad (6.3)$$

respectiv

$$I_{invers}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (I_{di} \cos \omega_i t - I_{qi} \sin \omega_i t) \quad \text{cu } \omega_i = 2 \cdot 50 \cdot \pi \cdot (2s-1) [\text{rad/s}] \quad (6.4)$$

unde  $I_d, I_q, I_{dr}, I_{qr}$  sunt curenții statorici respectiv rotorici corespunzători secvenței directe și  $I_{di}, I_{qi}$  sunt curenții statorici corespunzători secvenței inverse.

$$I_{rez}(t) = I_{direct}(t) + I_{invers}(t) \quad (6.5)$$

Cuplul electromagnetic direct este:

$$M_{direct} = p_1 M (I_q I_{dr} - I_d I_{qr}) \quad (6.6)$$

iar cel invers:

$$M_{invers} = p_1 M (I_{qr} I_{di} - I_{dr} I_{qi}) \quad (6.7)$$

obținându-se cuplul rezultat sub forma:

$$M_{elmag} = M_{direct} + M_{invers} . \quad (6.8)$$

Cele opt ecuații completate cu ecuația mișcării:

$$M_{elmag} - M_{rez} = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (6.9)$$

sau, echivalent,

$$M_{elmag} - M_{rez} = -J\Omega_1 \frac{ds}{dt} \quad (6.10)$$

unde  $\Omega = \Omega_1(1-s)$ , definesc complet regimul de pornire unde celor opt necunoscute li se adaugă necunoscuta  $s$ , alunecarea. În studiul regimurilor tranzitorii prezintă interes doar cunoașterea curenților; ecuațiile ce conțin tensiunile  $U_{dr}$  și  $U_{qr}$ , prin eliminarea acestora, se poate reduce numărul ecuațiilor și al necunoscutelor. În final fără necunoscutele  $U_{dr}$  și  $U_{qr}$  rezultă un sistem de șapte ecuații diferențiale de ordinul întâi cu funcțiile necunoscute:  $I_d, I_q, I_{dr}, I_{qr}, I_{di}, I_{qi}$  și  $s$ .

În vederea simplificării scrierii, se fac următoarele notații:

<u>Mărimă</u>	<u>Notăție</u>	<u>Semnificație</u>	(6.11)
$I_d(t)$	$= X(t)$	-curentul statoric direct din axa d,	
$I_q(t)$	$= Y(t)$	-curentul statoric direct din axa q,	
$I_{dr}(t)$	$= Z(t)$	-curent rotoric din axa d (direct și invers),	
$I_{qr}(t)$	$= U(t)$	-curent rotoric din axa q (direct și invers),	
$I_{di}(t)$	$= V(t)$	-curent statoric invers din axa d,	
$I_{qi}(t)$	$= W(t)$	-curent statoric invers din axa q,	
$s(t)$	$= s(t)$	-alunecarea,	
$n(t)$	$= n(t)$	-turația,	
$I_{direct}(t)$	$= I(t)$	-curentul de secvență directă în mașina reală,	
$I_{invers}(t)$	$= J(t)$	-curentul de secvență inversă în mașina reală,	
$I_{rez}(t)$	$= H(t)$	-curentul rezultat în mașina reală,	
$M_{direct}(t)$	$= T(t)$	-cuplul electromagnetic de secvență directă,	
$M_{invers}(t)$	$= F(t)$	-cuplul electromagnetic de secvență inversă,	
$M_{el\,mag.\,rez}(t)$	$= M(t)$	-cuplul electromagnetic rezultat.	

Pe baza ecuațiilor (6.1), (6.2),(6.8),(6.9),(6.10) respectiv cu notațiile de mai sus, se poate scrie sistemul de ecuații diferențiale (6.12) care modelează prima etapă a pornirii motorului sincron. Coeficienții acestor ecuații diferențiale conțin parametrii mașinii sincrone considerate în lucrare, parametrii care au fost determinați în prealabil în capitolul 4, respectiv anexa D unde se prezintă echivalarea rotorului motorului sincron printr-un rotor echivalent(din punct de vedere energetic) de motor asincron pentru modelarea pornirii, determinându-se astfel parametrii "echivalenți"  $R_2, L_2$  și  $M$  prezenți în ecuațiile matriciale (6.1,6.2).

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.6X + 0.08 \frac{dX}{dt} - 25.12Y + 0.06245 \frac{dZ}{dt} - 19.6093U = 380 \\ 25.12X + 1.6Y + 0.08 \frac{dY}{dt} + 19.6093Z + 0.06245 \frac{dU}{dt} = 0 \\ 0.06245 \frac{dX}{dt} - 19.6093sY + 1.566Z + 0.0539 \frac{dZ}{dt} - 16.9246sU - 0.06245 \frac{dV}{dt} + 19.6093sW = 0 \\ 19.6093sX + 0.06245 \frac{dY}{dt} + 16.9246sZ + 1.566U + 0.0539 \frac{dU}{dt} - 19.6093sV - 0.06245 \frac{dW}{dt} = 0 \\ 0.06245 \frac{dZ}{dt} + 19.6093(1-2s)U + 1.6V + 0.08 \frac{dV}{dt} + 25.12(1-2s)W = 0 \\ 19.6093(2s-1)Z + 0.06245 \frac{dU}{dt} + 25.12(2s-1)V + 1.6W + 0.08 \frac{dW}{dt} = 0 \\ 2(0.06245(YZ - XU) + 0.06245(UV - ZW)) + 1.360091 \frac{ds}{dt} = 0 \end{array} \right. \quad (6.12)$$

cu condițiile inițiale:

$$\left\{ \begin{array}{l} X(0) = 0 \\ Y(0) = 0 \\ Z(0) = 0 \\ U(0) = 0 \\ V(0) = 0 \\ W(0) = 0 \\ s(0) = 1 \end{array} \right. \quad (6.13)$$

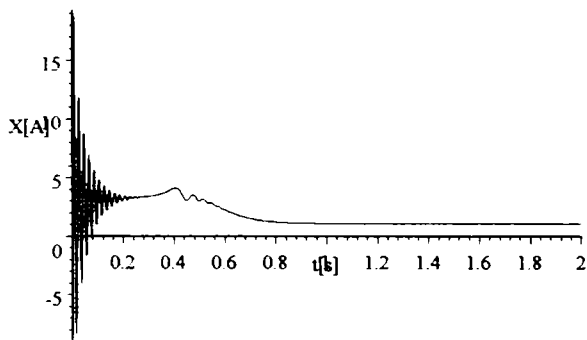
Condițiile finale se obțin prin soluționarea sistemului algebric rezultat prin anularea derivatelor din sistemul de ecuații diferențiale(6.12):

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.6X - 25.12Y - 19.6093U = 380 \\ 25.12X + 1.6Y + 19.6093Z = 0 \\ -19.6093sY + 1.566Z - 16.9246sU + 19.6093sW = 0 \\ 19.6093sX + 16.9246sZ + 1.566U - 19.6093sV = 0 \\ 19.6093(1 - 2s)U + 1.6V + 25.12(1 - 2s)W = 0 \\ 19.6093(2s - 1)Z + 25.12(2s - 1)V + 1.6W = 0 \\ 2(0.06245(YZ - XU) + 0.06245(UV - ZW)) = 0 \end{array} \right. \quad (6.14)$$

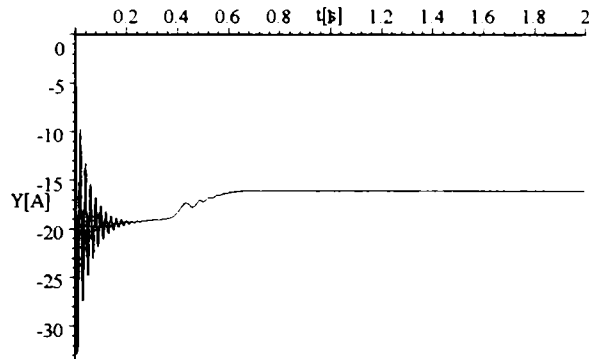
cu soluția (care este în același timp și punct de echilibru stabil):

$$s = 0, Z = 0, X = 0.9596347, Y = -15.06627, V = 0, U = 0, W = 0 \quad (6.15)$$

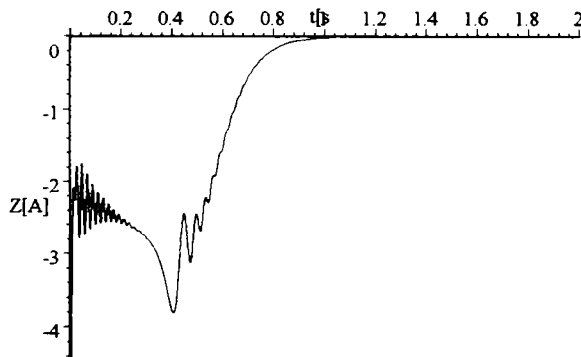
În urma soluționării sistemului de ecuații diferențiale (6.12), cu condițiile inițiale (6.13), procesul tranzitoriu de pornire este cunoscut prin interpretarea evoluției în timp a următoarelor mărimi:



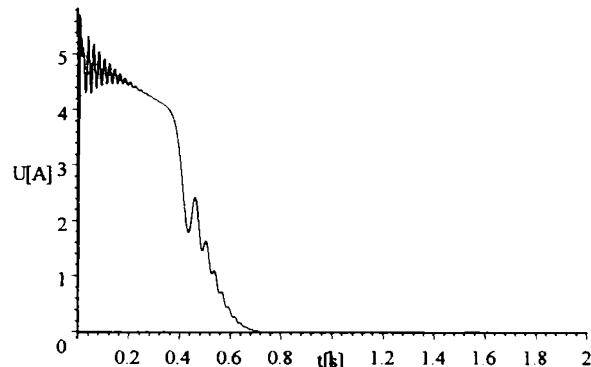
**Fig.6.2.1. Variația în timp a lui  $I_d$ .**



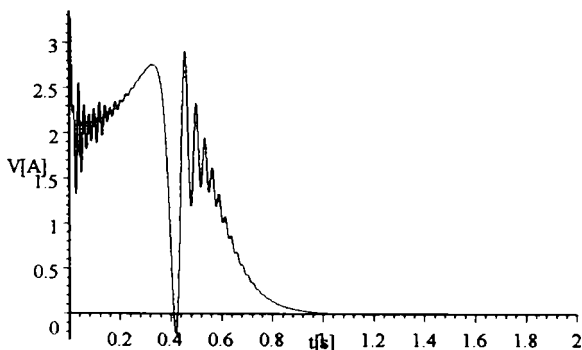
**Fig.6.2.2. Variația în timp a lui  $I_q$ .**



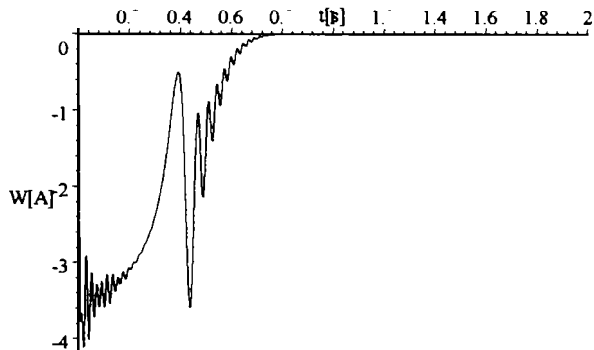
**Fig.6.2.3. Variația în timp a lui  $I_{dr}$ .**



**Fig.6.2.4. Variația în timp a lui  $I_{qr}$ .**



**Fig.6.2.5. Variația în timp a lui  $I_{di}$ .**



**Fig.6.2.6. Variația în timp a lui  $I_{qi}$ .**

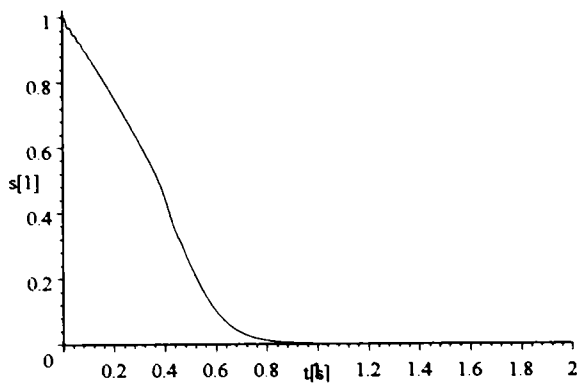


Fig.6.2.7.Variația în timp a lui s.

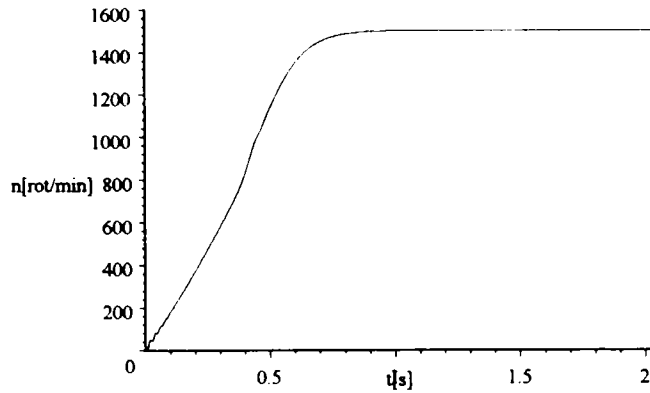


Fig.6.2.8.Variația turăției  $n(t) = 1500(1 - s(t))$ .

Curenții de secvență directă respectiv de secvență inversă, în mașina reală sunt dați de relațiile:

$$I_{direct}(t) = I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos 314t - Y(t) \sin 314t) \tag{6.16}$$

$$I_{invers}(t) = J(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (V(t) \cos 314|2s(t) - 1|t - W(t) \sin 314|2s(t) - 1|t). \tag{6.17}$$

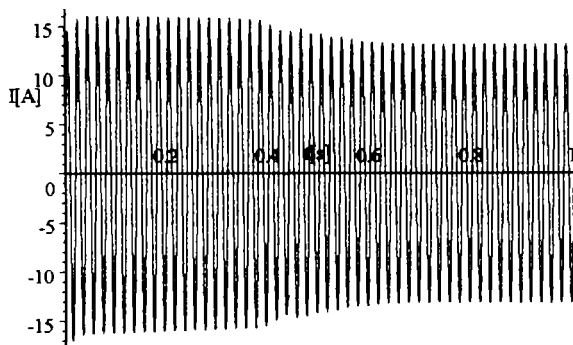


Fig.6.2.9.Variația în timp a lui  $I_{direct}$ .

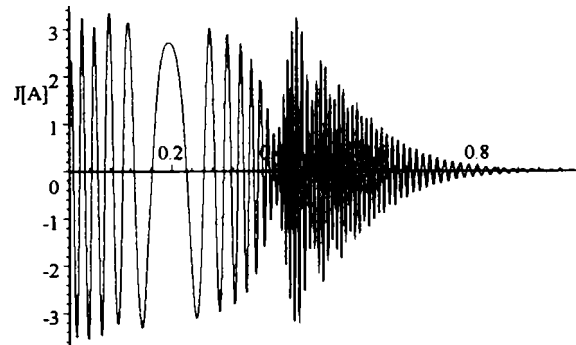


Fig.6.2.10.Variația în timp a lui  $I_{invers}$ .

Cuplul electromagnetic de secvență directă respectiv de secvență inversă în mașina reală în procesul de pornire este[B2,B4]:

$$M_{direct}(t) = T(t) = 2(0.0573(Y(t)Z(t) - X(t)U(t))) \tag{6.18}$$

$$M_{invers}(t) = F(t) = 2(0.0573(U(t)V(t) - Z(t)W(t))) \tag{6.19}$$

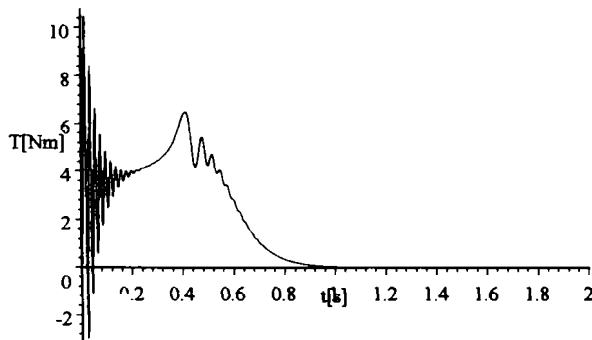


Fig.6.2.11.Variația în timp a lui  $M_{direct}$ .

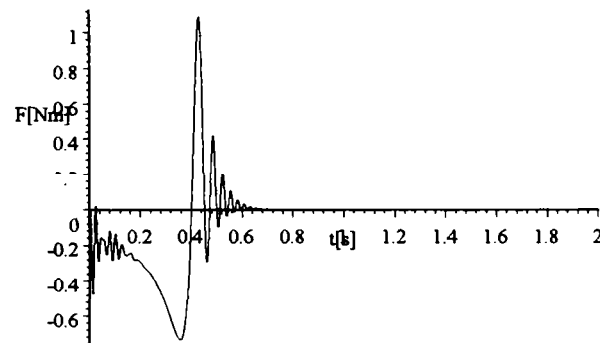


Fig.6.2.12.Variația în timp a lui  $M_{invers}$ .

Curentul real rezultat respectiv cuplul electromagnetic rezultat în mașina reală în procesul de pornire al motorului sincron sunt[B2]:

$$I_{rez}(t) = H(t) = I(t) + J(t). \quad (6.20)$$

$$M_{elmag}(t) = M(t) = 2(0.0573(Y(t)Z(t) - X(t)U(t)) + 0.0573(U(t)V(t) - Z(t)W(t))) \quad (6.21)$$

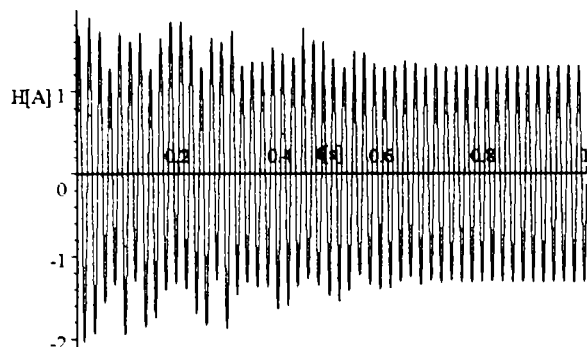


Fig.6.2.13. Variația în timp a lui  $I_{rez}$ .

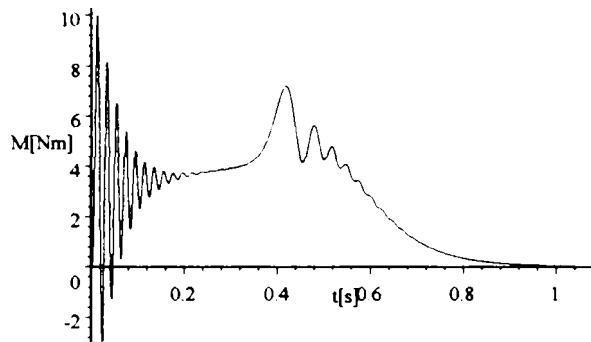


Fig.6.2.14. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$ .

### Etapa II. Excitația motorului sincron este conectată la sursa de tensiune continuă

Momentul de timp al sincronizării se introduce prin unghiul  $\theta$  și prin condițiile inițiale care rezultă la conectarea excitației la sursa de curent continuu. Prin unghiul  $\theta$  s-a stabilit poziția câmpului magnetic învârtitor față de rotor în momentul conectării înfășurării de excitație la sursa de tensiune continuă. În cele ce urmează vor fi tratate două situații: cazul C1, când conectarea înfășurării de excitație la sursa de tensiune continuă se face la un moment de timp la care încă turația rotorului este mult diferită de turația câmpului magnetic învârtitor iar cazul C2 corespunzător situației în care turația rotorului este foarte apropiată de turația de sincronism respectiv alunecarea este de valoare foarte mică.

**Cazul C1.** Procesul sincronizării la mașina sincronă pornită în asincron are loc la  $t = 0.5[s]$  (timp la care procesul tranzitoriu de pornire este încheiat) când:

$$\begin{cases} I_d(0.5) = 3.03844[A] \\ I_q(0.5) = -17.16472[A] \\ \omega(0.5) = 2\pi f = \frac{2\pi \cdot p_1 (1500(1-s(0.5)))}{60} = 238.1171[rad \cdot s^{-1}] \\ s(0.5) = 0.2416654 \end{cases} \quad (6.22)$$

Mașina, funcționând în regim asincron s-a „agățat” la  $s = 0.2416654$  sub unghiul:

$$\begin{aligned} (C1_1) \quad \theta = 90^\circ \text{ cu } U_d &= -220\sqrt{3} \cdot \sin 90^\circ = -220\sqrt{3} [V], \\ &U_q = 220\sqrt{3} \cdot \cos 90^\circ = 0[V]; \\ (C1_2) \quad \theta = 60^\circ \text{ cu } U_d &= -220\sqrt{3} \cdot \sin 60^\circ = -190\sqrt{3} [V], \\ &U_q = 220\sqrt{3} \cdot \cos 60^\circ = 110\sqrt{3} [V]; \\ (C1_3) \quad \theta = 0^\circ \text{ cu } U_d &= -220\sqrt{3} \cdot \sin 0^\circ = 0[V], \\ &U_q = 220\sqrt{3} \cdot \cos 0^\circ = 220\sqrt{3} [V]. \end{aligned} \quad (6.23)$$

Se conectează înfășurarea de excitație a motorului sincron alimentând excitația la tensiune constantă.

Cazul C1<sub>1</sub> Sincronizarea are loc la  $\theta = 90^0$ .

În vederea simplificării scrierii, se fac următoarele notații:

Mărime	Notăție	Semnificație
$I_d(t)$	$X(t)$	- curentul prin înfășurarea statorică din axa d,
$I_q(t)$	$Z(t)$	- curentul prin înfășurarea statorică din axa q,
$I_D(t)$	$W(t)$	- curentul prin înfășurarea de amortizare din axa d,
$I_Q(t)$	$Q(t)$	- curentul prin înfășurarea de amortizare din axa q,
$I_E(t)$	$U(t)$	- curentul prin înfășurarea de excitație,
$\omega(t)$	$\omega(t), \text{omega}(t)$	- pulsația electrică (sau viteza unghiulară),
$I(t)$	$I(t)$	- curentul în mașina reală,
$M_{el\text{mag}}$	$M(t)$	- cuplul electromagnetic.

Sistemul ce modelează fenomenul studiat este următorul(a se vedea relațiile 3.1,3.2):

$$\begin{cases}
 1.6X + 0.08 \frac{dX}{dt} - 16.6682Z + 1.1 \frac{dU}{dt} + 0.055 \frac{dW}{dt} - 13.81079Q = -220\sqrt{3} \\
 19.04937X + 1.6Z + 0.07 \frac{dZ}{dt} + 261.9288U + 13.09644W + 0.058 \frac{dQ}{dt} = 0 \\
 1.1 \frac{dX}{dt} + 41.3U + 18.51 \frac{dU}{dt} + 0.62 \frac{dW}{dt} = 41.3 \\
 0.055 \frac{dX}{dt} + 0.62 \frac{dU}{dt} + 7.95W + 0.067 \frac{dW}{dt} = 0 \\
 0.058 \frac{dZ}{dt} + 30.22Q + 0.25 \frac{dQ}{dt} = 0 \\
 2(0.01XZ + 1.1ZU - 0.058XQ + 0.055ZW) - 0.5 \cdot 0.008663 \frac{d\omega}{dt} = 0 \\
 X(0) = 3.03844 \\
 Z(0) = -17.16472 \\
 W(0) = 0 \\
 Q(0) = 0 \\
 U(0) = 1 \\
 \omega(0) = 238.1171
 \end{cases}
 \tag{6.25}$$

Variația vitezei unghiulare este următoarea:

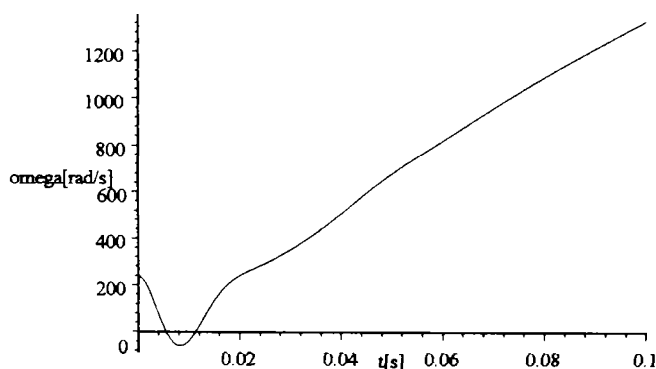


Fig.6.2.15. Variația în timp a lui  $\omega$ .

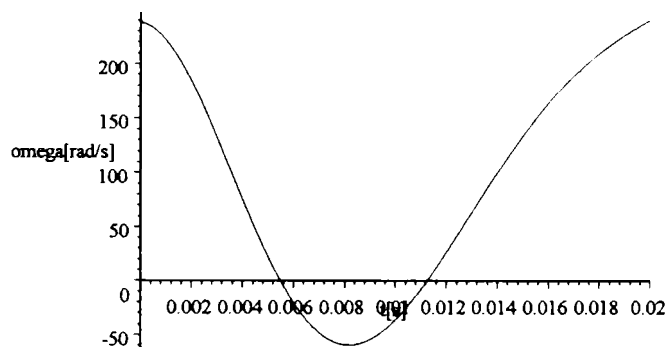


Fig.6.2.15'. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu).

Se observă că mașina nu intră în sincronism deoarece între turația rotorului și cea a câmpului învârtitor există o diferență prea mare. Acest lucru se traduce matematic în faptul că sistemul de ecuații nu prezintă nici un punct de echilibru stabil.

Cu notațiile de mai înainte (6.24) rezultă sistemul:



Cazul C1<sub>2</sub> Sincronizarea are loc la  $\theta = 60^\circ$ .

$$\begin{cases}
 1.6X + 0.08 \frac{dX}{dt} - 16.6682Z + 1.1 \frac{dU}{dt} + 0.055 \frac{dW}{dt} - 13.81079Q = -190\sqrt{3} \\
 19.04937X + 1.6Z + 0.07 \frac{dZ}{dt} + 261.9288U + 13.09644W + 0.058 \frac{dQ}{dt} = 110\sqrt{3} \\
 1.1 \frac{dX}{dt} + 41.3U + 18.51 \frac{dU}{dt} + 0.62 \frac{dW}{dt} = 41.3 \\
 0.055 \frac{dX}{dt} + 0.62 \frac{dU}{dt} + 7.95W + 0.067 \frac{dW}{dt} = 0 \\
 0.058 \frac{dZ}{dt} + 30.22Q + 0.25 \frac{dQ}{dt} = 0 \\
 2(0.01XZ + 1.1ZU - 0.058XQ + 0.055ZW) - 0.5 \cdot 0.008663 \frac{d\omega}{dt} = 0 \\
 X(0) = 3.03844 \\
 Z(0) = -17.16472 \\
 W(0) = 0 \\
 Q(0) = 0 \\
 U(0) = 1 \\
 \omega(0) = 238.1171
 \end{cases} \quad (6.26)$$

Variația vitezei unghiulare (obținută din sistemul 6.26 cu programul Mathematica) este următoarea:

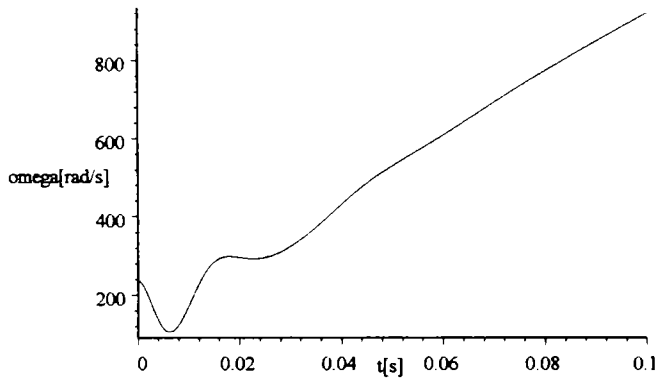


Fig.6.2.16. Variația în timp a lui  $\omega$ .

Nici în acest caz mașina nu intră în sincronism.

Cazul C1<sub>3</sub> Sincronizarea are loc la  $\theta = 0^\circ$ .

$$\begin{cases}
 1.6X + 0.08 \frac{dX}{dt} - 16.6682Z + 1.1 \frac{dU}{dt} + 0.055 \frac{dW}{dt} - 13.81079Q = 0 \\
 19.04937X + 1.6Z + 0.07 \frac{dZ}{dt} + 261.9288U + 13.09644W + 0.058 \frac{dQ}{dt} = 220\sqrt{3} \\
 1.1 \frac{dX}{dt} + 41.3U + 18.51 \frac{dU}{dt} + 0.62 \frac{dW}{dt} = 41.3 \\
 0.055 \frac{dX}{dt} + 0.62 \frac{dU}{dt} + 7.95W + 0.067 \frac{dW}{dt} = 0 \\
 0.058 \frac{dZ}{dt} + 30.22Q + 0.25 \frac{dQ}{dt} = 0 \\
 2(0.01XZ + 1.1ZU - 0.058XQ + 0.055ZW) - 0.5 \cdot 0.008663 \frac{d\omega}{dt} = 0 \\
 X(0) = 3.03844 \\
 Z(0) = -17.16472 \\
 W(0) = 0 \\
 Q(0) = 0 \\
 U(0) = 1 \\
 \omega(0) = 238.1171
 \end{cases} \quad (6.27)$$

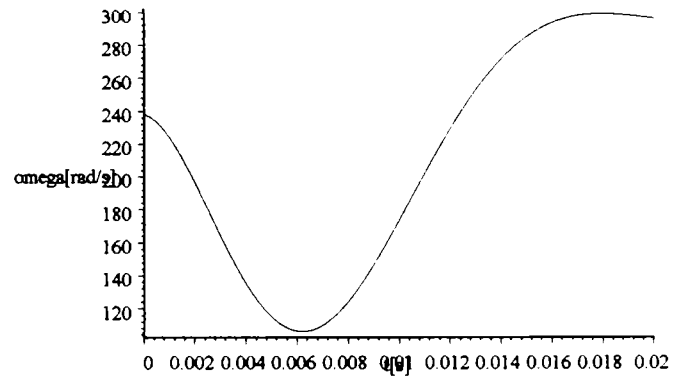


Fig.6.2.16'. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu).

Motorul sincron a intrat în sincronism la frecvența  $f = \frac{280.3787}{2\pi} [Hz] = 44.62367 [Hz]$  ca urmare a "stabilizării" vitezei unghiulare  $\omega$  așa cum se poate observa în figura 6.2.17.

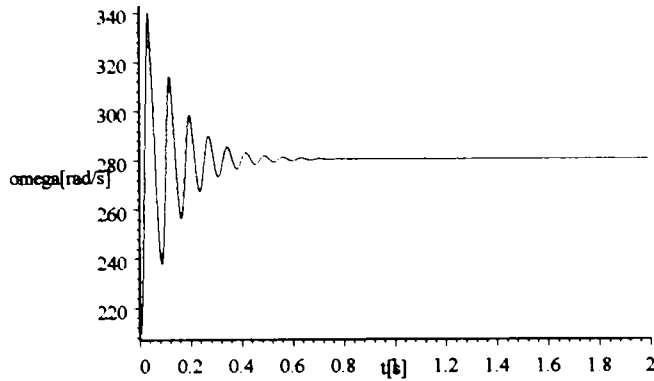


Fig.6.2.17. Variația în timp a lui  $\omega$ .

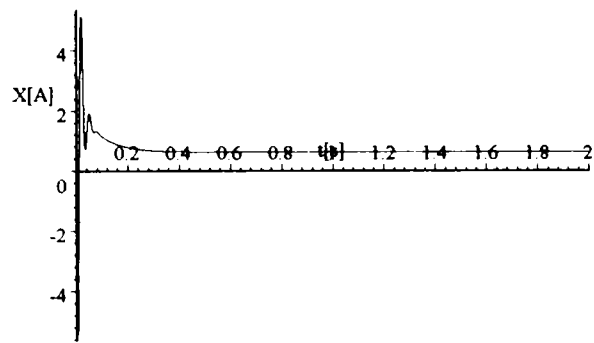


Fig.6.2.18. Variația în timp a lui  $I_d$ .

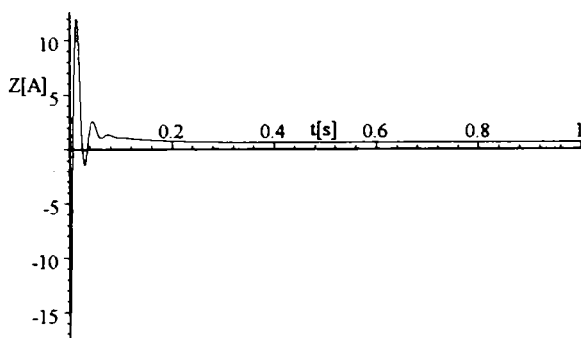


Fig.6.2.19. Variația în timp a lui  $I_q$ .

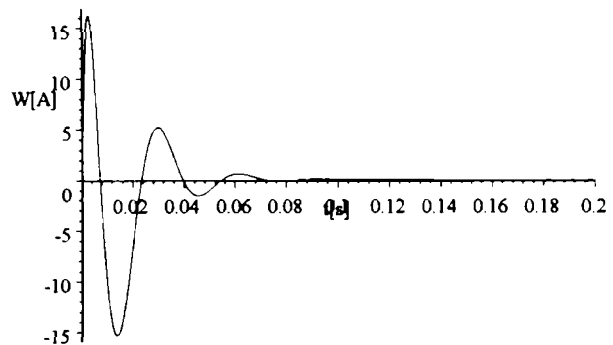


Fig.6.2.20. Variația în timp a lui  $I_D$ .

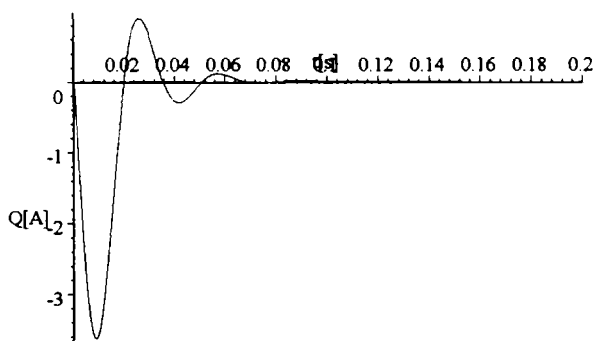


Fig.6.2.21. Variația în timp a lui  $I_Q$ .

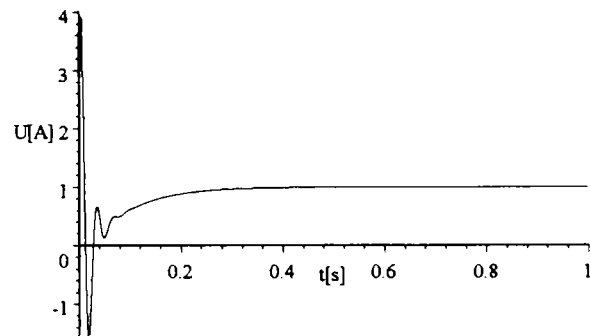


Fig.6.2.22. Variația în timp a lui  $I_E$ .

Variațiile în timp, a curentului real respectiv a cuplul electromagnetic în mașina reală, sunt:

$$I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos 280.3787t - Z(t) \sin 280.3787t) \quad (6.28)$$

$$M_{el\text{mag}}(t) = M(t) = 2(0.01X(t)Z(t) + 1.1Z(t)U(t) - 0.058X(t)Q(t) + 0.055Z(t)W(t)) \quad (6.29)$$

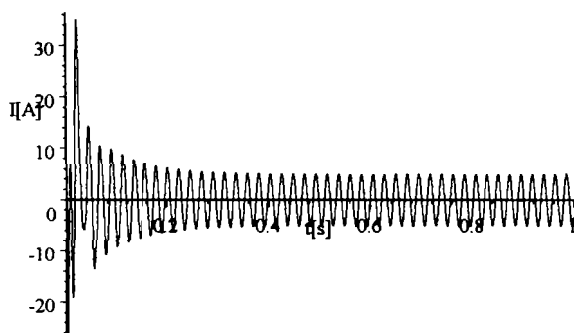


Fig.6.2.23. Variația în timp a lui  $I$ .

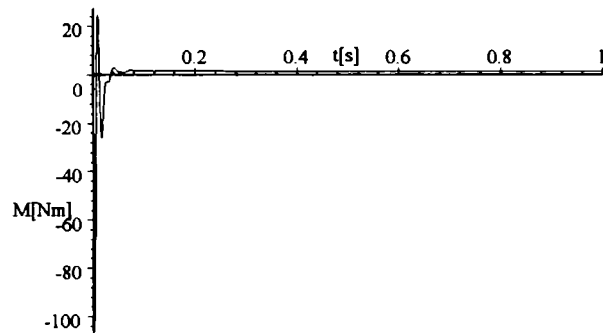


Fig.6.2.24. Variația în timp a lui  $M_{el\text{mag}}$ .

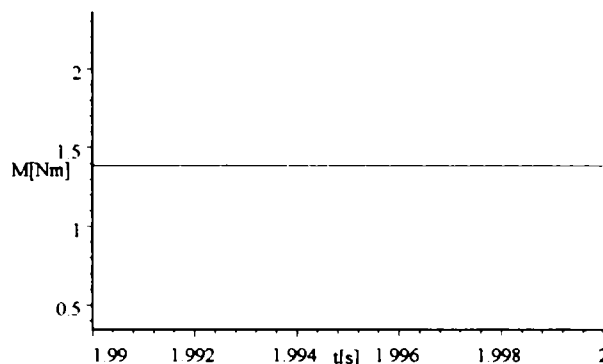
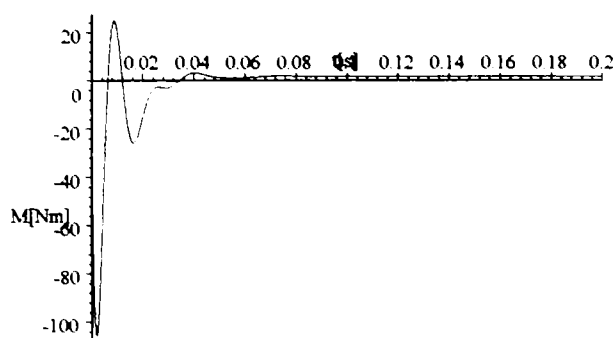


Fig.6.2.24'. Variația lui  $M_{el\text{mag}}$  (detaliu 1).

Fig.6.2.24''. Variația lui  $M_{el\text{mag}}$  (detaliu 2).

Așa cum se poate observa în figura 6.2.24'', cuplul electromagnetic se stabilizează la o valoare corespunzătoare cuplului rezistent datorat frecărilor care apar:  $M(\infty) = 1.383867[Nm]$ , care este o valoare foarte mică în raport cu valoarea cuplului nominal al motorului :  $M_N \approx 16[Nm]$ .

**Cazul C2.** Procesul sincronizării la mașina sincronă pornită în asincron are loc la  $t = 1.35[s]$  când:

$$\begin{cases} I_d(1.35) = 1.091504[A]; I_q(1.35) = -16.06171[A] \\ \omega(1.35) = 2\pi f = \frac{2\pi \cdot p_1(1500(1-s(1.35)))}{60} = 313.9935[\text{rad/s}] \\ s(1.35) = 0.0000207 \end{cases} \quad (6.30)$$

Mașina, la  $s = 0.0000207$ , se sincronizează la momentul de timp caracterizat prin unghiul:

$$\begin{aligned} (C2_1) \quad \theta = 90^\circ \text{ cu } & U_d = -220\sqrt{3} \cdot \sin 90^\circ = -220\sqrt{3} [V], \\ & U_q = 220\sqrt{3} \cdot \cos 90^\circ = 0[V]; \\ (C2_2) \quad \theta = 60^\circ \text{ cu } & U_d = -220\sqrt{3} \cdot \sin 60^\circ = -190\sqrt{3} [V], \\ & U_q = 220\sqrt{3} \cdot \cos 60^\circ = 110\sqrt{3} [V]; \\ (C2_3) \quad \theta = 0^\circ \text{ cu } & U_d = -220\sqrt{3} \cdot \sin 0^\circ = 0[V], \\ & U_q = 220\sqrt{3} \cdot \cos 0^\circ = 220\sqrt{3} [V]. \end{aligned} \quad (6.31)$$

**Cazul C2<sub>1</sub>** Sincronizarea are loc la  $\theta = 90^\circ$ .

$$\begin{cases} 1.6X + 0.08 \frac{dX}{dt} - 16.6682Z + 1.1 \frac{dU}{dt} + 0.055 \frac{dW}{dt} - 13.81079Q = -220\sqrt{3} \\ 19.04937X + 1.6Z + 0.07 \frac{dZ}{dt} + 261.9288U + 13.09644W + 0.058 \frac{dQ}{dt} = 0 \\ 1.1 \frac{dX}{dt} + 41.3U + 18.51 \frac{dU}{dt} + 0.62 \frac{dW}{dt} = 41.3 \\ 0.055 \frac{dX}{dt} + 0.62 \frac{dU}{dt} + 7.95W + 0.067 \frac{dW}{dt} = 0 \\ 0.058 \frac{dZ}{dt} + 30.22Q + 0.25 \frac{dQ}{dt} = 0 \\ 2(0.01XZ + 1.1ZU - 0.058XQ + 0.055ZW) - 0.5 \cdot 0.008663 \frac{d\omega}{dt} = 0 \end{cases} \quad (6.32)$$

$$\begin{aligned} X(0) &= 1.091504 \\ Z(0) &= -16.06171 \\ W(0) &= 0 \\ Q(0) &= 0 \\ U(0) &= 1 \\ \omega(0) &= 313.9935 \end{aligned}$$

Variația vitezei unghiulare este următoarea:

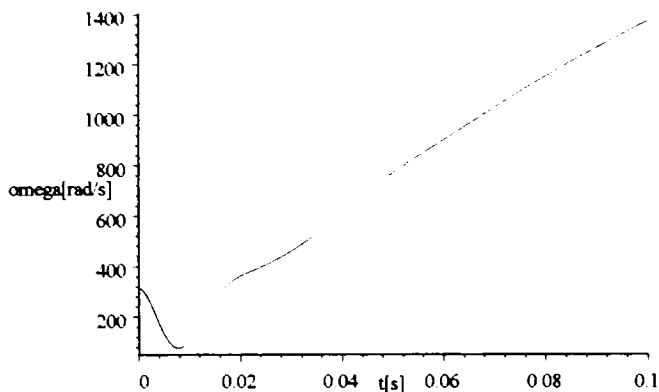


Fig.6.2.25. Variația în timp a lui  $\omega$ .

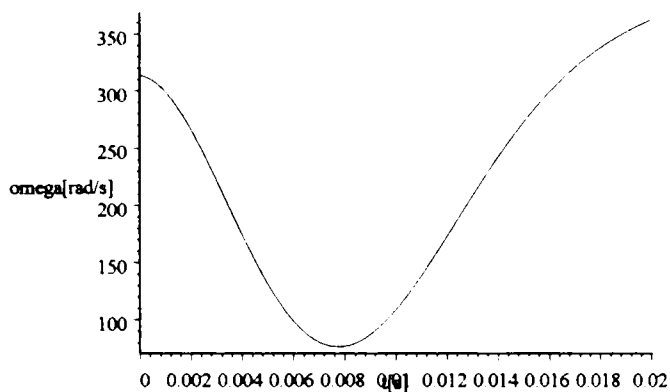


Fig.6.2.25'. Variația în timp a lui  $\omega$ (detaliu).

Mașina nu intră în sincronism și turația crește peste turația sincronă.

**Cazul C2<sub>2</sub>** Sincronizarea are loc la  $\theta = 60^\circ$ .

$$\begin{cases}
 1.6X + 0.08 \frac{dX}{dt} - 16.6682Z + 1.1 \frac{dU}{dt} + 0.055 \frac{dW}{dt} - 13.81079Q = -190\sqrt{3} \\
 19.04937X + 1.6Z + 0.07 \frac{dZ}{dt} + 261.9288U + 13.09644W + 0.058 \frac{dQ}{dt} = 110\sqrt{3} \\
 1.1 \frac{dX}{dt} + 41.3U + 18.51 \frac{dU}{dt} + 0.62 \frac{dW}{dt} = 41.3 \\
 0.055 \frac{dX}{dt} + 0.62 \frac{dU}{dt} + 7.95W + 0.067 \frac{dW}{dt} = 0 \\
 0.058 \frac{dZ}{dt} + 30.22Q + 0.25 \frac{dQ}{dt} = 0 \\
 2(0.01XZ + 1.1ZU - 0.058XQ + 0.055ZW) - 0.5 \cdot 0.008663 \frac{d\omega}{dt} = 0 \\
 X(0) = 1.091504 \\
 Z(0) = -16.06171 \\
 W(0) = 0 \\
 Q(0) = 0 \\
 U(0) = 1 \\
 \omega(0) = 313.9935
 \end{cases} \quad (6.33)$$

Variația vitezei unghiulare este următoarea:

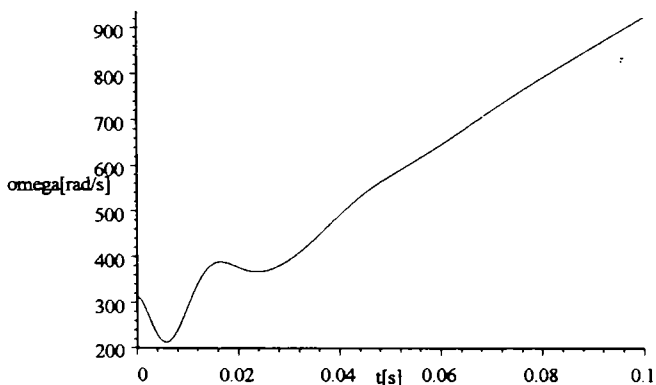


Fig.2.2.26. Variația în timp a lui  $\omega$ .

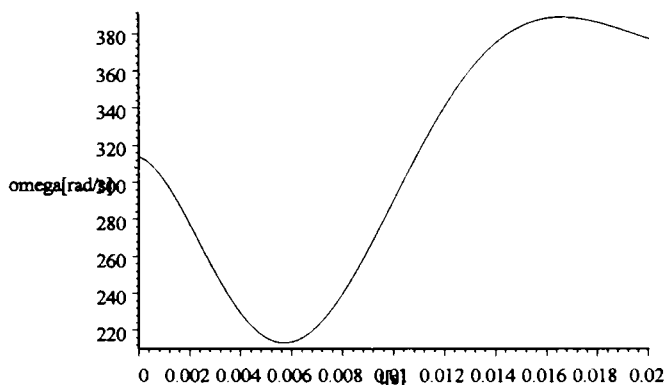


Fig.6.2.26'. Variația în timp a lui  $\omega$ (detaliu).

Nu există puncte de echilibru deoarece sistemul algebric corespunzător este incompatibil, ca atare motorul sincron nu intră în sincronism.

Cazul C2<sub>3</sub> Sincronizarea are loc la  $\theta = 0^{\circ}$ .

Sistemul de ecuații diferențiale pentru acest caz este următorul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.6X + 0.08 \frac{dX}{dt} - 16.6682Z + 1.1 \frac{dU}{dt} + 0.055 \frac{dW}{dt} - 13.81079Q = 0 \\ 19.04937X + 1.6Z + 0.07 \frac{dZ}{dt} + 261.9288U + 13.09644W + 0.058 \frac{dQ}{dt} = 220\sqrt{3} \\ 1.1 \frac{dX}{dt} + 41.3U + 18.51 \frac{dU}{dt} + 0.62 \frac{dW}{dt} = 41.3 \\ 0.055 \frac{dX}{dt} + 0.62 \frac{dU}{dt} + 7.95W + 0.067 \frac{dW}{dt} = 0 \\ 0.058 \frac{dZ}{dt} + 30.22Q + 0.25 \frac{dQ}{dt} = 0 \\ 2(0.01XZ + 1.1ZU - 0.058XQ + 0.055ZW) - 0.5 \cdot 0.008663 \frac{d\omega}{dt} = 0 \\ X(0) = 1.091504 \\ Z(0) = -16.06171 \\ W(0) = 0 \\ Q(0) = 0 \\ U(0) = 1 \\ \omega(0) = 313.9935 \end{array} \right. \quad (6.34)$$

Așa cum se poate observa în figura 6.2.27, mașina a intrat în sincronism la frecvența  $f = \frac{314}{2\pi} [Hz] = 50 [Hz]$ , viteza unghiulară stabilizându-se după 1.4s de la conectarea excitației.

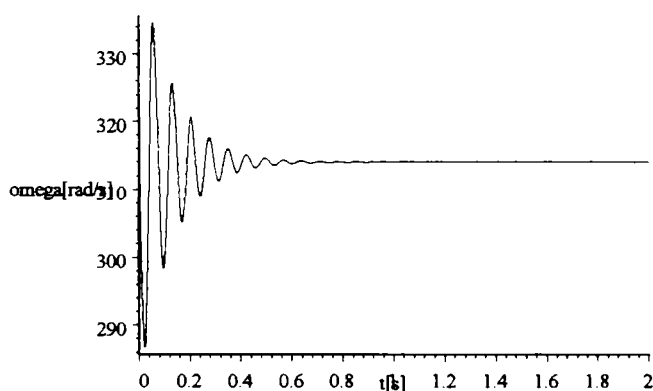


Fig.6.2.27. Variația în timp a lui  $\omega$ .

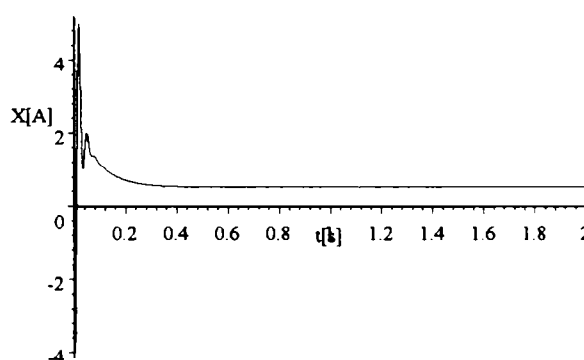


Fig.6.2.28. Variația în timp a lui  $I_d$ .

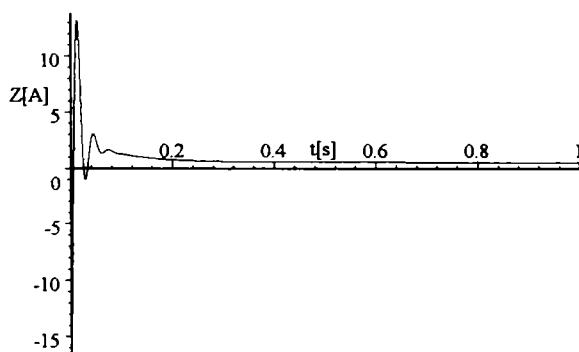


Fig.6.2.29. Variația în timp a lui  $I_q$ .

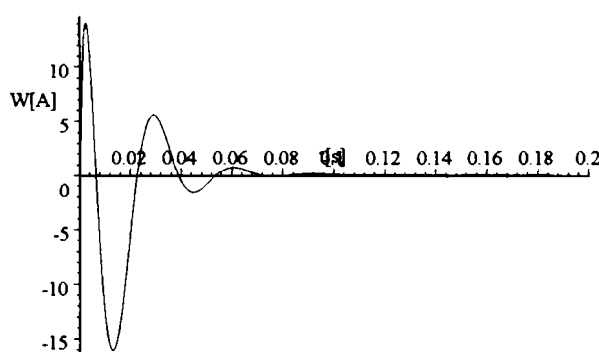


Fig.6.2.30. Variația în timp a lui  $I_D$ .

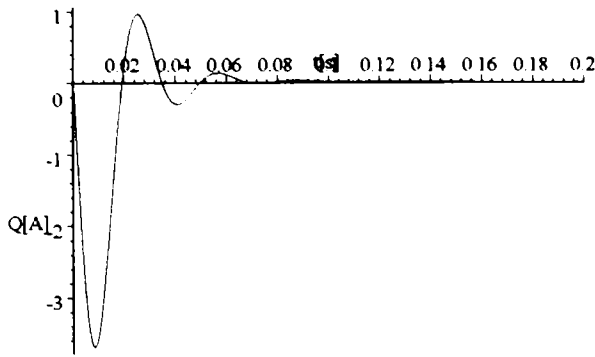


Fig.6.2.31. Variația în timp a lui  $I_Q$ .

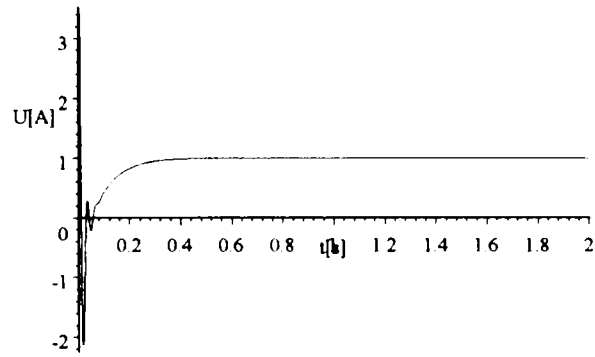


Fig.6.2.32. Variația în timp a lui  $I_E$ .

Curentul statoric respectiv cuplul electromagnetic în mașina reală sunt:

$$I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos 314t - Z(t) \sin 314t) \quad (6.35)$$

$$M_{el\text{mag}}(t) = M(t) = 2(0.01X(t)Z(t) + 1.1Z(t)U(t) - 0.058X(t)Q(t) + 0.055Z(t)W(t)) \quad (6.36)$$

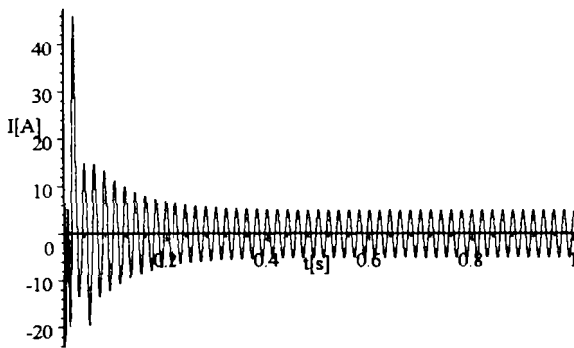


Fig.6.2.33. Variația în timp a lui  $I$ .

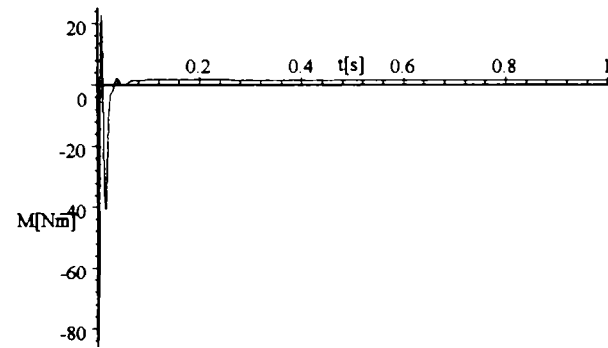


Fig.6.2.34. Variația în timp a lui  $M_{el\text{mag}}$ .

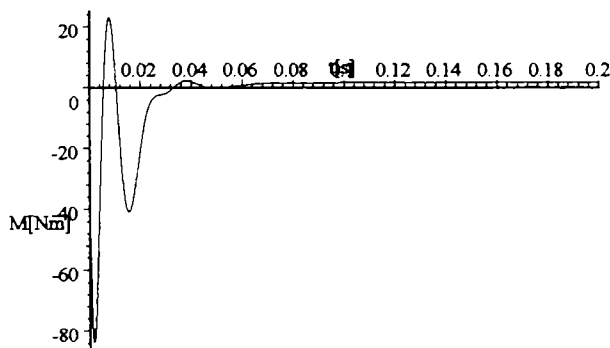


Fig.6.2.34'. Variația lui  $M_{el\text{mag}}$  (detaliu 1).

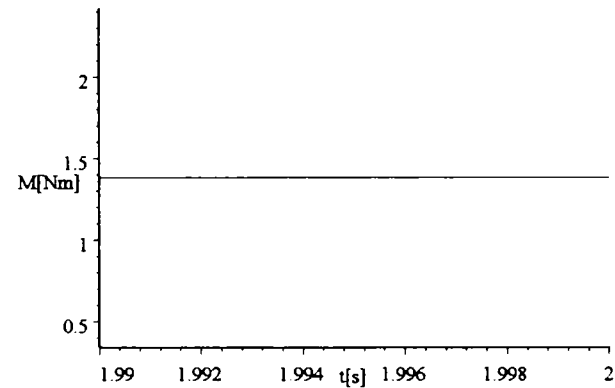


Fig.6.2.34''. Variația lui  $M_{el\text{mag}}$  (detaliu 2).

Așa cum se poate observa în figura 6.2.34'', cuplul electromagnetic se stabilizează la aceeași valoare (a se vedea figura 6.2.24'') corespunzătoare cuplului rezistent datorat frecărilor care apar:  $M(\infty) = 1.383867[Nm]$ , de unde se poate trage concluzia că modelul matematic reprezintă foarte bine realitatea fizică atât cantitativ cât și calitativ.

Din dorința de a sintetiza toate rezultatele studiului regimurilor tranzitorii prezentate în capitolul 6, și pentru a trage concluzii comparative și cât mai generale, concluziile și interpretările fenomenologice desprinse din evoluțiile în timp ale mărimilor ce caracterizează procesul tranzitoriu studiat în acest subparagraf sunt prezentate în paragraful 6.4 (la sfârșitul capitolului 6).

6.2.2. Modelarea și simularea încărcării bruște a motorului sincron

În acest paragraf se prezintă modelarea și simularea încărcării bruște de sarcină a motorului sincron, studiindu-se comportarea dinamică a acestuia în condițiile modificării momentului de inerție axial  $J$ .

Ca și la paragraful precedent, în vederea simplificării scrierii, și aici se fac următoarele notații:

<u>Mărime</u>	<u>Notăție</u>	<u>Semnificație</u>	(6.37)
$I_d(t)$	= $X(t)$	- curentul prin înfășurarea statorică din axa d,	
$I_q(t)$	= $Z(t)$	- curentul prin înfășurarea statorică din axa q,	
$I_D(t)$	= $W(t)$	- curentul prin înfășurarea de amortizare din axa d,	
$I_Q(t)$	= $Q(t)$	- curentul prin înfășurarea de amortizare din axa q,	
$I_E(t)$	= $U(t)$	- curentul prin înfășurarea de excitație,	
$\omega(t)$	= $\omega(t), \text{omega}(t)$	- pulsația electrică (sau viteza unghiulară),	
$\theta(t)$	= $\theta(t), \text{teta}(t)$	- unghiul intern (sau unghiul de sarcină),	
$I(t)$	= $I(t)$	- curentul în mașina reală,	
$M_{\text{elmag}}(t)$	= $M(t)$	- cuplul electromagnetic,	
$M_{\text{rezistent}}(t)$	= $T(t)$	- cuplul rezistent.	

Pe baza parametrilor mașinii sincrone, determinați în capitoul 4, respectiv pe baza modelului teoretic al acesteia prezentat în capitoul 3, rezultă următorul model matematic care descrie dinamica motorului sincron la o încărcare bruscă în condițiile prezentate mai sus:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 1.6X + 0.08 \frac{dX}{dt} - 0.07\omega Z + 1.1 \frac{dU}{dt} + 0.055 \frac{dW}{dt} - 0.058\omega Q = -220\sqrt{3} \sin \theta \\
 0.08\omega X + 1.6Z + 0.07 \frac{dZ}{dt} + 1.1\omega U + 0.055\omega W + 0.058 \frac{dQ}{dt} = 220\sqrt{3} \cos \theta \\
 1.1 \frac{dX}{dt} + 41.3U + 18.51 \frac{dU}{dt} + 0.62 \frac{dW}{dt} = E = 41.3 \\
 0.055 \frac{dX}{dt} + 0.62 \frac{dU}{dt} + 7.95W + 0.067 \frac{dW}{dt} = 0 \\
 0.058 \frac{dZ}{dt} + 30.22Q + 0.25 \frac{dQ}{dt} = 0 \\
 2(0.01XZ + 1.1ZU - 0.058XQ + 0.055ZW) - T - 0.5 \cdot \boxed{J} \frac{d\omega}{dt} = 0 \\
 \frac{d\theta}{dt} + \omega - 314 = 0 \\
 \theta(0) = 0 \\
 X(0) = 0 \\
 Z(0) = 0 \\
 W(0) = 0 \\
 Q(0) = 0 \\
 U(0) = 1 \\
 \omega(0) = 314
 \end{array} \right. \quad (6.38)$$

Se prezintă (pe baza celor afirmate în capitoul 3) un studiu asupra stabilității sistemului de ecuații diferențiale și asupra existenței soluției (punctelor stabile de echilibru).

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.6X + 0.08 \frac{dX}{dt} - 0.07\omega Z + 1.1 \frac{dU}{dt} + 0.055 \frac{dW}{dt} - 0.058\omega Q = -220\sqrt{3} \sin\theta \\ 0.08\omega X + 1.6Z + 0.07 \frac{dZ}{dt} + 1.1\omega U + 0.055\omega W + 0.058 \frac{dQ}{dt} = 220\sqrt{3} \cos\theta \\ 1.1 \frac{dX}{dt} + 41.3U + 18.51 \frac{dU}{dt} + 0.62 \frac{dW}{dt} = E \\ 0.055 \frac{dX}{dt} + 0.62 \frac{dU}{dt} + 7.95W + 0.067 \frac{dW}{dt} = 0 \\ 0.058 \frac{dZ}{dt} + 30.22Q + 0.25 \frac{dQ}{dt} = 0 \\ 2(0.01XZ + 1.1ZU - 0.058XQ + 0.055ZW) - T - 0.5 \cdot J \frac{d\omega}{dt} = 0 \\ \frac{d\theta}{dt} + \omega - 6.28f = 0 \\ f = 50 \end{array} \right. \quad (6.39)$$

Matricea  $A$  formată din coeficienții derivatelor din sistemul de ecuații diferențiale are un determinant foarte mic (care tinde spre zero) ceea ce impune o computație cu un număr de zecimale foarte mare ( $10^{-10} - 10^{-12}$ ) pentru a evita nedeterminările care apar (împărțiri cu zero).

$$A = \begin{pmatrix} 0.08 & 1.1 & 0.055 & 0 & 0 \\ 1.1 & 18.51 & 0.62 & 0 & 0 \\ 0.055 & 0.62 & 0.067 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.25 & 0.058 \\ 0 & 0 & 0 & 0.058 & 0.07 \end{pmatrix}, \text{determinant } A = 0.000090737 \neq 0 \quad (6.40)$$

După separarea derivatelor în membrul stâng, sistemul de ecuații diferențiale devine:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dX}{dt} = -213.3142X + 416.2112W + 254.7933U - \\ -6.169329E + 9.332497\omega Z + 7.732641\omega Q - 50802.27 \sin\theta \\ \frac{dZ}{dt} = 123.9926Q - 1.414827\omega X - 28.29655Z - \\ -19.45388\omega U - 0.9726938\omega W + 6739.021 \cos\theta \\ \frac{dQ}{dt} = 0.32824\omega X + 6.564799Z - 149.6463Q + 4.513299\omega U + \\ + 0.225665\omega W - 1563.453 \cos\theta \\ \frac{dU}{dt} = 9.870927X - 13.50008W - 15.0238U + 0.3637723E - \\ -0.4318531\omega Z - 0.3578211\omega Q + 2350.83 \sin\theta \\ \frac{dW}{dt} = 83.76578X - 335.3965W - 70.1325U + 1.698123E - \\ -3.664753\omega Z - 3.03651\omega Q + 19949.41 \sin\theta \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{0.02XZ + 2.2ZU - 0.116XQ + 0.11ZW - 1.0T}{0.5J} \\ \frac{d\theta}{dt} = -1.0\omega + 314 \end{array} \right. \quad (6.41)$$

În sistemul de ecuații de mai sus(6.41), de observă că termenii care conțin pe  $\sin\theta, \cos\theta, E$  (tensiunea pe înfășurarea de excitație) și  $T$  (cuplul rezistent) sunt constanți pentru orice valori ale lui  $\theta \in (0 \div \frac{\pi}{2})$  (intervalul de stabilitate în funcționare),  $E \in (0 \div 110)[V]$ , respectiv  $T \in (0 \div T_N \approx 16)[Nm]$ , ca atare ei sunt termeni liberi în ecuațiile sistemului, deci nu influențează stabilitatea sistemului de ecuații decisă de valorile proprii ale matricii  $G$ .

Matricea  $G$  se formează din coeficienții funcțiilor (din membrul drept) ale sistemului de ecuații(6.41),



$$G = \begin{pmatrix} -213.3142 & 9.332497\omega & 7.732641\omega & 254.7933 & 416.2112 & 0 & 0 \\ -1.414827\omega & -28.29655 & 123.9926 & -19.45388\omega & -0.9726938\omega & 0 & 0 \\ 0.32824\omega & 6.564799 & -149.6463 & 4.513299\omega & 0.225665\omega & 0 & 0 \\ 9.870927 & -0.4318531\omega & -0.3578211\omega & -15.0238 & -13.50008 & 0 & 0 \\ 83.76578 & -3.664753\omega & -3.03651\omega & -70.1325 & -335.3965 & 0 & 0 \\ \frac{0.02Z-0.116Q}{0.5J} & \frac{0.02X+2.2U+0.11W}{0.5J} & \frac{-0.116X}{0.5J} & \frac{2.2Z}{0.5J} & \frac{0.11Z}{0.5J} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (6.42)$$

Se observă că stabilitatea sistemului depinde de punctul de funcționare al mașinii sincrone (definit de valorile funcțiilor  $X, Z, U, W, Q, \omega$  în punctul respectiv, care sunt de altfel condițiile inițiale și finale ale sistemului de ecuații diferențiale) dar în aceeași măsură stabilitatea depinde de valoarea momentului de inerție axial  $J$ .

În următoarele trei tabele se dau valorile proprii în 5 puncte de funcționare (din domeniul de interes:  $0\%M_N \div 100\%M_N$ ) pentru 3 valori (mai semnificative) ale momentului de inerție axial  $J$ .

J [kg · m <sup>2</sup> ]	punctul de funcționare	X [A]	Z [A]	U [A]	W [A]	Q [A]	$\omega$ [rad/s]	valorile proprii	
	0% $M_N$	0	0	1	0	0	314	{ -0.7859 -10.8938 -417.8351 -11.98671 -150.528 -80.663 + 271.935j -80.663 - 271.935j	
	25% $M_N$	1.231	1.798	1	0	0	314		
	50% $M_N$	0.868	3.607	1	0	0	314		
									{ -0.7744 -10.8948 -417.8351 -150.5288 -11.98671 -80.663 + 271.935j -80.663 - 271.935j
$J_1 = 0.008663$	50% $M_N$	0.868	3.607	1	0	0	314		{ -0.7753 -10.8996 -417.8351 -150.5288 -11.98671 -80.663 + 271.935j -80.663 - 271.935j

(6.43)

									$\left. \begin{array}{l} -0.7664 \\ -10.8887 \\ -417.8351 \\ -150.5288 \\ -11.98671 \\ -80.663 + 271.935j \\ -80.663 - 271.935j \end{array} \right\}$
	$75\%M_N$	0.313	5.439	1	0	0	314		
									$\left. \begin{array}{l} -0.7859 \\ -10.8834 \\ -417.8351 \\ -11.98671 \\ -150.5288 \\ -80.663 + 271.935j \\ -80.663 - 271.935j \end{array} \right\}$
	$100\%M_N$	-0.472	7.304	1	0	0	314		
$J$ [kg · m <sup>2</sup> ]	punctul de funcționare	X [A]	Z [A]	U [A]	W [A]	Q [A]	$\omega$ [rad/s]		valorile proprii
	$0\%M_N$	0	0	1	0	0	314		$\left. \begin{array}{l} -0.7859 \\ -10.8934 \\ -417.8351 \\ -11.98671 \\ -150.5288 \\ -80.663 + 271.935j \\ -80.663 - 271.935j \end{array} \right\} \quad (6.44)$
	$25\%M_N$	1.231	1.798	1	0	0	314		$\left. \begin{array}{l} -0.7849 \\ -10.8738 \\ -417.8351 \\ -150.5288 \\ -11.98671 \\ -80.663 + 271.935j \\ -80.663 - 271.935j \end{array} \right\}$

$J_2 = 0.08663$	$50\%M_N$	0.868	3.607	1	0	0	314	$\left\{ \begin{array}{l} -0.7853 \\ -10.8896 \\ -417.8351 \\ -150.5288 \\ -11.98671 \\ -80.663 + 271.935j \\ -80.663 - 271.935j \end{array} \right.$	
	$75\%M_N$	0.313	5.439	1	0	0	314		$\left\{ \begin{array}{l} -0.7764 \\ -10.8867 \\ -417.8351 \\ -150.5288 \\ -11.98671 \\ -80.663 + 271.935j \\ -80.663 - 271.935j \end{array} \right.$
	$100\%M_N$	-0.472	7.304	1	0	0	314		

J [kg · m <sup>2</sup> ]	punctul de funcționare	X [A]	Z [A]	U [A]	W [A]	Q [A]	$\omega$ [rad/s]	valorile proprii
	$0\%M_N$	0	0	1	0	0	314	$\left\{ \begin{array}{l} -0.7759 \\ -10.8734 \\ -417.8351 \\ -11.98671 \\ -150.5288 \\ -80.663 + 271.935j \\ -80.663 - 271.935j \end{array} \right.$

(6.45)

							-0.7739
							-10.8858
							-417.8351
		25%M <sub>N</sub>	1.231	1.798	1	0 0	314 -150.5288
							-11.98671
							-80.663 + 271.935j
							-80.663 - 271.935j
							-0.7753
							-10.8776
							-417.8351
	J <sub>3</sub> = 0.8663	50%M <sub>N</sub>	0.868	3.607	1	0 0	314 -150.5288
							-11.98671
							-80.663 + 271.935j
							-80.663 - 271.935j
							-0.7654
							-10.87767
							-417.8351
		75%M <sub>N</sub>	0.313	5.439	1	0 0	314 -150.5288
							-11.98671
							-80.663 + 271.935j
							-80.663 - 271.935j
							-0.7765
							-10.8968.
							-417.8351
		100%M <sub>N</sub>	-0.472	7.304	1	0 0	314 -150.5288
							-11.98671
							-80.663 + 271.935j
							-80.663 - 271.935j

Din tabelele de mai sus se poate observa că toate valorile proprii în cele 5 puncte de echilibru (pentru toate cele 3 valori ale lui  $J$ ) au partea reală negativă, de unde se poate trage concluzia că cele 5 puncte de funcționare sunt puncte de echilibru (funcționare) stabile, respectiv sistemul de ecuații diferențiale analizat, din punctul de vedere al stabilității este stabil. Plecând de la cele afirmate mai sus, se poate trage o concluzie cu caracter mai general și anume că sistemul de ecuații diferențiale analizat este stabil pe toată plaja determinată de cele 5 puncte de funcționare (de la mersul în gol până la încărcare nominală), respectiv cele 3 valori ale lui  $J$  ( $J_1 = J_{motor} = 0.008663[kg \cdot m^2] \div J_3 = 100 \cdot J_1 = 0.8663[kg \cdot m^2]$ ) care au fost alese.

Problema stabilității fiind rezolvată se trece la soluționarea sistemului de ecuații diferențiale.

După cum se poate observa din sistemul de ecuații (6.41), pentru un anumit cuplu rezistent la arbore ( $T$  dat), mărimile din model sunt funcții de două variabile: de timp și de  $J$ . Pe baza acestei constatări, se poate afirma că influența modificării momentului de inerție axial asupra dinamicii funcționării motorului sincron în diverse regimuri tranzitorii (în cazul de față încărcare bruscă) se rezumă la o reprezentare spațială (3D) a mărimilor care interesează. Datorită faptului că aceste reprezentări amintite mai sus se constituie în fond în suprafețe oscilante (cu o frecvență foarte mare) în spațiu, a cărei evoluție este foarte dificil de reprezentat dar și de urmărit, se consideră pentru  $J$  doar trei valori care sunt mai semnificative în intervalul de variație al acestuia și anume:

$$J_1 = 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]; J_2 = 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]; J_3 = 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2].$$

Variațiile în timp ale mărimilor în procesele tranzitorii se vor reprezenta pe grafice ca fiind diferențiate prin culoare, după cum rezultă din legenda care urmează:

<b>pentru</b>	<b>corespunde</b>	<b>culoarea</b>	
$J = J_1 = 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	→	negru	(6.46)
$J = J_2 = 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	→	roșu	
$J = J_3 = 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	→	verde	

Pentru cele cinci puncte de funcționare stabilă (la 0%, 25%, 50%, 75% și 100% din  $M_N$ ) a motorului sincron, se determină mărimile de regim staționar care nu sunt altceva decât condiții inițiale sau finale pentru sistemul de ecuații diferențiale. Acest lucru se realizează prin anularea derivatelor sistemului de ecuații diferențiale respectiv mărimilor care reprezintă colivia de amortizare (care după cum se cunoaște nu intervine în regimurile staționare), rezultând următorul sistem algebric:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.6X - 0.07\omega Z = -220\sqrt{3} \sin \theta \\ 0.08\omega X + 1.6Z + 1.1\omega U = 220\sqrt{3} \cos \theta \\ 41.3U = 41.3 \\ 2(0.01XZ + 1.1ZU) - [T] = 0 \\ \omega - 314 = 0 \\ I = \sqrt{X^2 + Z^2} \\ M = 2(0.01XZ + 1.1ZU) \end{array} \right. \quad (6.47)$$

de unde, prin soluționarea sistemului 6.47, rezultă:

<b>T[Nm]</b>	<b>X[A]</b>	<b>Z[A]</b>	<b>U[A]</b>	<b><math>\omega</math>[rad/s]</b>	
= 0% $M_N = 0$ [Nm]	0	0	1	314	
= 25% $M_N = 4$ [Nm]	1.230869	1.798062	1	314	
= 50% $M_N = 8$ [Nm]	0.8689773	3.607862	1	314	
= 75% $M_N = 12$ [Nm]	0.3134804	5.439045	1	314	
= 100% $M_N = 16$ [Nm]	-0.4720558	7.304072	1	314	(6.48)
limita de stabilitate					
la încărcare bruscă	-11.61801	16.11067	1	314	
<b>T<sub>lim</sub> = 31.7</b> [Nm]					

T[Nm]	$\theta$ [rad]	I[A]	M[Nm]
= 0% $M_N = 0$ [Nm]	0	0	0
= 25% $M_N = 4$ [Nm]	0.09870869	1.45267	4
= 50% $M_N = 8$ [Nm]	0.205914	2.474024	8
= 75% $M_N = 12$ [Nm]	0.3177412	3.632048	12
= 100% $M_N = 16$ [Nm]	0.4370842 (= 25.04382°)	4.87954	16
limita de stabilitate			
la încărcare bruscă	1.361068 < $\theta_{lim} = 1.57$	13.24188	31.7(= 1.98125 $M_N$ )
$T_{lim} = 31.7$ [Nm]			

(6.49)

6.2.2.1. Încărcare bruscă de la 0% la 25% din  $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial  
Sistemul de ecuații diferențiale care modelează acest proces este următorul:

$$\left. \begin{aligned}
 1.6X + 0.08 \frac{dX}{dt} - 0.07\omega Z + 1.1 \frac{dU}{dt} + 0.055 \frac{dW}{dt} - 0.058\omega Q &= -220\sqrt{3} \sin \theta \\
 0.08\omega X + 1.6Z + 0.07 \frac{dZ}{dt} + 1.1\omega U + 0.055\omega W + 0.058 \frac{dQ}{dt} &= 220\sqrt{3} \cos \theta \\
 1.1 \frac{dX}{dt} + 41.3U + 18.51 \frac{dU}{dt} + 0.62 \frac{dW}{dt} &= 41.3 \\
 0.055 \frac{dX}{dt} + 0.62 \frac{dU}{dt} + 7.95W + 0.067 \frac{dW}{dt} &= 0 \\
 0.058 \frac{dZ}{dt} + 30.22Q + 0.25 \frac{dQ}{dt} &= 0 \\
 2(0.01XZ + 1.1ZU - 0.058XQ + 0.055ZW) - 4 - 0.5 \cdot \boxed{J} \frac{d\omega}{dt} &= 0 \\
 \frac{d\theta}{dt} + \omega - 314 &= 0 \\
 \theta(0) &= 0 \\
 X(0) &= 0 \\
 Z(0) &= 0 \\
 W(0) &= 0 \\
 Q(0) &= 0 \\
 U(0) &= 1 \\
 \omega(0) &= 314
 \end{aligned} \right\} \quad (6.50)$$

Ținând seama de cele arătate la paginile 58-62, în urma soluționării sistemului de mai sus, se obțin următoarele evoluții în timp ale mărimilor:

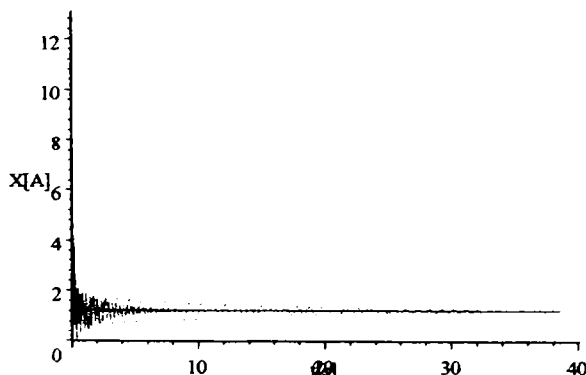


Fig. 6.2.35. Variația în timp a lui  $I_d$ .

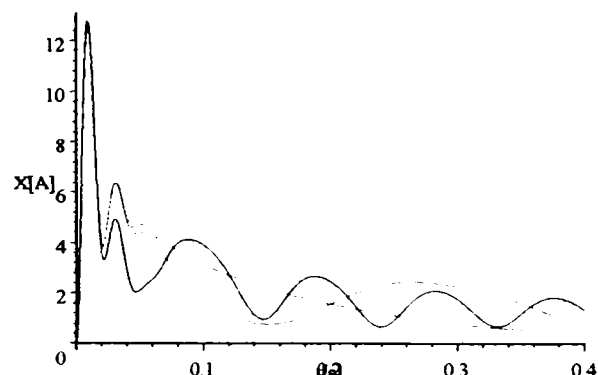


Fig. 6.2.35'. Variația în timp a lui  $I_d$  (detaliu).

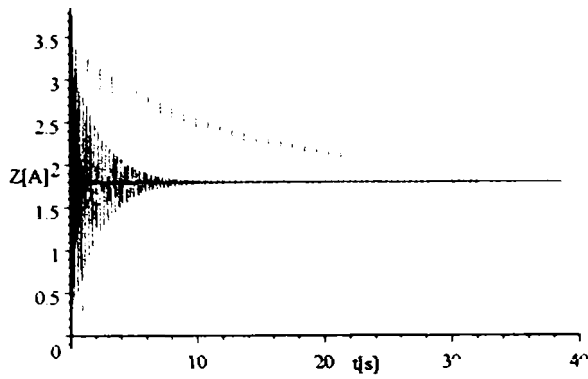


Fig.6.2.36. Variația în timp a lui  $I_q$ .

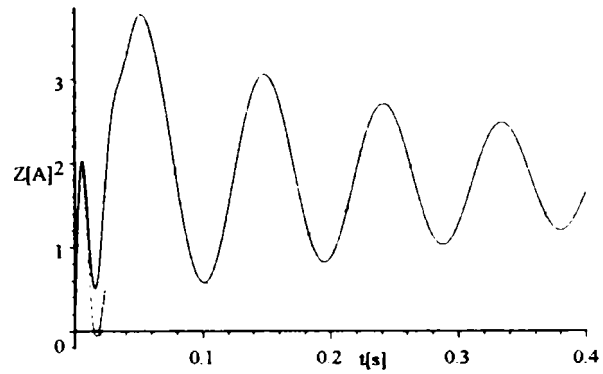


Fig.6.2.36'. Variația în timp a lui  $I_q$  (detaliu).

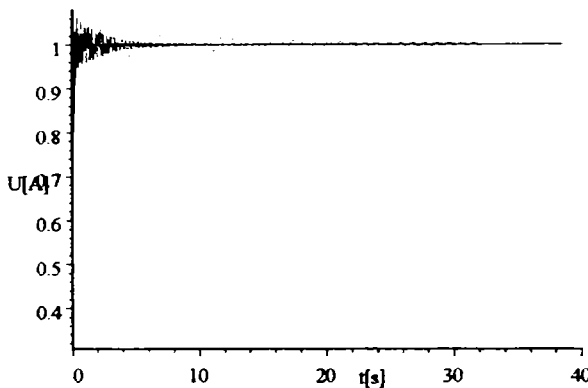


Fig.6.2.37. Variația în timp a lui  $I_E$ .

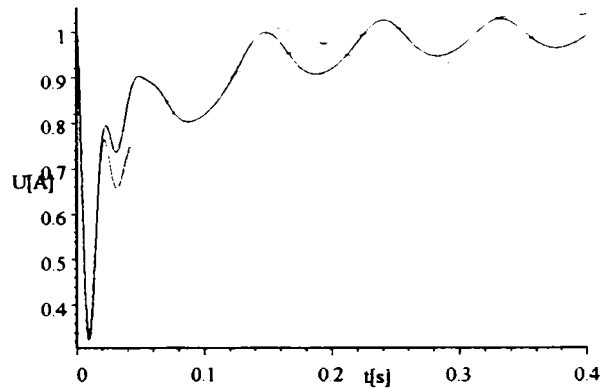


Fig.6.2.37'. Variația în timp a lui  $I_E$  (detaliu).

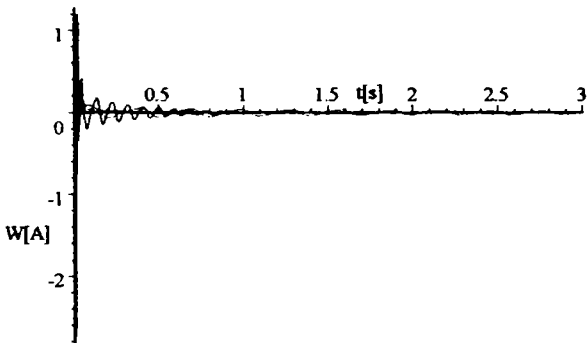


Fig.6.2.38. Variația în timp a lui  $I_D$ .

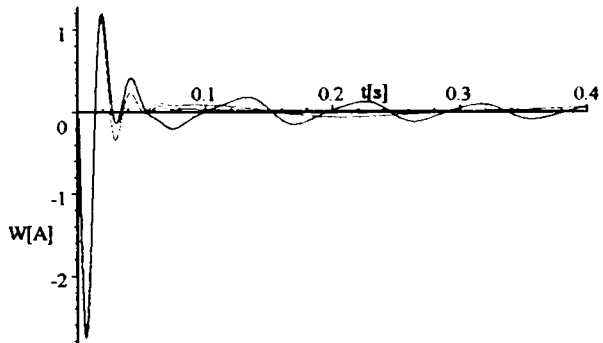


Fig.6.2.38'. Variația în timp a lui  $I_D$  (detaliu).

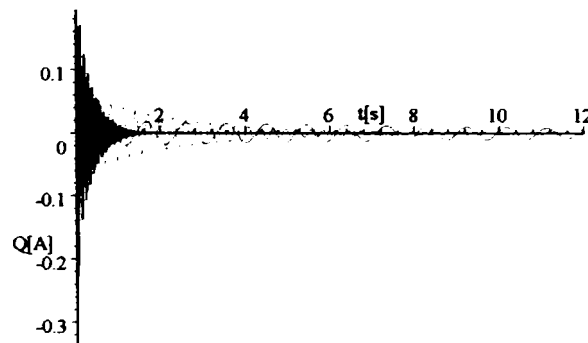


Fig.6.2.39. Variația în timp a lui  $I_Q$ .

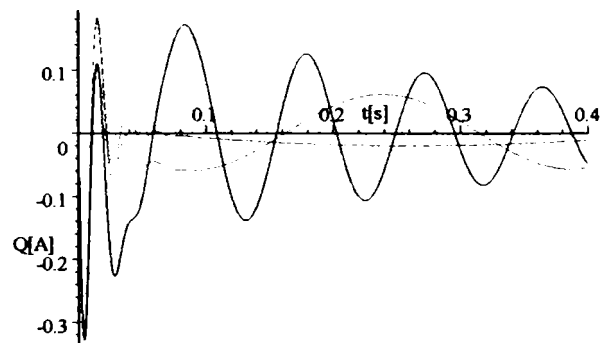


Fig.6.2.39'. Variația în timp a lui  $I_Q$  (detaliu).

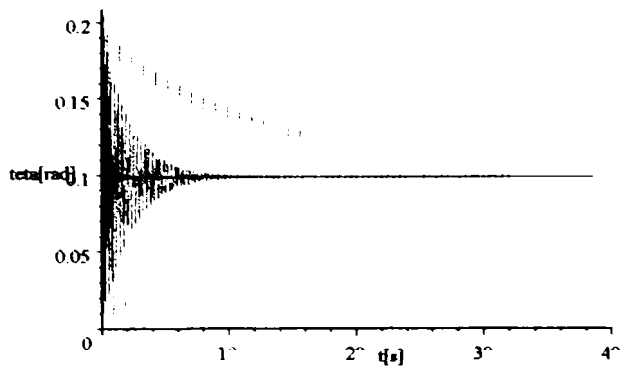


Fig.6.2.40. Variația în timp a lui  $\theta$ .

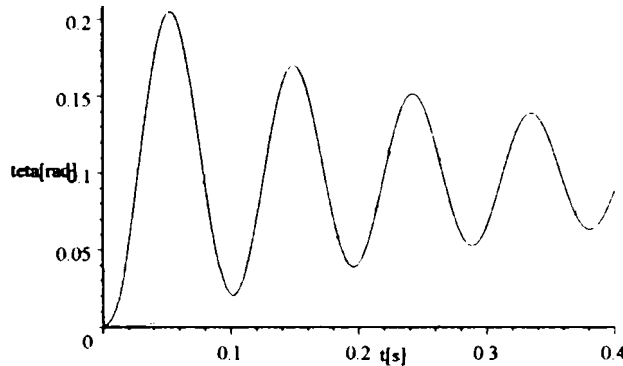


Fig.6.2.40'. Variația în timp a lui  $\theta$  (detaliu).

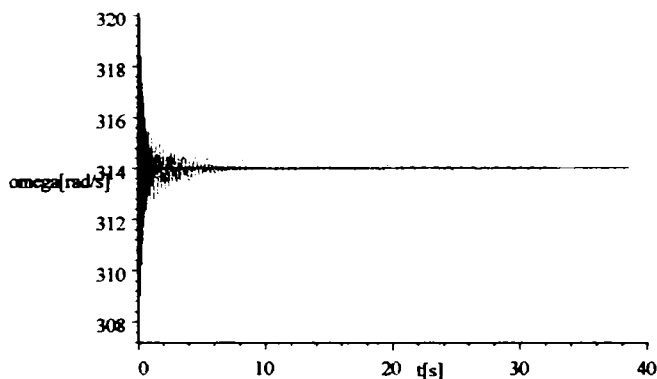


Fig.6.2.41. Variația în timp a lui  $\omega$ .

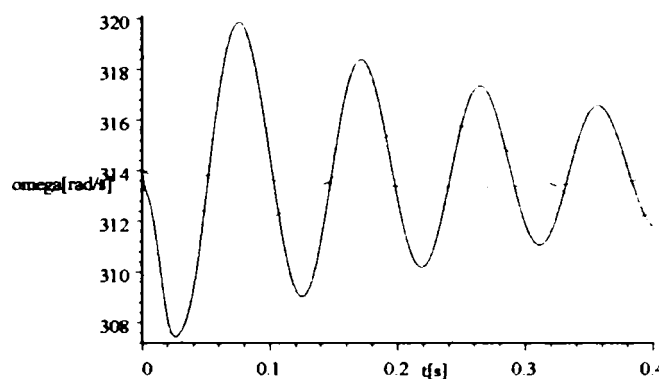


Fig.6.2.41'. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu).

Curentul statoric respectiv cuplul electromagnetic în mașina reală sunt:

$$I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos(\omega(t) \cdot t) - Z(t) \sin(\omega(t) \cdot t)) \quad (6.51)$$

$$M_{el\text{mag}}(t) = M(t) = 2(0.01X(t)Z(t) + 1.1Z(t)U(t) - 0.058X(t)Q(t) + 0.055Z(t)W(t)) \quad (6.52)$$



Fig.6.2.42. Variația în timp a lui  $I$ .

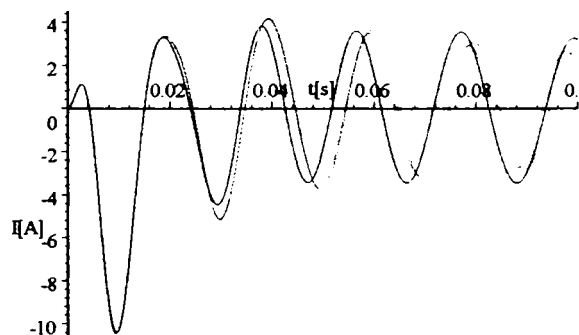


Fig.6.2.42'. Variația în timp a lui  $I$  (detaliu).

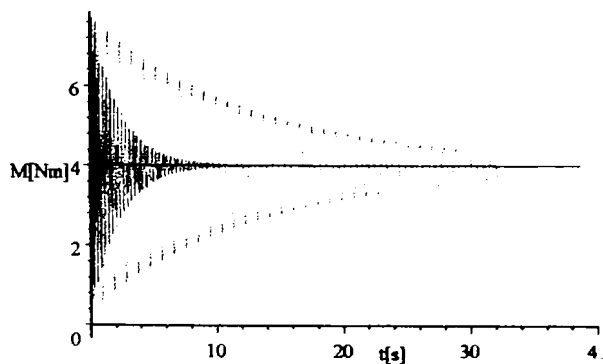


Fig.6.2.43. Variația în timp a lui  $M_{el\text{mag}}$ .

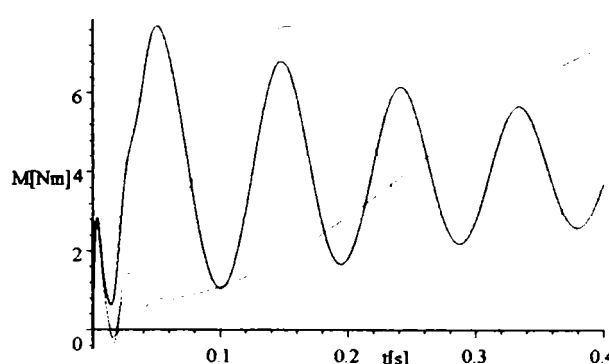


Fig.6.2.43'. Variația în timp a lui  $M_{el\text{mag}}$  (detaliu).

Rezultatele studiului regimului tranzitoriu studiat în acest subparagraf sunt date în paragraful 6.4.



6.2.2.2. Încărcare bruscă de la 0% la 50% din  $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial  
Sistemul de ecuații diferențiale care modelează acest proces este următorul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.6X + 0.08 \frac{dX}{dt} - 0.07\omega Z + 1.1 \frac{dU}{dt} + 0.055 \frac{dW}{dt} - 0.058\omega Q = -220\sqrt{3} \sin\theta \\ 0.08\omega X + 1.6Z + 0.07 \frac{dZ}{dt} + 1.1\omega U + 0.055\omega W + 0.058 \frac{dQ}{dt} = 220\sqrt{3} \cos\theta \\ 1.1 \frac{dX}{dt} + 41.3U + 18.51 \frac{dU}{dt} + 0.62 \frac{dW}{dt} = 41.3 \\ 0.055 \frac{dX}{dt} + 0.62 \frac{dU}{dt} + 7.95W + 0.067 \frac{dW}{dt} = 0 \\ 0.058 \frac{dZ}{dt} + 30.22Q + 0.25 \frac{dQ}{dt} = 0 \\ 2(0.01XZ + 1.1ZU - 0.058XQ + 0.055ZW) - 8 - 0.5 \cdot \boxed{J} \frac{d\omega}{dt} = 0 \\ \frac{d\theta}{dt} + \omega - 314 = 0 \end{array} \right. \quad (6.53)$$

$$\begin{array}{l} \theta(0) = 0 \\ X(0) = 0 \\ Z(0) = 0 \\ W(0) = 0 \\ Q(0) = 0 \\ U(0) = 1 \\ \omega(0) = 314 \end{array}$$

În urma soluționării sistemului de mai sus, se obțin următoarele evoluții în timp ale mărimilor:

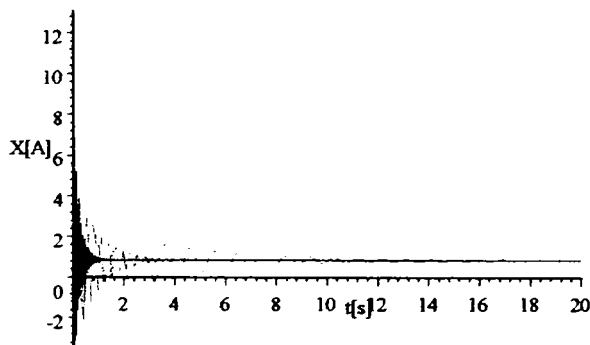


Fig. 6.2.44. Variația în timp a lui  $I_d$ .

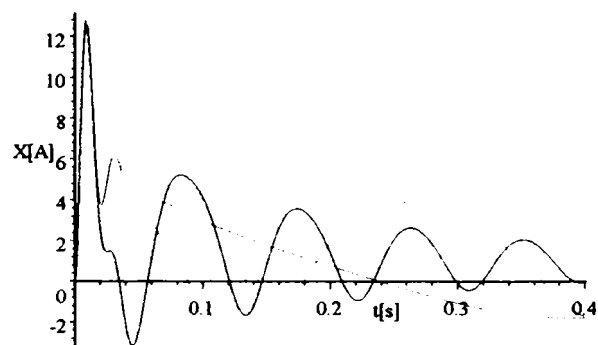


Fig. 6.2.44'. Variația în timp a lui  $I_d$  (detaliu).

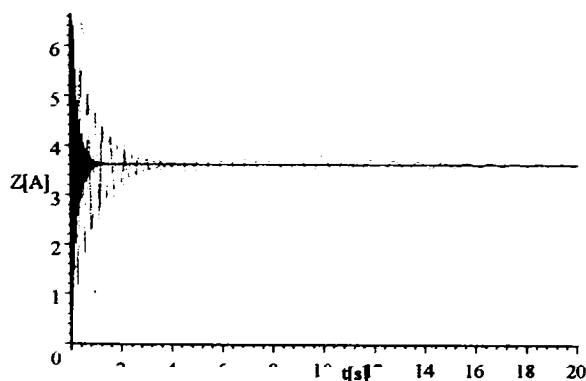


Fig. 6.2.45. Variația în timp a lui  $I_q$ .

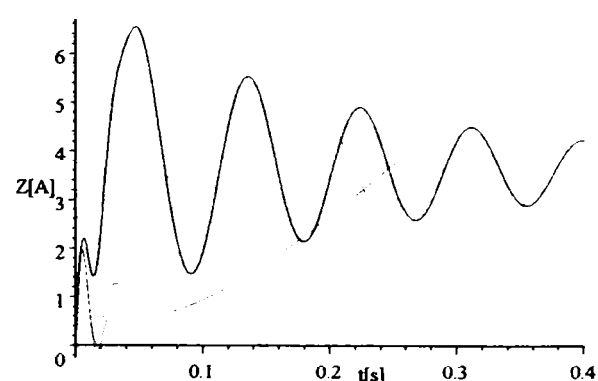


Fig. 6.2.45'. Variația în timp a lui  $I_q$  (detaliu).

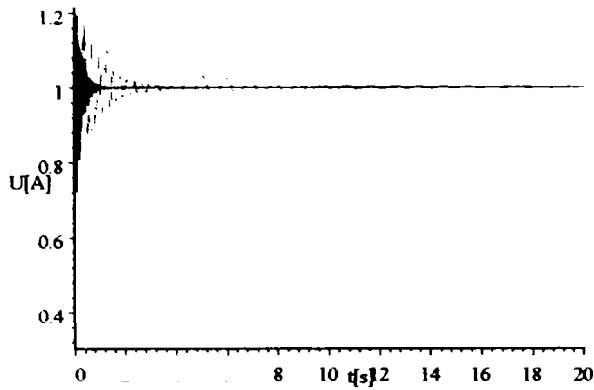


Fig.6.2.46. Variația în timp a lui  $I_E$ .

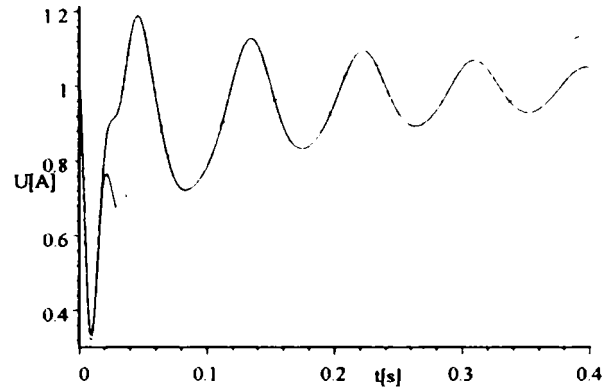


Fig.6.2.46'. Variația în timp a lui  $I_E$  (detaliu).

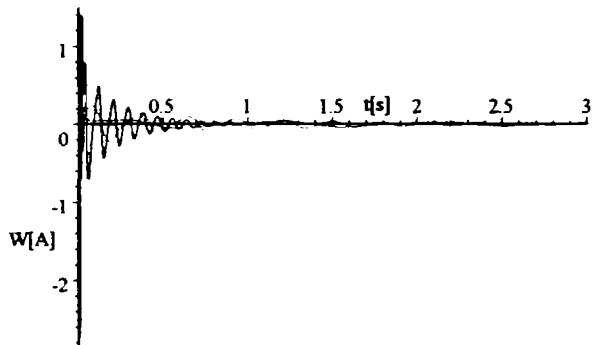


Fig.6.2.47. Variația în timp a lui  $I_D$ .

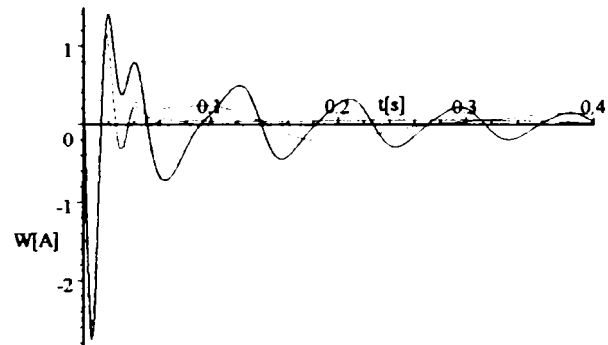


Fig.6.2.47'. Variația în timp a lui  $I_D$  (detaliu).

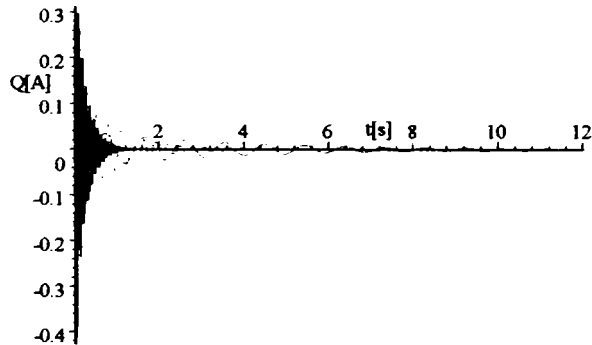


Fig.6.2.48. Variația în timp a lui  $I_Q$ .

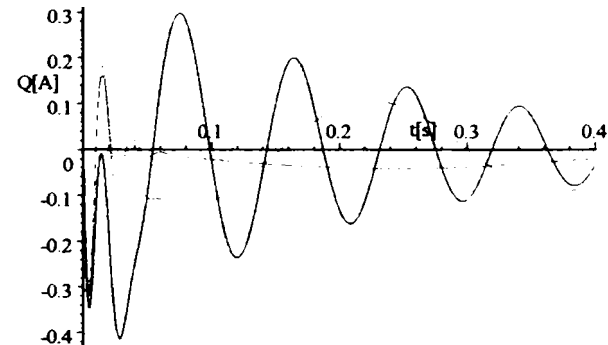


Fig.6.2.48'. Variația în timp a lui  $I_Q$  (detaliu).

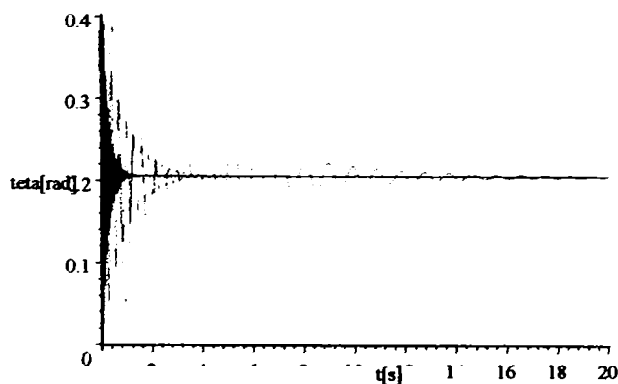


Fig.6.2.49. Variația în timp a lui  $\theta$ .

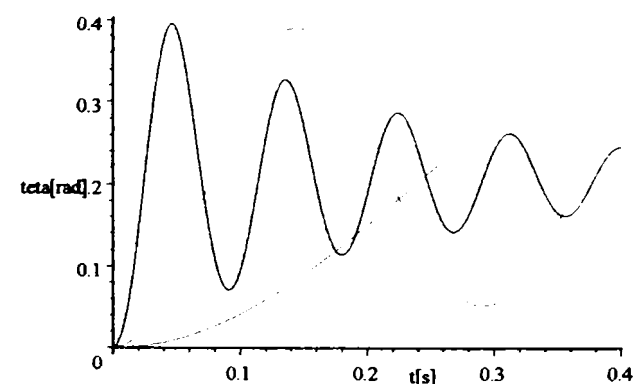


Fig.6.2.49'. Variația în timp a lui  $\theta$  (detaliu).

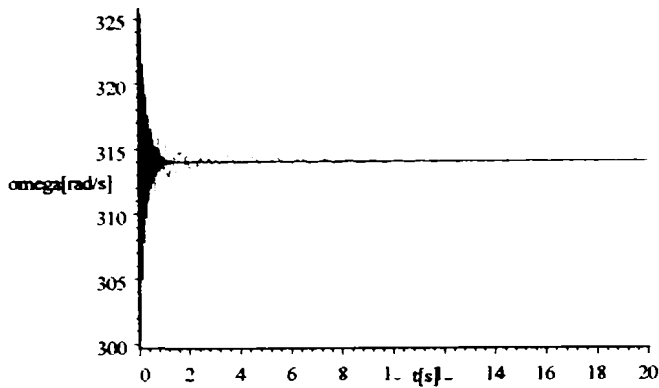


Fig. 6.2.50. Variația în timp a lui  $\omega$ .

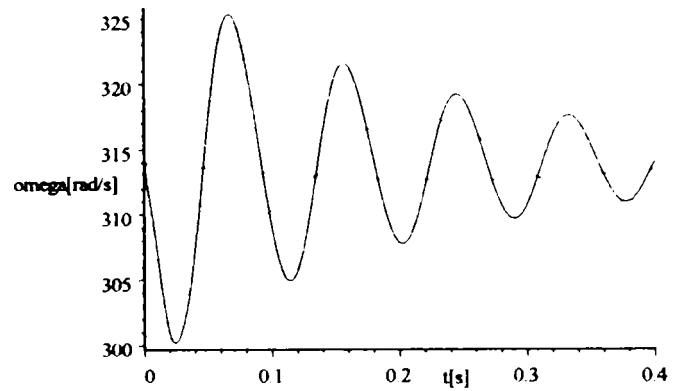


Fig. 6.2.50'. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu).

Curentul statoric respectiv cuplul electromagnetic în mașina reală sunt:

$$I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos(\omega(t) \cdot t) - Z(t) \sin(\omega(t) \cdot t)) \quad (6.54)$$

$$M_{el\text{mag}}(t) = M(t) = 2(0.01X(t)Z(t) + 1.1Z(t)U(t) - 0.058X(t)Q(t) + 0.055Z(t)W(t)) \quad (6.55)$$



Fig. 6.2.51. Variația în timp a lui  $I$ .

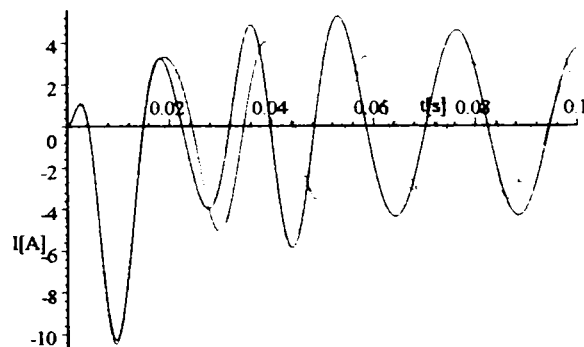


Fig. 6.2.51'. Variația în timp a lui  $I$  (detaliu).

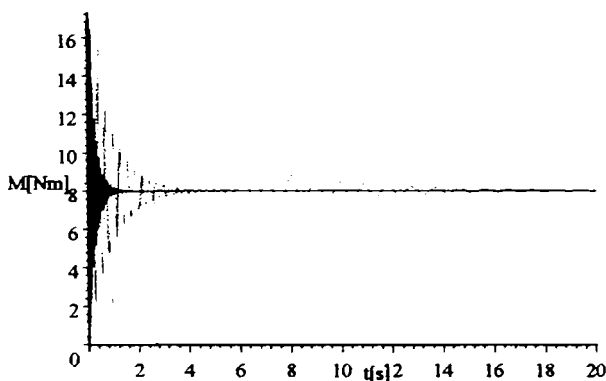


Fig. 6.2.52. Variația în timp a lui  $M_{el\text{mag}}$ .

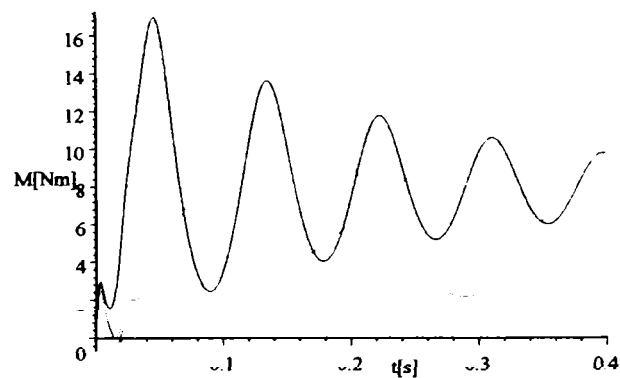


Fig. 6.2.52'. Variația în timp a lui  $M_{el\text{mag}}$  (detaliu).

Din dorința de a sintetiza toate rezultatele studiului regimurilor tranzitorii prezentate în capitolul 6, și pentru a trage concluzii comparative și cât mai generale, concluziile și interpretările fenomenologice desprinse din evoluțiile în timp ale mărimilor ce caracterizează procesul tranzitoriu studiat în acest subparagraf sunt prezentate în paragraful 6.4 (la sfârșitul capitolului 6).

6.2.2.3. Încărcare bruscă de la 0% la 75% din  $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial  
Sistemul de ecuații diferențiale care modelează acest proces este următorul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.6X + 0.08 \frac{dX}{dt} - 0.07\omega Z + 1.1 \frac{dU}{dt} + 0.055 \frac{dW}{dt} - 0.058\omega Q = -220\sqrt{3} \sin \theta \\ 0.08\omega X + 1.6Z + 0.07 \frac{dZ}{dt} + 1.1\omega U + 0.055\omega W + 0.058 \frac{dQ}{dt} = 220\sqrt{3} \cos \theta \\ 1.1 \frac{dX}{dt} + 41.3U + 18.51 \frac{dU}{dt} + 0.62 \frac{dW}{dt} = 41.3 \\ 0.055 \frac{dX}{dt} + 0.62 \frac{dU}{dt} + 7.95W + 0.067 \frac{dW}{dt} = 0 \\ 0.058 \frac{dZ}{dt} + 30.22Q + 0.25 \frac{dQ}{dt} = 0 \\ 2(0.01XZ + 1.1ZU - 0.058XQ + 0.055ZW) - 12 - 0.5 \cdot \boxed{J} \frac{d\omega}{dt} = 0 \\ \frac{d\theta}{dt} + \omega - 314 = 0 \end{array} \right. \quad (6.56)$$

$$\begin{array}{l} \theta(0) = 0 \\ X(0) = 0 \\ Z(0) = 0 \\ W(0) = 0 \\ Q(0) = 0 \\ U(0) = 1 \\ \omega(0) = 314 \end{array}$$

În urma soluționării sistemului de mai sus, se obțin următoarele evoluții în timp ale mărimilor:

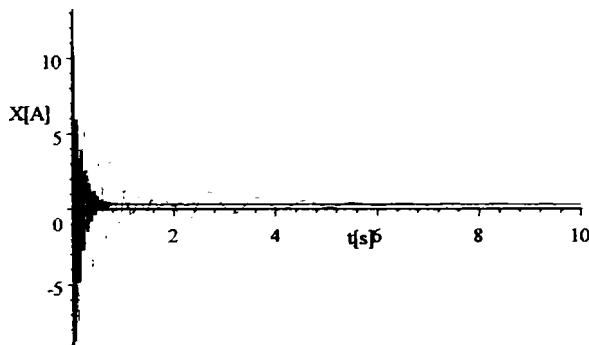


Fig.6.2.53. Variația în timp a lui  $I_d$ .

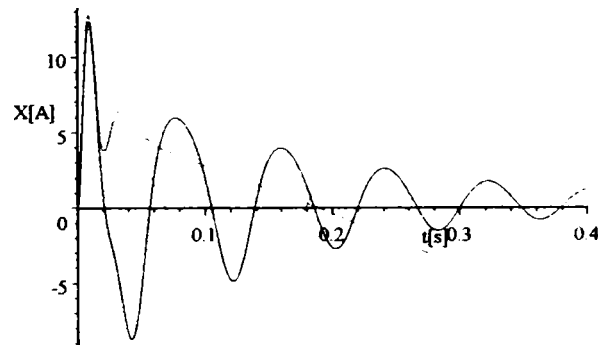


Fig.6.2.53'. Variația în timp a lui  $I_d$ (detaliu).

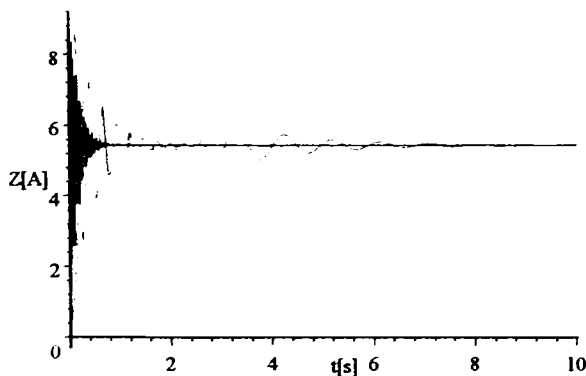


Fig.6.2.54. Variația în timp a lui  $I_q$ .

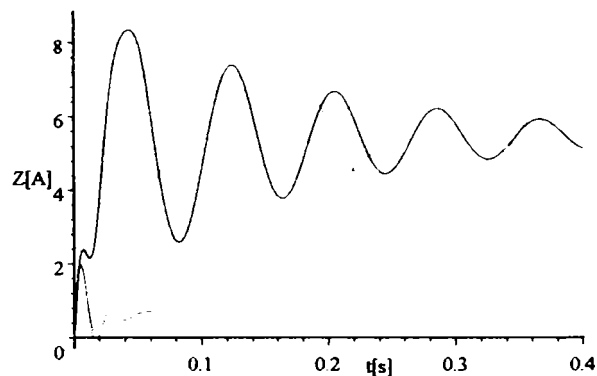


Fig.6.2.54'. Variația în timp a lui  $I_q$ (detaliu).

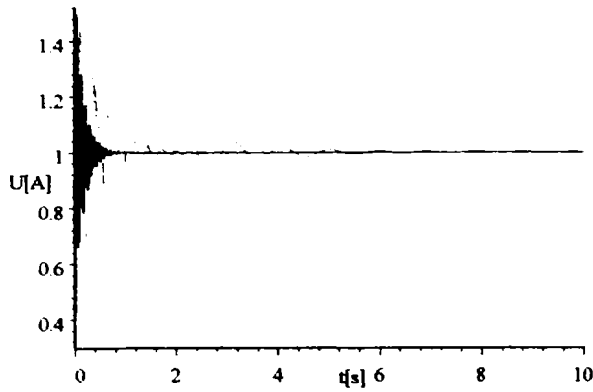


Fig.6.2.55. Variația în timp a lui  $I_E$ .

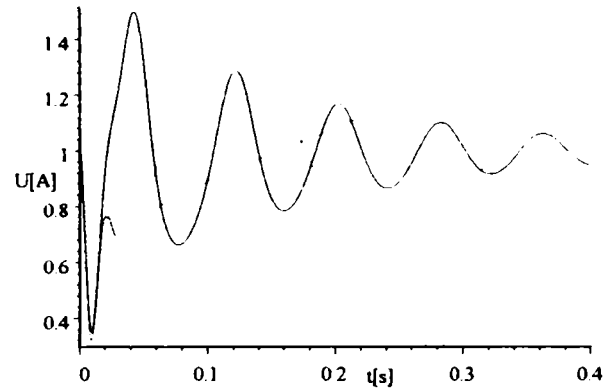


Fig.6.2.55'. Variația în timp a lui  $I_E$ (detaliu).

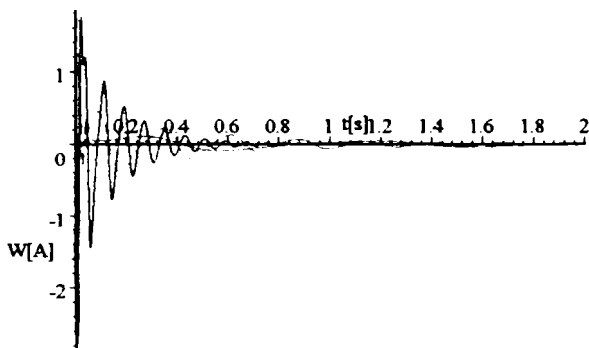


Fig.6.2.56. Variația în timp a lui  $I_D$ .

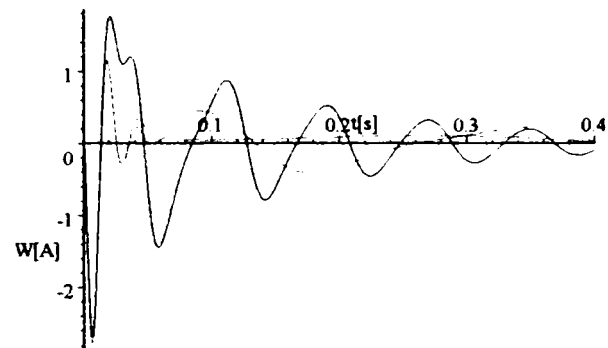


Fig.6.2.56'. Variația în timp a lui  $I_D$ (detaliu).

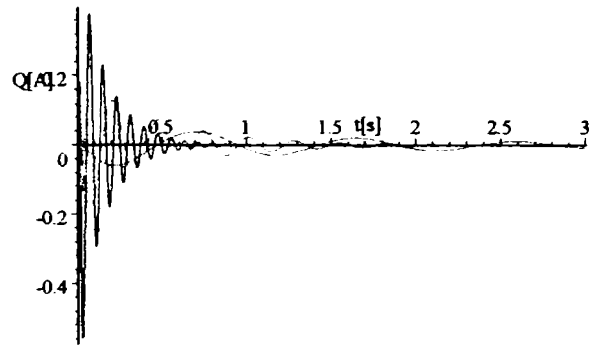


Fig.6.2.57. Variația în timp a lui  $I_Q$ .

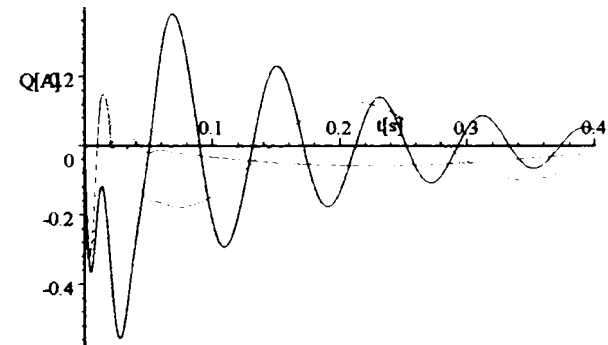


Fig.6.2.57'. Variația în timp a lui  $I_Q$ (detaliu).

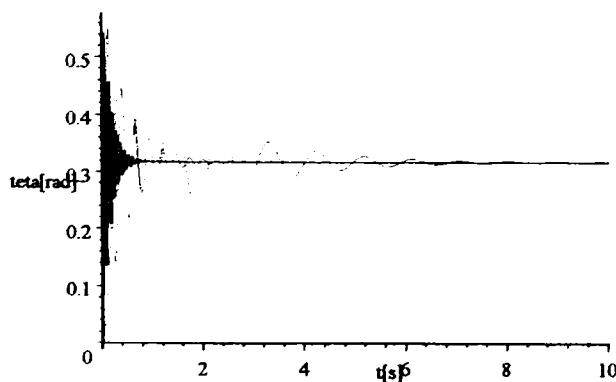


Fig.6.2.58. Variația în timp a lui  $\theta$ .

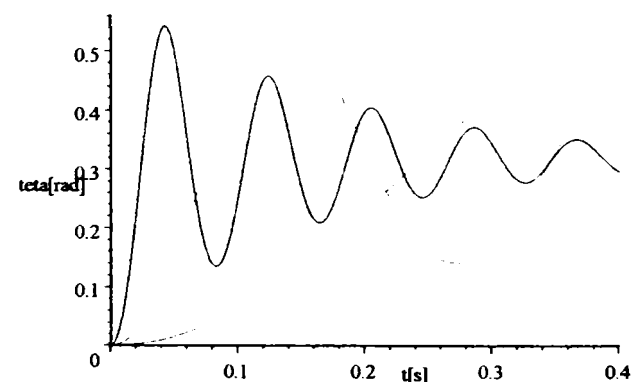


Fig.6.2.58'. Variația în timp a lui  $\theta$ (detaliu).

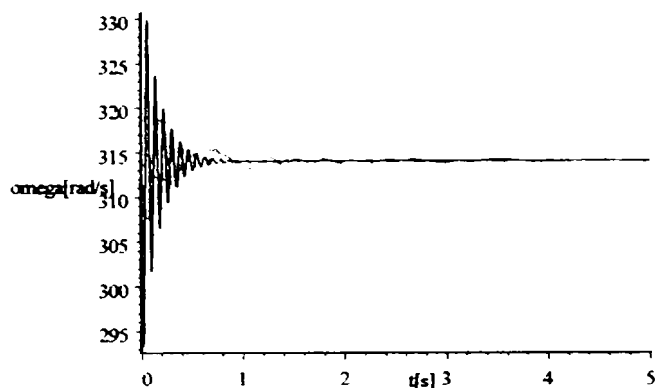


Fig. 6.2.59. Variația în timp a lui  $\omega$ .

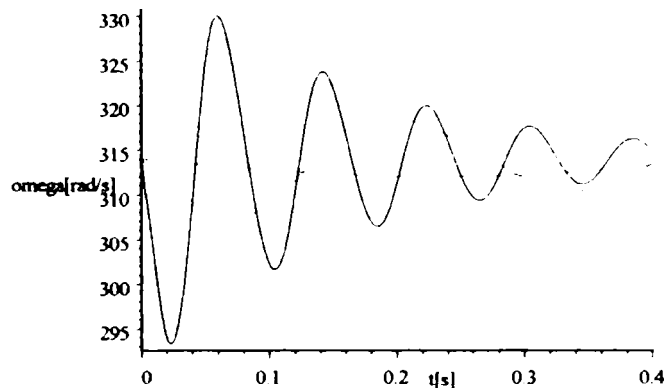


Fig. 6.2.59'. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu).

Curentul statoric respectiv cuplul electromagnetic în mașina reală sunt:

$$I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos(\omega(t) \cdot t) - Z(t) \sin(\omega(t) \cdot t)) \quad (6.57)$$

$$M_{elmag}(t) = M(t) = 2(0.01X(t)Z(t) + 1.1Z(t)U(t) - 0.058X(t)Q(t) + 0.055Z(t)W(t)) \quad (6.58)$$



Fig. 6.2.60. Variația în timp a lui  $I$ .

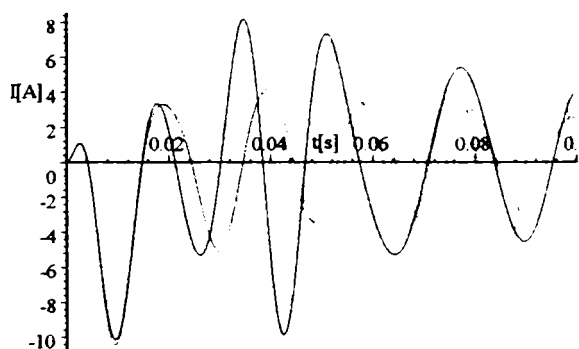


Fig. 6.2.60'. Variația în timp a lui  $I$  (detaliu).

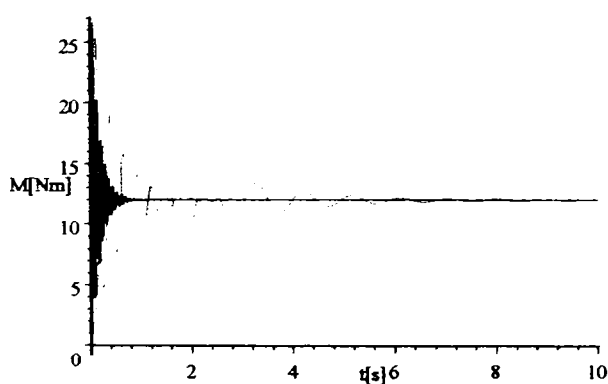


Fig. 6.2.61. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$ .

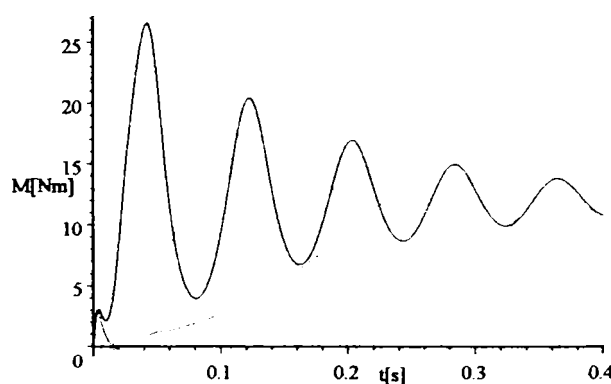


Fig. 6.2.61'. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$  (detaliu).

Din dorința de a sintetiza toate rezultatele studiului regimurilor tranzitorii prezentate în capitolul 6, și pentru a trage concluzii comparative și cât mai generale, concluziile și interpretările fenomenologice desprinse din evoluțiile în timp ale mărimilor ce caracterizează procesul tranzitoriu studiat în acest subparagraf sunt prezentate în paragraful 6.4 (la sfârșitul capitolului 6).

6.2.2.4. Încărcare bruscă de la 0% la 100% din  $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial  
Sistemul de ecuații diferențiale care modelează acest proces este următorul:

$$\left. \begin{aligned}
 1.6X + 0.08 \frac{dX}{dt} - 0.07\omega Z + 1.1 \frac{dU}{dt} + 0.055 \frac{dW}{dt} - 0.058\omega Q &= -220\sqrt{3} \sin\theta \\
 0.08\omega X + 1.6Z + 0.07 \frac{dZ}{dt} + 1.1\omega U + 0.055\omega W + 0.058 \frac{dQ}{dt} &= 220\sqrt{3} \cos\theta \\
 1.1 \frac{dX}{dt} + 41.3U + 18.51 \frac{dU}{dt} + 0.62 \frac{dW}{dt} &= 41.3 \\
 0.055 \frac{dX}{dt} + 0.62 \frac{dU}{dt} + 7.95W + 0.067 \frac{dW}{dt} &= 0 \\
 0.058 \frac{dZ}{dt} + 30.22Q + 0.25 \frac{dQ}{dt} &= 0 \\
 2(0.01XZ + 1.1ZU - 0.058XQ + 0.055ZW) - 16 - 0.5 \cdot \boxed{J} \frac{d\omega}{dt} &= 0 \\
 \frac{d\theta}{dt} + \omega - 314 &= 0 \\
 \theta(0) &= 0 \\
 X(0) &= 0 \\
 Z(0) &= 0 \\
 W(0) &= 0 \\
 Q(0) &= 0 \\
 U(0) &= 1 \\
 \omega(0) &= 314
 \end{aligned} \right\} \quad (6.59)$$

În urma soluționării sistemului de mai sus, se obțin următoarele evoluții în timp ale mărimilor:

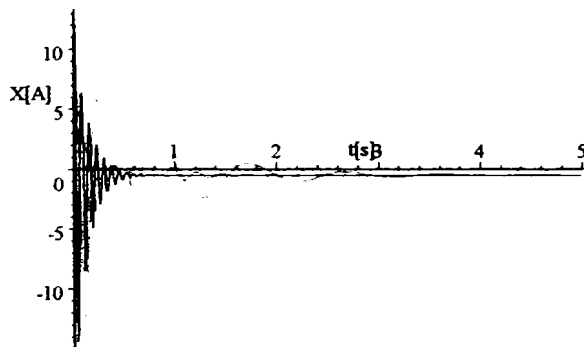


Fig.6.2.62. Variația în timp a lui  $I_d$ .

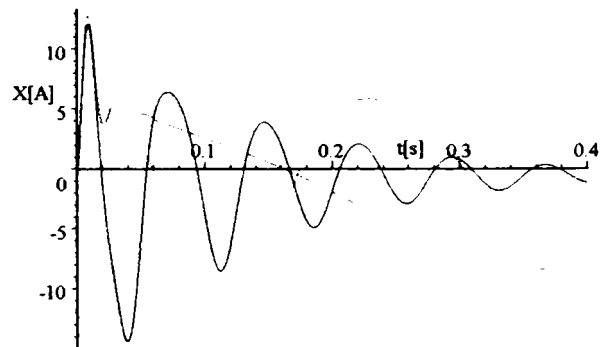


Fig.6.2.62'. Variația în timp a lui  $I_d$ (detaliu).

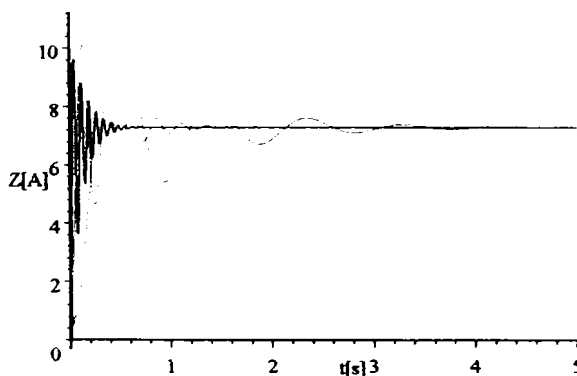


Fig.6.2.63. Variația în timp a lui  $I_q$ .

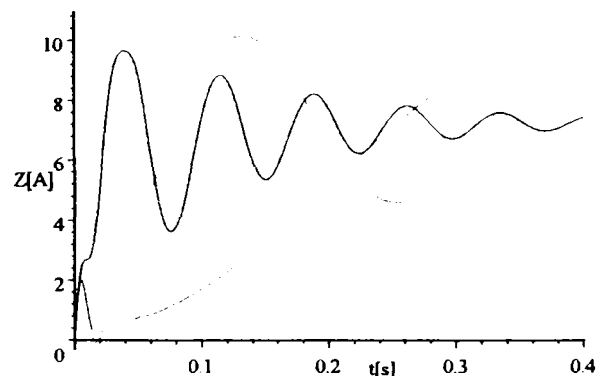


Fig.6.2.63'. Variația în timp a lui  $I_q$ (detaliu).

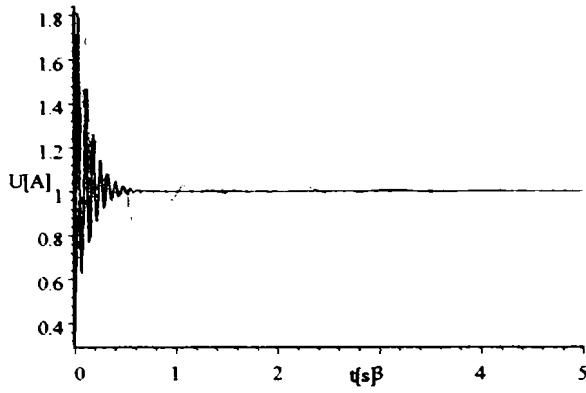


Fig.6.2.64. Variația în timp a lui  $I_E$ .

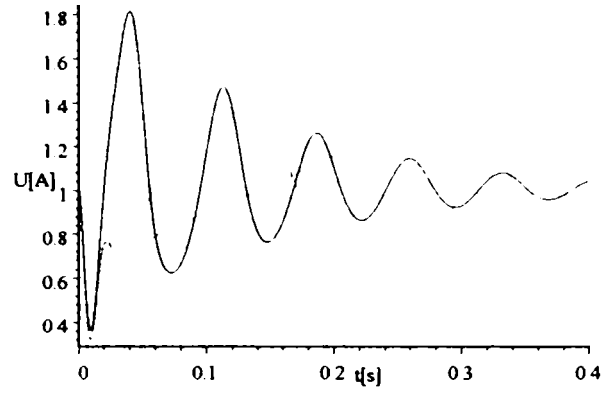


Fig.6.2.64'. Variația în timp a lui  $I_E$ (detaliu).

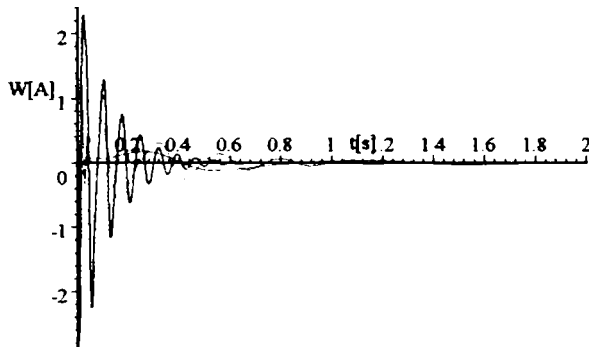


Fig.6.2.65. Variația în timp a lui  $I_D$ .

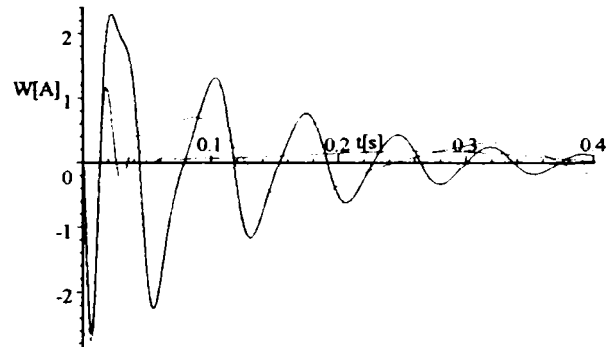


Fig.6.2.65'. Variația în timp a lui  $I_D$ (detaliu).

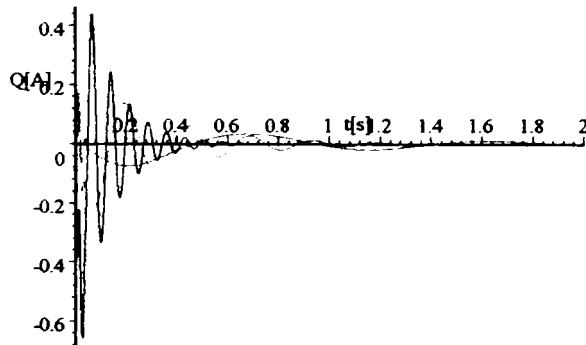


Fig.6.2.66. Variația în timp a lui  $I_Q$ .

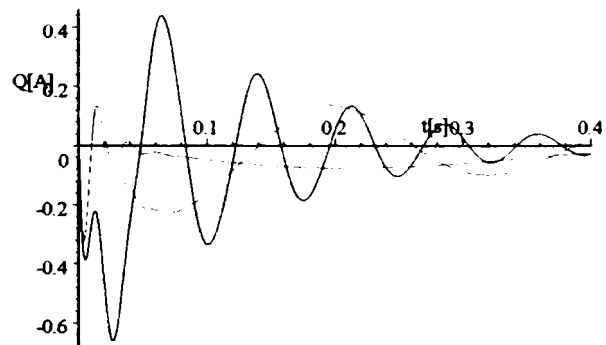


Fig.6.2.66'. Variația în timp a lui  $I_Q$ (detaliu).

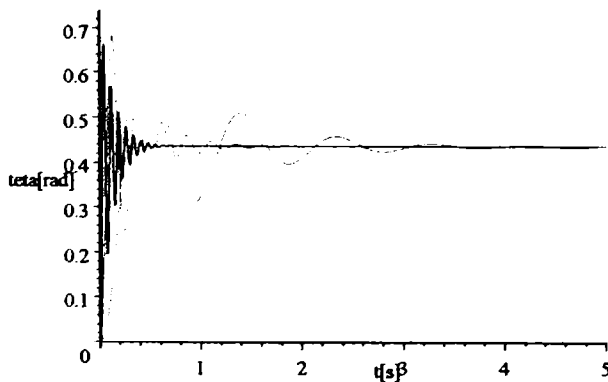


Fig.6.2.67. Variația în timp a lui  $\theta$ .

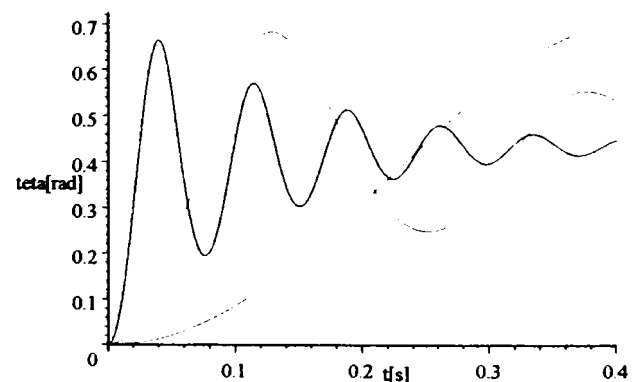


Fig.6.2.67'. Variația în timp a lui  $\theta$ (detaliu).



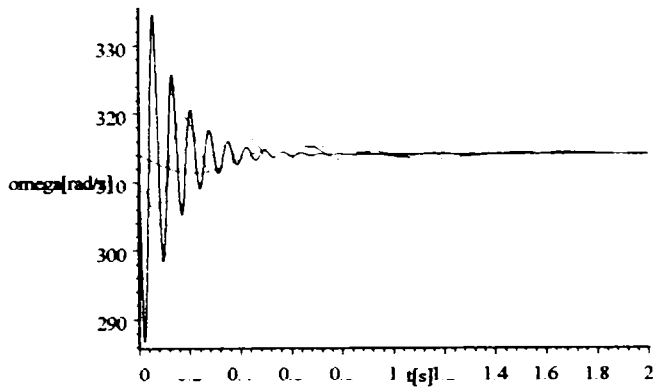


Fig. 6.2.68. Variația în timp a lui  $\omega$ .

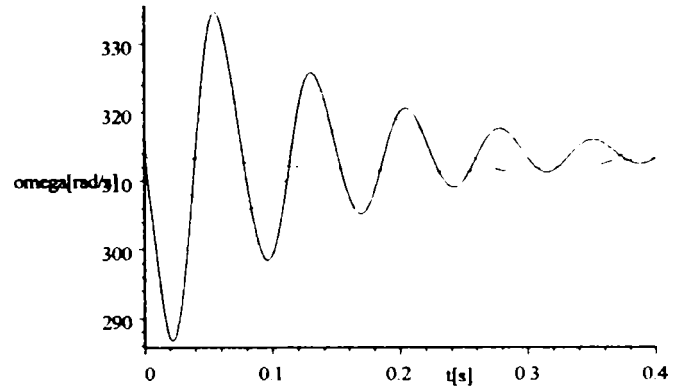


Fig. 6.2.68'. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu).

Curentul statoric respectiv cuplul electromagnetic în mașina reală sunt:

$$I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos(\omega(t) \cdot t) - Z(t) \sin(\omega(t) \cdot t)) \quad (6.60)$$

$$M_{el\text{mag}}(t) = M(t) = 2(0.01X(t)Z(t) + 1.1Z(t)U(t) - 0.058X(t)Q(t) + 0.055Z(t)W(t)) \quad (6.61)$$



Fig. 6.2.69. Variația în timp a lui  $I$ .

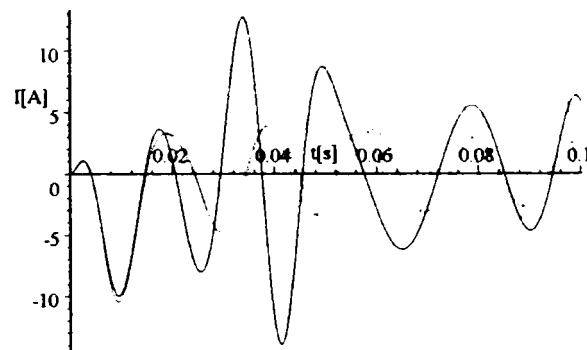


Fig. 6.2.69'. Variația în timp a lui  $I$  (detaliu).

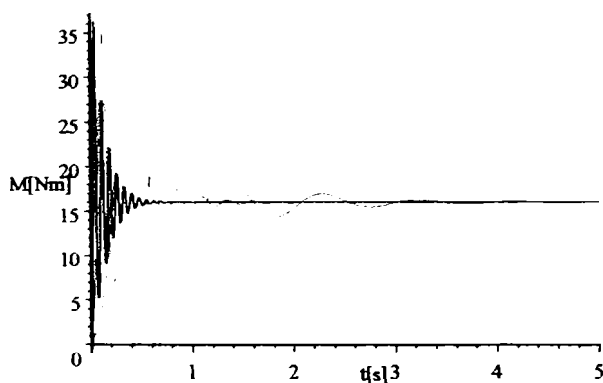


Fig. 6.2.70. Variația în timp a lui  $M_{el\text{mag}}$ .

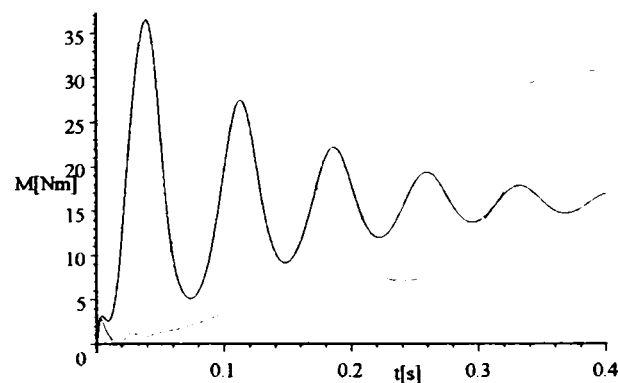


Fig. 6.2.70'. Variația în timp a lui  $M_{el\text{mag}}$  (detaliu).

Din dorința de a sintetiza toate rezultatele studiului regimurilor tranzitorii prezentate în capitolul 6, și pentru a trage concluzii comparative și cât mai generale, concluziile și interpretările fenomenologice desprinse din evoluțiile în timp ale mărimilor ce caracterizează procesul tranzitoriu studiat în acest subparagraf sunt prezentate în paragraful 6.4 (la sfârșitul capitolului 6).

6.2.2.5.Limita de stabilitate la încărcare bruscă, cu modificarea momentului de inerție axial

Sistemul de ecuații diferențiale care modelează acest proces este următorul:

$$\begin{cases}
 1.6X + 0.08 \frac{dX}{dt} - 0.07\omega Z + 1.1 \frac{dU}{dt} + 0.055 \frac{dW}{dt} - 0.058\omega Q = -220\sqrt{3} \sin \theta \\
 0.08\omega X + 1.6Z + 0.07 \frac{dZ}{dt} + 1.1\omega U + 0.055\omega W + 0.058 \frac{dQ}{dt} = 220\sqrt{3} \cos \theta \\
 1.1 \frac{dX}{dt} + 41.3U + 18.51 \frac{dU}{dt} + 0.62 \frac{dW}{dt} = 41.3 \\
 0.055 \frac{dX}{dt} + 0.62 \frac{dU}{dt} + 7.95W + 0.067 \frac{dW}{dt} = 0 \\
 0.058 \frac{dZ}{dt} + 30.22Q + 0.25 \frac{dQ}{dt} = 0 \\
 2(0.01XZ + 1.1ZU - 0.058XQ + 0.055ZW) - T - 0.5 \cdot \boxed{J} \frac{d\omega}{dt} = 0 \\
 \frac{d\theta}{dt} + \omega - 314 = 0
 \end{cases} \quad (6.62)$$

$$\begin{aligned}
 \theta(0) &= 0 \\
 X(0) &= 0 \\
 Z(0) &= 0 \\
 W(0) &= 0 \\
 Q(0) &= 0 \\
 U(0) &= 1 \\
 \omega(0) &= 314
 \end{aligned}$$

$T$  fiind valoarea limită de încărcare a cuplului rezistent la care motorul sincron își pierde stabilitatea în funcționare.

Pentru  $T = 31.7[Nm]$ , motorul sincron încă nu-și pierde stabilitatea în funcționare, observație care se poate constata din evoluția stabilizată în timp a mărimilor care intervin în procesul tranzitoriu datorat încărcării bruște de sarcină. În urma soluționării sistemului de mai sus, se obțin următoarele evoluții în timp ale mărimilor.

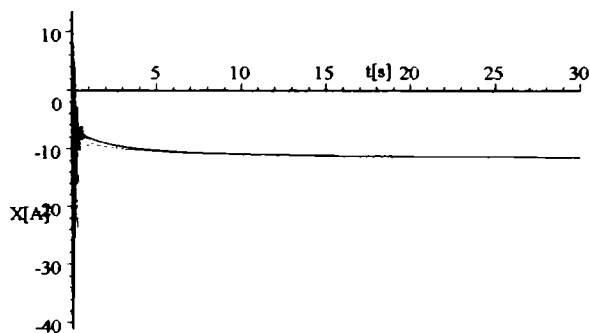


Fig.6.2.71.Variația în timp a lui  $I_d$ .

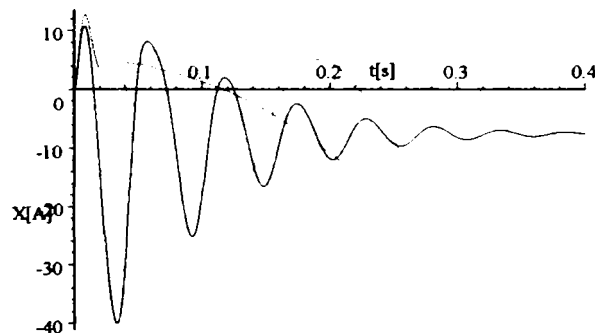


Fig.6.2.71'.Variația în timp a lui  $I_d$ (detaliu).

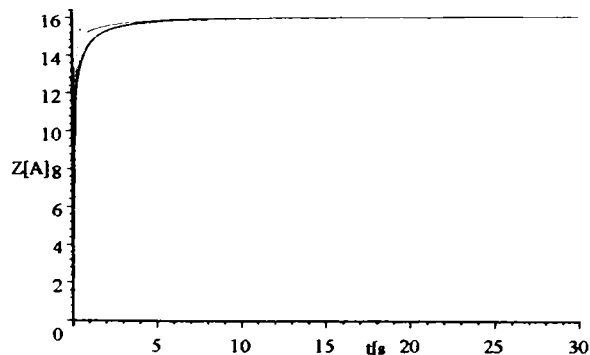


Fig.6.2.72.Variația în timp a lui  $I_q$ .

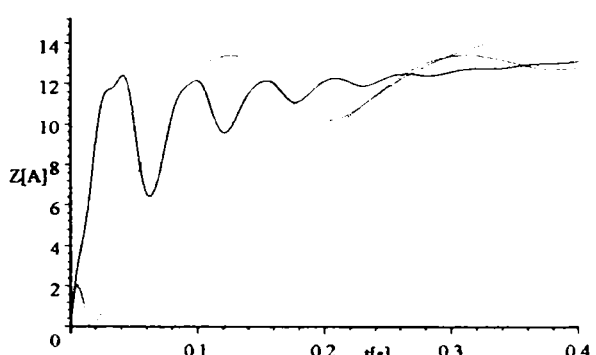


Fig.6.2.72'.Variația în timp a lui  $I_q$ (detaliu).

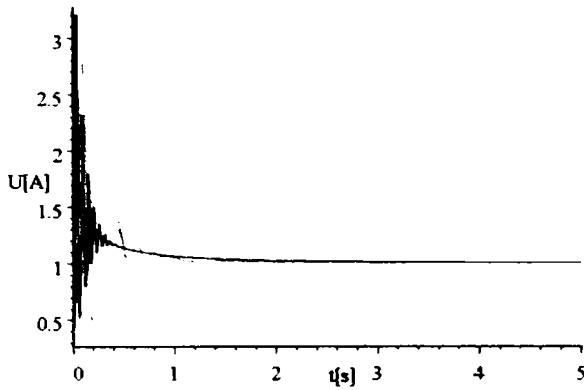


Fig.6.2.73. Variația în timp a lui  $I_E$ .

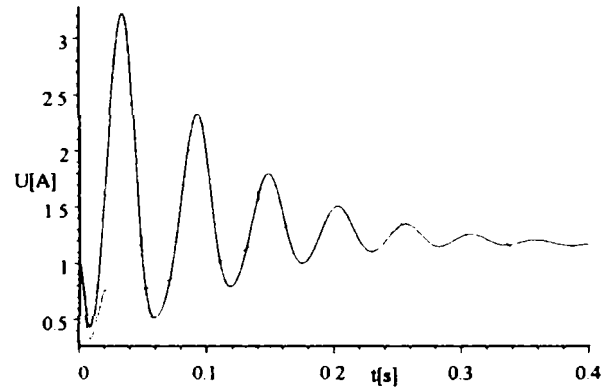


Fig.6.2.73'. Variația în timp a lui  $I_E$ (detaliu).

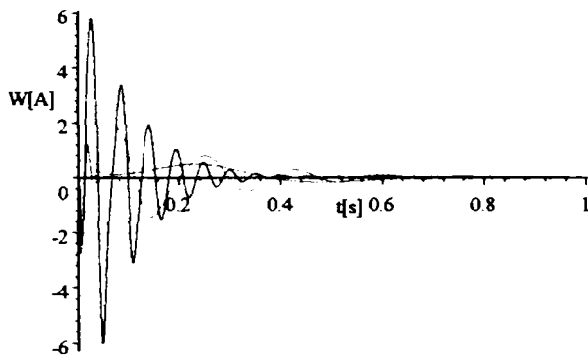


Fig.6.2.74. Variația în timp a lui  $I_D$ .

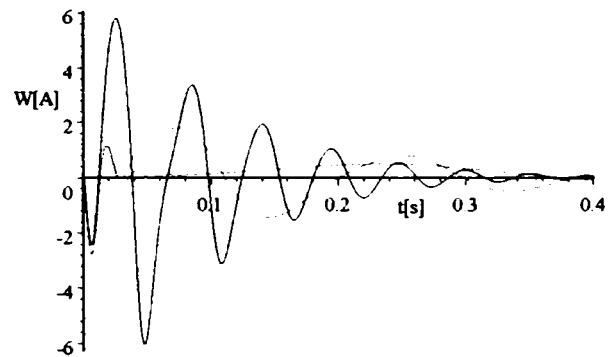


Fig.6.2.74'. Variația în timp a lui  $I_D$ (detaliu).

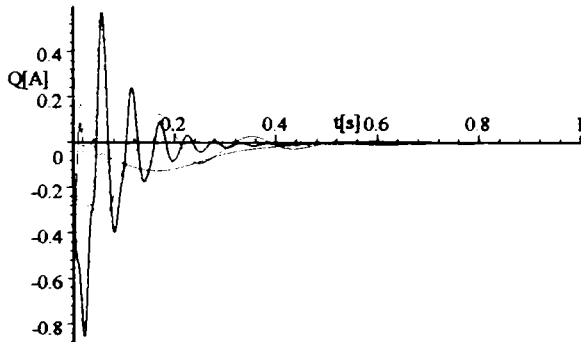


Fig.6.2.75. Variația în timp a lui  $I_Q$ .

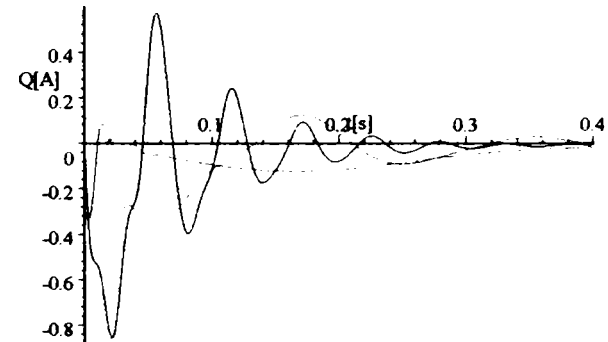


Fig.6.2.75'. Variația în timp a lui  $I_Q$ (detaliu).

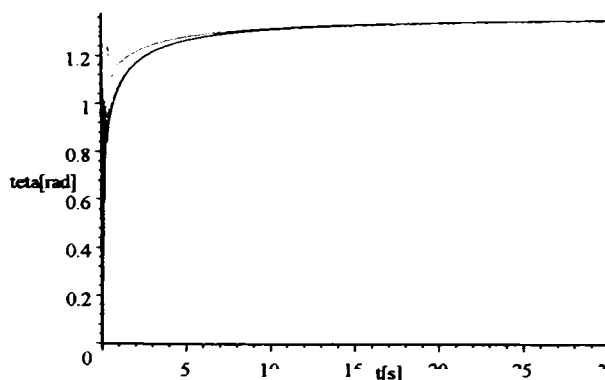


Fig.6.2.76. Variația în timp a lui  $\theta$ .

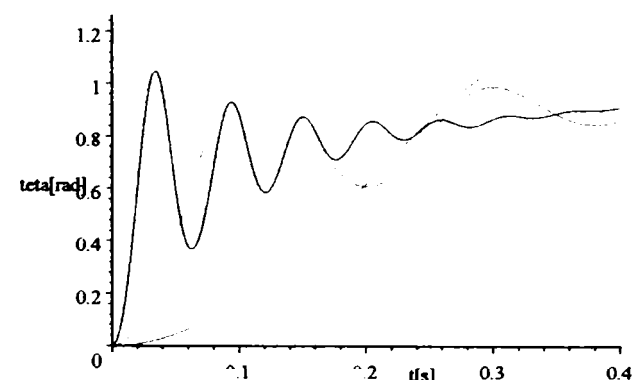


Fig.6.2.76'. Variația în timp a lui  $\theta$ (detaliu).

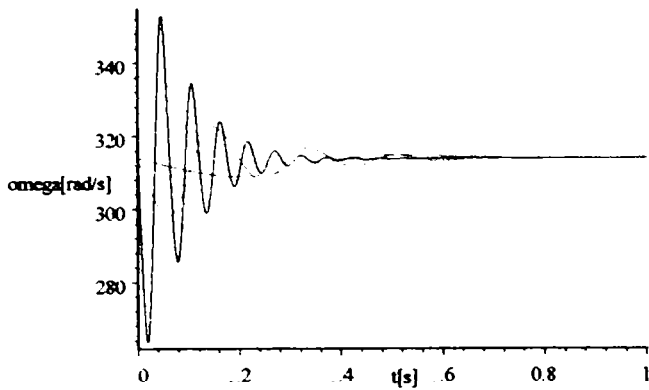


Fig. 6.2.77. Variația în timp a lui  $\omega$ .

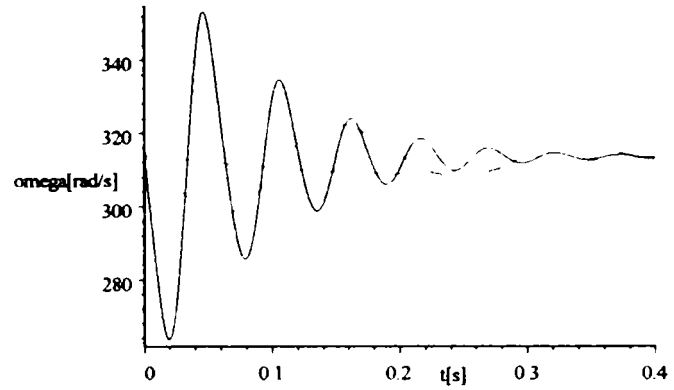


Fig. 6.2.77'. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu).

Curentul statoric respectiv cuplul electromagnetic în mașina reală sunt:

$$I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos(\omega(t) \cdot t) - Z(t) \sin(\omega(t) \cdot t)) \quad (6.63)$$

$$M_{el\text{mag}}(t) = M(t) = 2(0.01X(t)Z(t) + 1.1Z(t)U(t) - 0.058X(t)Q(t) + 0.055Z(t)W(t)) \quad (6.64)$$



Fig. 6.2.78. Variația în timp a lui  $I$ .

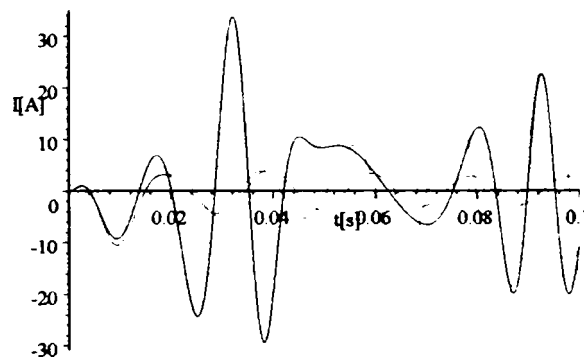


Fig. 6.2.78'. Variația în timp a lui  $I$  (detaliu).

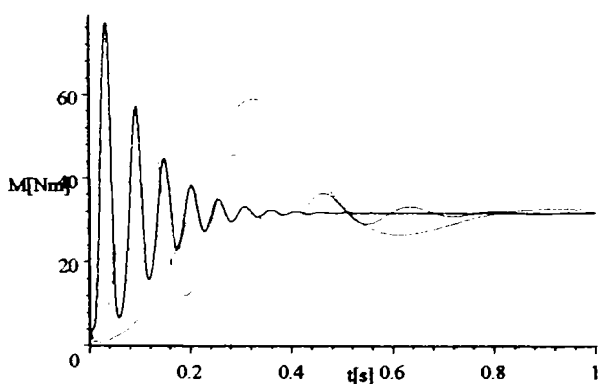


Fig. 6.2.79. Variația în timp a lui  $M_{el\text{mag}}$ .

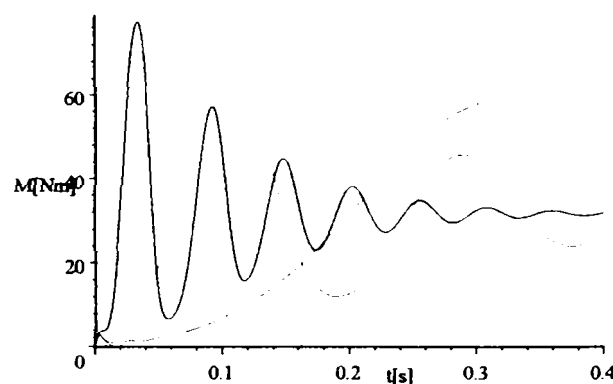


Fig. 6.2.79'. Variația în timp a lui  $M_{el\text{mag}}$  (detaliu).

Pentru  $T = 31.71[Nm]$ , motorul sincron își pierde stabilitatea în funcționare(iese din sincronism), observație care se poate constata din evoluția instabilizată în timp a mărimilor care intervin în procesul tranzitoriu datorat încărcării bruște de sarcină.

În urma soluționării sistemului de mai sus(6.62), se obțin următoarele evoluții în timp ale mărimilor:

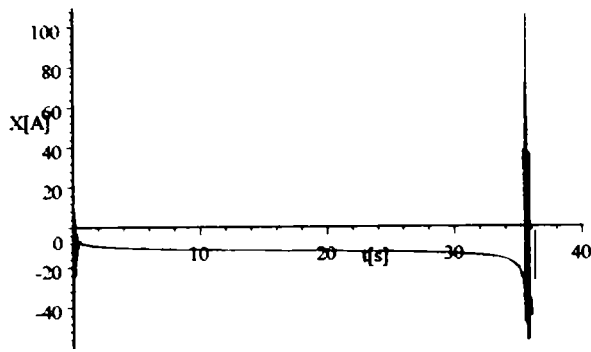


Fig. 6.2.80. Variația în timp a lui  $I_d$ .

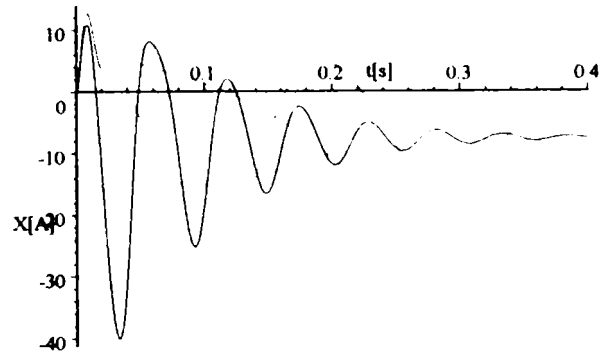


Fig. 6.2.80'. Variația în timp a lui  $I_d$  (detaliu).

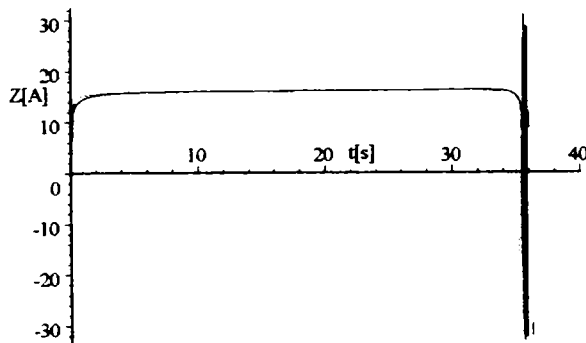


Fig. 6.2.81. Variația în timp a lui  $I_q$ .

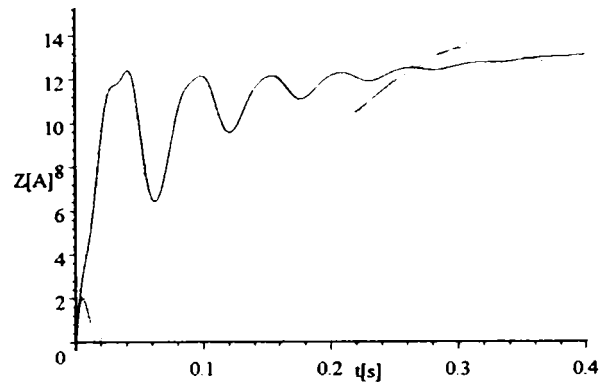


Fig. 6.2.81'. Variația în timp a lui  $I_q$  (detaliu).

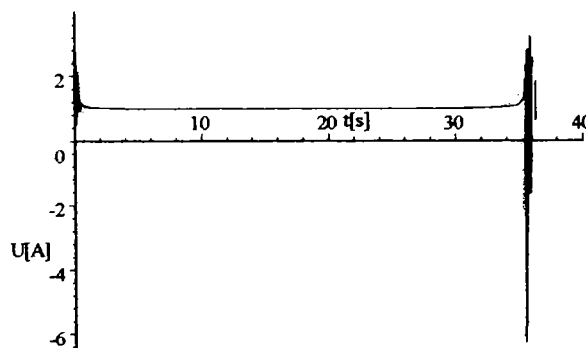


Fig. 6.2.82. Variația în timp a lui  $I_E$ .

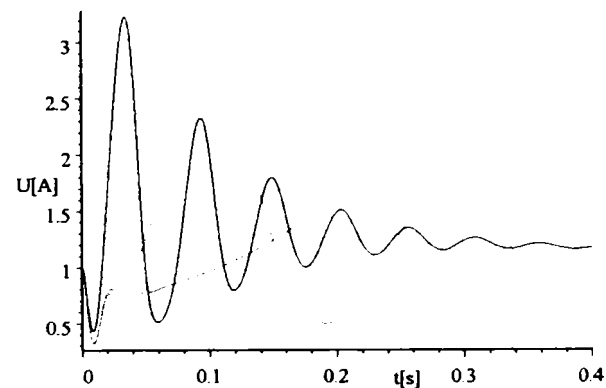


Fig. 6.2.82'. Variația în timp a lui  $I_E$  (detaliu).

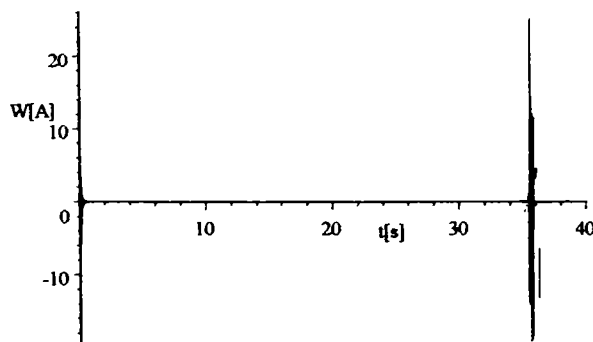


Fig. 6.2.83. Variația în timp a lui  $I_D$ .

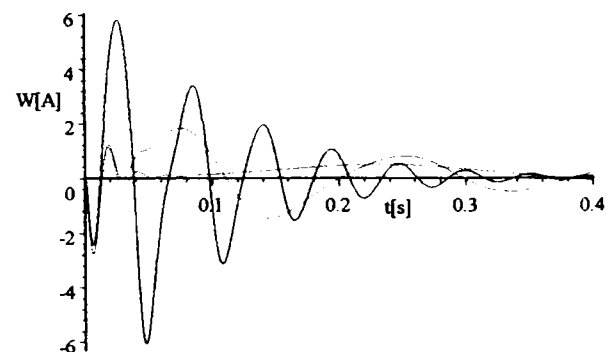


Fig. 6.2.83'. Variația în timp a lui  $I_D$  (detaliu).

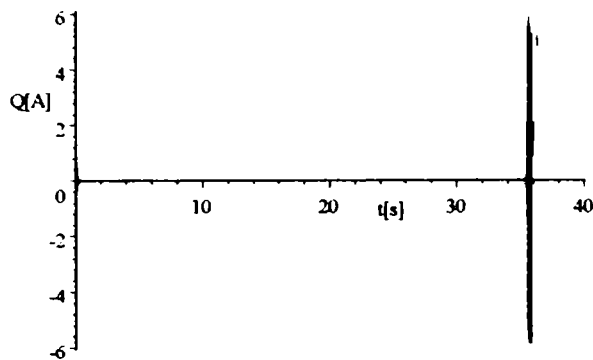


Fig.6.2.84. Variația în timp a lui  $I_Q$ .

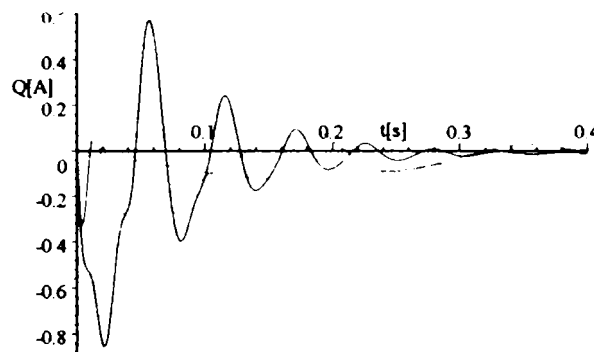


Fig.6.2.84'. Variația în timp a lui  $I_Q$  (detaliu).

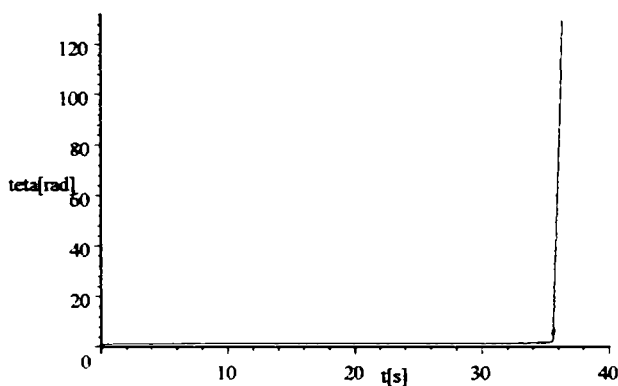


Fig.6.2.85. Variația în timp a lui  $\theta$ .

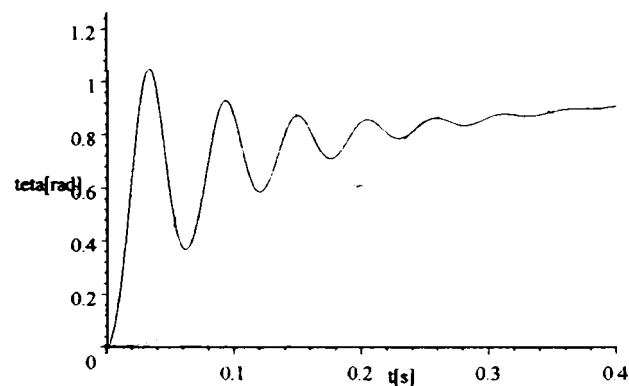


Fig.6.2.85'. Variația în timp a lui  $\theta$  (detaliu).

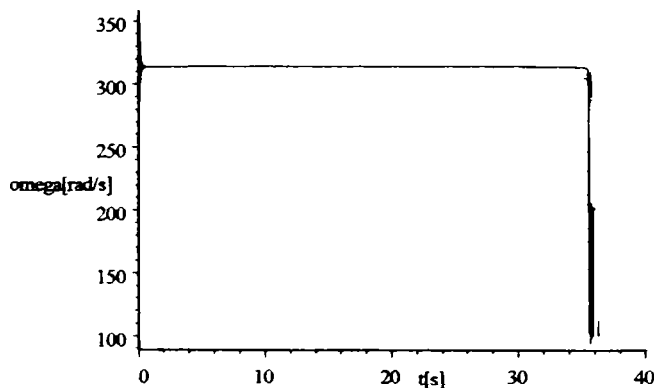


Fig.6.2.86. Variația în timp a lui  $\omega$ .

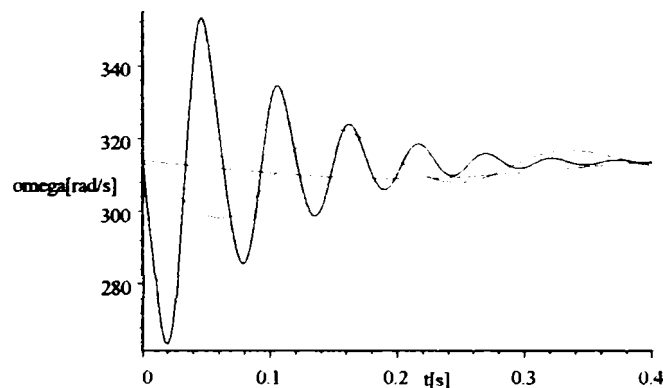


Fig.6.2.86'. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu).

Curentul statoric respectiv cuplul electromagnetic în mașina reală sunt:

$$I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos(\omega(t) \cdot t) - Z(t) \sin(\omega(t) \cdot t)) \quad (6.65)$$

$$M_{elmag}(t) = M(t) = 2(0.01X(t)Z(t) + 1.1Z(t)U(t) - 0.058X(t)Q(t) + 0.055Z(t)W(t)) \quad (6.66)$$

iar evoluțiile lor în timp sunt date în figurile următoare:



Fig. 6.2.87. Variația în timp a lui  $I$ .

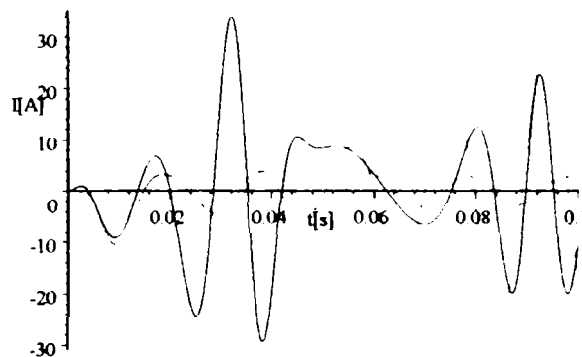


Fig. 6.2.87'. Variația în timp a lui  $I$  (detaliu).

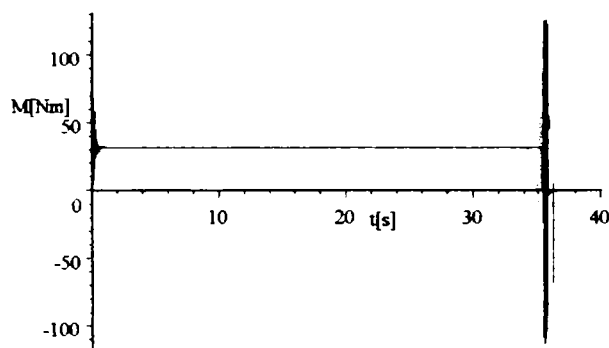


Fig. 6.2.88. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$ .

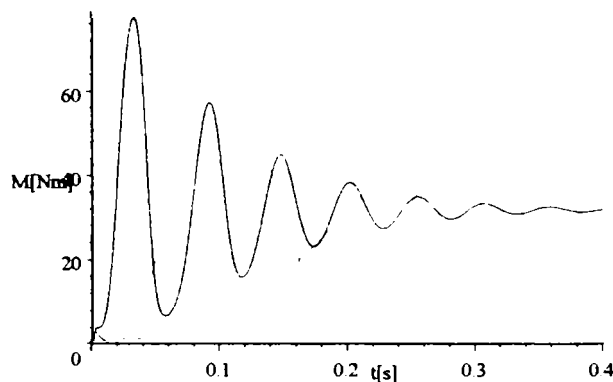


Fig. 6.2.88'. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$  (detaliu).

Din dorința de a sintetiza toate rezultatele studiului regimurilor tranzitorii prezentate în capitolul 6, și pentru a trage concluzii comparative și cât mai generale, concluziile și interpretările fenomenologice desprinse din evoluțiile în timp ale mărimilor ce caracterizează procesul tranzitoriu studiat în acest subparagraf sunt prezentate în paragraful 6.4 (la sfârșitul capitolului 6).

6.2.3. Modelarea și simularea descărcării bruște a motorului sincron

În acest paragraf se prezintă modelarea și simularea descărcării bruște de sarcină a motorului sincron, studiindu-se comportarea dinamică a acestuia în condițiile modificării momentului de inerție axial  $J$ , la aceleași trei valori din paragraful precedent.

Păstrându-se notațiile (6.24) din paragraful precedent, model matematic care descrie dinamica motorului sincron la descărcare bruscă de sarcină este următorul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.6X + 0.08 \frac{dX}{dt} - 0.07\omega Z + 1.1 \frac{dU}{dt} + 0.055 \frac{dW}{dt} - 0.058\omega Q = -220\sqrt{3} \sin \theta \\ 0.08\omega X + 1.6Z + 0.07 \frac{dZ}{dt} + 1.1\omega U + 0.055\omega W + 0.058 \frac{dQ}{dt} = 220\sqrt{3} \cos \theta \\ 1.1 \frac{dX}{dt} + 41.3U + 18.51 \frac{dU}{dt} + 0.62 \frac{dW}{dt} = 41.3 \\ 0.055 \frac{dX}{dt} + 0.62 \frac{dU}{dt} + 7.95W + 0.067 \frac{dW}{dt} = 0 \\ 0.058 \frac{dZ}{dt} + 30.22Q + 0.25 \frac{dQ}{dt} = 0 \\ 2(0.01XZ + 1.1ZU - 0.058XQ + 0.055ZW) - T - 0.5 \cdot \boxed{J} \frac{d\omega}{dt} = 0 \\ \frac{d\theta}{dt} + \omega - 314 = 0 \\ \theta(0) = 0.4370842 \\ X(0) = -0.4720558 \\ Z(0) = 7.304072 \\ W(0) = 0 \\ Q(0) = 0 \\ U(0) = 1 \\ \omega(0) = 314 \end{array} \right. \quad (6.67)$$

unde , după cum se poate observa, condițiile inițiale ale sistemului de ecuații diferențiale corespund punctului de funcționare nominală ( $100\%M_N$ ), care așa cum s-a arătat în paragraful precedent, este un punct de funcționare stabil. Condițiile inițiale se determină prin anularea derivatelor sistemului respectiv a termenilor ce conțin curenții din înfășurările de amortizare ( $W$  și  $Q$ ):

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.6X - 0.07\omega Z = -220\sqrt{3} \sin \theta \\ 0.08\omega X + 1.6Z + 1.1\omega U = 220\sqrt{3} \cos \theta \\ 41.3U = 41.3 \\ 2(0.01XZ + 1.1ZU) - 16 = 0 \\ \omega - 314 = 0 \end{array} \right. \quad (6.68)$$

cu soluția:

$$Z = 7.304072, X = -0.4720558, \theta = 0.4370842, U = 1.0, \omega = 314.0 \quad (6.69)$$

6.2.3.1. Descărcare bruscă de la 100% la 75% din  $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial  
Sistemul de ecuații diferențiale care modelează acest proces este următorul:



$$\left. \begin{aligned}
 1.6X + 0.08 \frac{dX}{dt} - 0.07\omega Z + 1.1 \frac{dU}{dt} + 0.055 \frac{dW}{dt} - 0.058\omega Q &= -220\sqrt{3} \sin \theta \\
 0.08\omega X + 1.6Z + 0.07 \frac{dZ}{dt} + 1.1\omega U + 0.055\omega W + 0.058 \frac{dQ}{dt} &= 220\sqrt{3} \cos \theta \\
 1.1 \frac{dX}{dt} + 41.3U + 18.51 \frac{dU}{dt} + 0.62 \frac{dW}{dt} &= 41.3 \\
 0.055 \frac{dX}{dt} + 0.62 \frac{dU}{dt} + 7.95W + 0.067 \frac{dW}{dt} &= 0 \\
 0.058 \frac{dZ}{dt} + 30.22Q + 0.25 \frac{dQ}{dt} &= 0 \\
 2(0.01XZ + 1.1ZU - 0.058XQ + 0.055ZW) - 12 - 0.5 \cdot \boxed{J} \frac{d\omega}{dt} &= 0 \\
 \frac{d\theta}{dt} + \omega - 314 &= 0 \\
 \theta(0) &= 0.4370842 \\
 X(0) &= -0.4720558 \\
 Z(0) &= 7.304072 \\
 W(0) &= 0 \\
 Q(0) &= 0 \\
 U(0) &= 1 \\
 \omega(0) &= 314
 \end{aligned} \right\} \quad (6.70)$$

În urma soluționării sistemului de mai sus, se obțin următoarele evoluții în timp ale mărimilor:

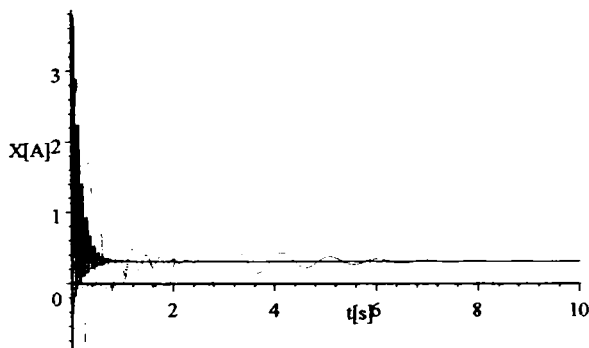


Fig.6.2.89. Variația în timp a lui  $I_d$ .

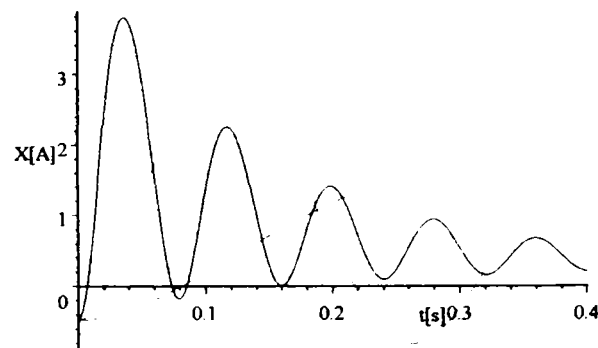


Fig.6.2.89'. Variația în timp a lui  $I_d$ (detaliu).

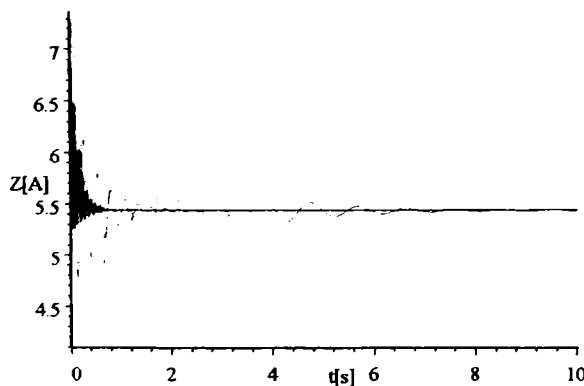


Fig.6.2.90. Variația în timp a lui  $I_q$ .

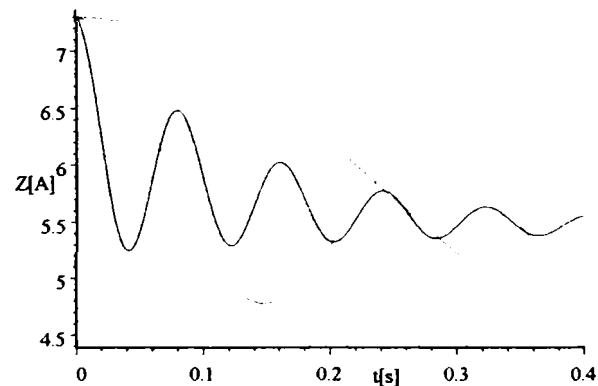


Fig.6.2.90'. Variația în timp a lui  $I_q$ (detaliu).

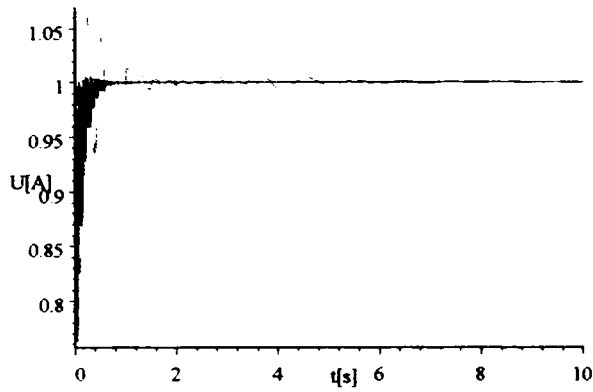


Fig.6.2.91. Variația în timp a lui  $I_E$ .

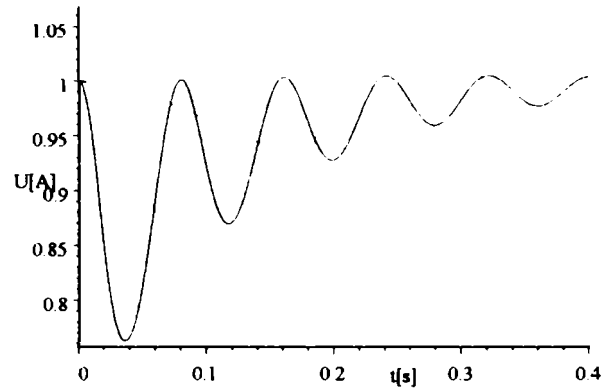


Fig.6.2.91'. Variația în timp a lui  $I_E$ (detaliu).

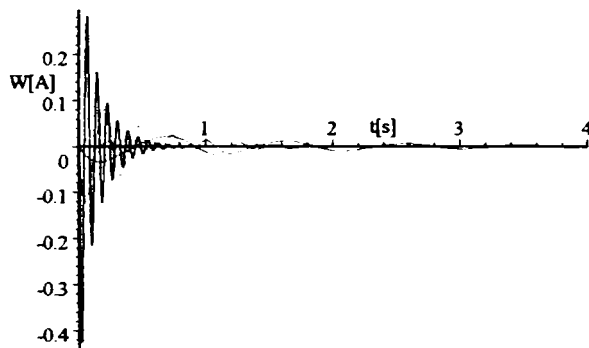


Fig.6.2.92. Variația în timp a lui  $I_D$ .

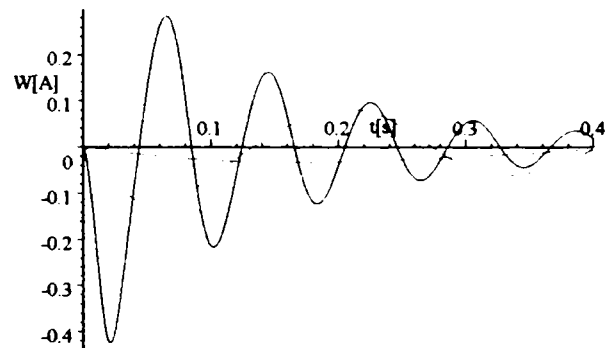


Fig.6.2.92'. Variația în timp a lui  $I_D$ (detaliu).

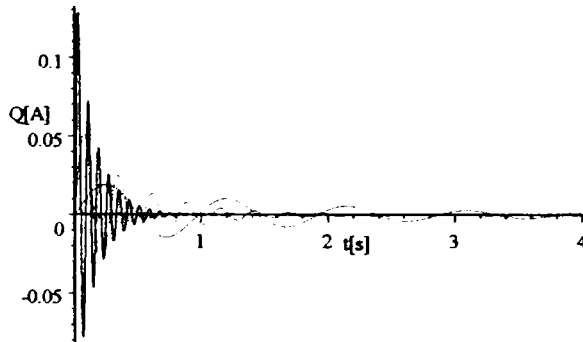


Fig.6.2.93. Variația în timp a lui  $I_Q$ .

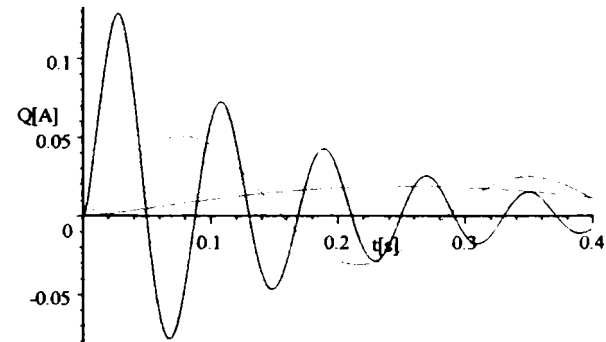


Fig.6.2.93'. Variația în timp a lui  $I_Q$ (detaliu).

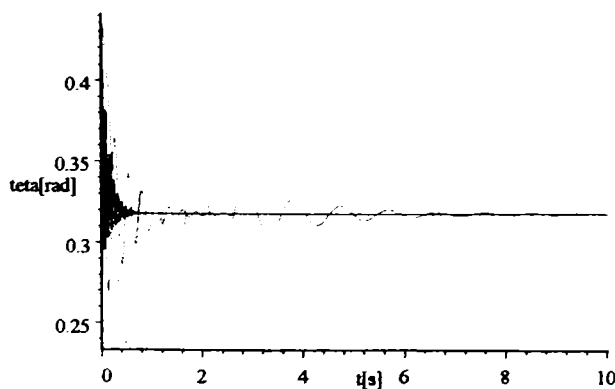


Fig.6.2.94. Variația în timp a lui  $\theta$ .

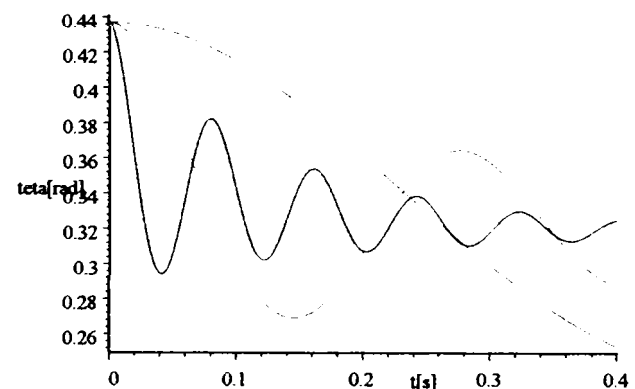


Fig.6.2.94'. Variația în timp a lui  $\theta$ (detaliu).

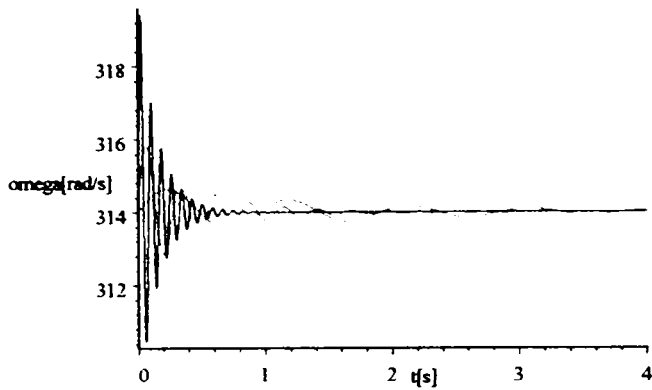


Fig. 6.2.95. Variația în timp a lui  $\omega$ .

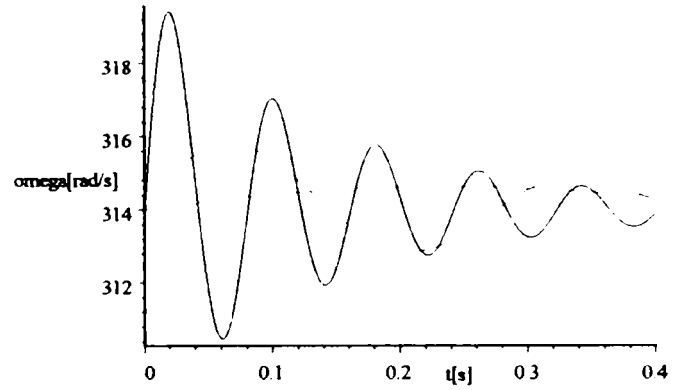


Fig. 6.2.95'. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu).

Curentul statoric respectiv cuplul electromagnetic în mașina reală sunt:

$$I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos(\omega(t) \cdot t) - Z(t) \sin(\omega(t) \cdot t)) \quad (6.71)$$

$$M_{elmag}(t) = M(t) = 2(0.01X(t)Z(t) + 1.1Z(t)U(t) - 0.058X(t)Q(t) + 0.055Z(t)W(t)) \quad (6.72)$$

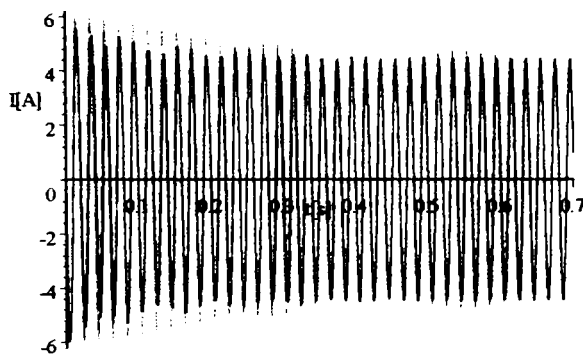


Fig. 6.2.96. Variația în timp a lui  $I$ .

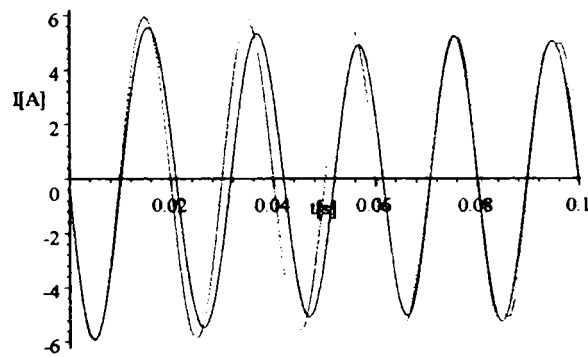


Fig. 6.2.96'. Variația în timp a lui  $I$  (detaliu).

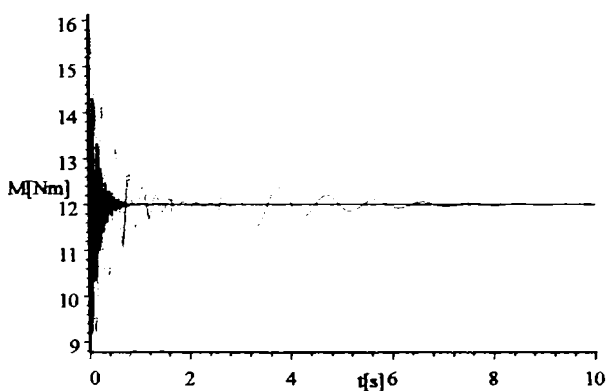


Fig. 6.2.97. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$ .

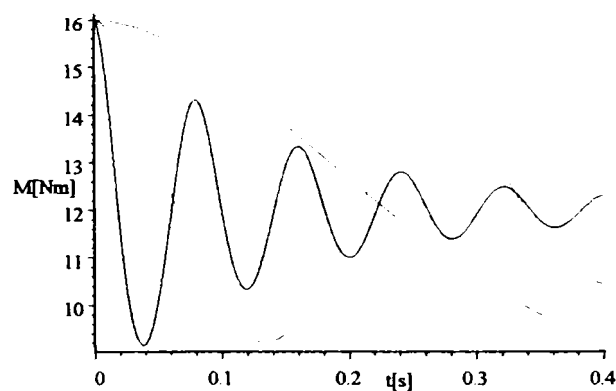


Fig. 6.2.97'. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$  (detaliu).

Din dorința de a sintetiza toate rezultatele studiului regimurilor tranzitorii prezentate în capitolul 6, și pentru a trage concluzii comparative și cât mai generale, concluziile și interpretările fenomenologice desprinse din evoluțiile în timp ale mărimilor ce caracterizează procesul tranzitoriu studiat în acest subparagraf sunt prezentate în paragraful 6.4 (la sfârșitul capitolului 6).

6.2.3.2. Descărcare bruscă de la 100% la 50% din  $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial  
 Sistemul de ecuații diferențiale care modelează acest proces este următorul (vezi tabelul  
 5.46, pag. 63):

$$\begin{cases}
 1.6X + 0.08 \frac{dX}{dt} - 0.07\omega Z + 1.1 \frac{dU}{dt} + 0.055 \frac{dW}{dt} - 0.058\omega Q = -220\sqrt{3} \sin \theta \\
 0.08\omega X + 1.6Z + 0.07 \frac{dZ}{dt} + 1.1\omega U + 0.055\omega W + 0.058 \frac{dQ}{dt} = 220\sqrt{3} \cos \theta \\
 1.1 \frac{dX}{dt} + 41.3U + 18.51 \frac{dU}{dt} + 0.62 \frac{dW}{dt} = 41.3 \\
 0.055 \frac{dX}{dt} + 0.62 \frac{dU}{dt} + 7.95W + 0.067 \frac{dW}{dt} = 0 \\
 0.058 \frac{dZ}{dt} + 30.22Q + 0.25 \frac{dQ}{dt} = 0 \\
 2(0.01XZ + 1.1ZU - 0.058XQ + 0.055ZW) - 8 - 0.5 \cdot \boxed{J} \frac{d\omega}{dt} = 0 \\
 \frac{d\theta}{dt} + \omega - 314 = 0 \\
 \theta(0) = 0.4370842 \\
 X(0) = -0.4720558 \\
 Z(0) = 7.304072 \\
 W(0) = 0 \\
 Q(0) = 0 \\
 U(0) = 1 \\
 \omega(0) = 314
 \end{cases} \quad (6.73)$$

În urma soluționării sistemului de mai sus, se obțin următoarele evoluții în timp ale mărimilor:

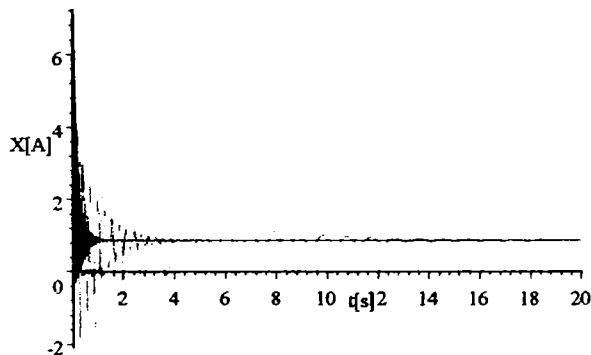


Fig. 6.2.98. Variația în timp a lui  $I_d$ .

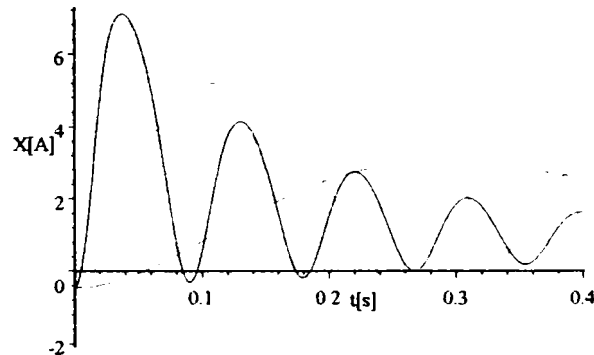


Fig. 6.2.98'. Variația în timp a lui  $I_d$  (detaliu).

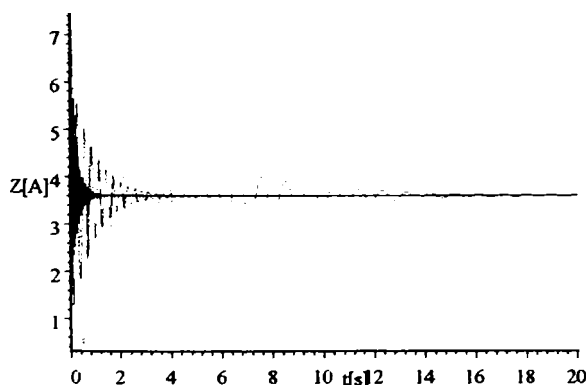


Fig. 6.2.99. Variația în timp a lui  $I_q$ .

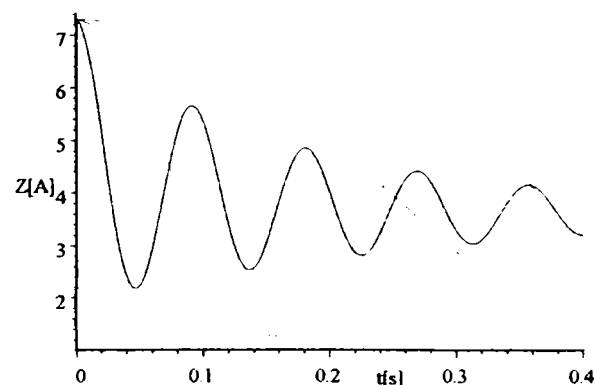


Fig. 6.2.99'. Variația în timp a lui  $I_q$  (detaliu).

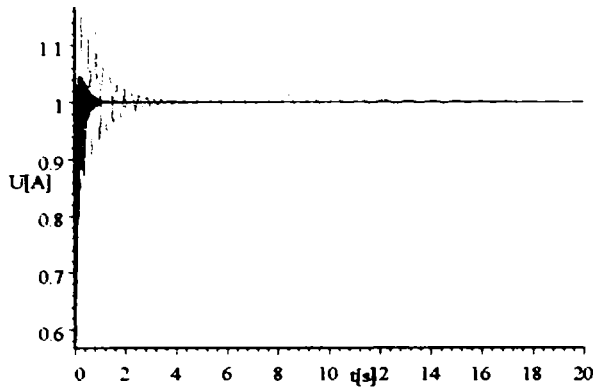


Fig.6.2.100. Variația în timp a lui  $I_E$ .

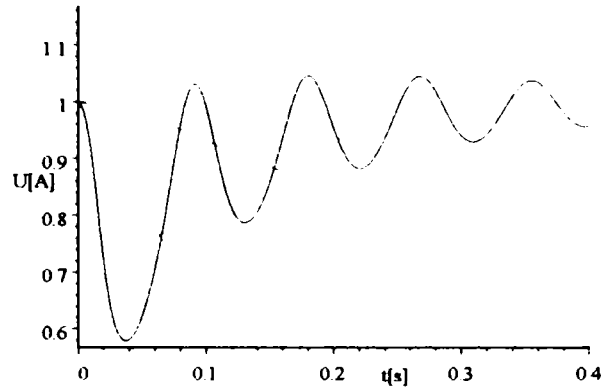


Fig.6.2.100'. Variația în timp a lui  $I_E$  (detaliu).

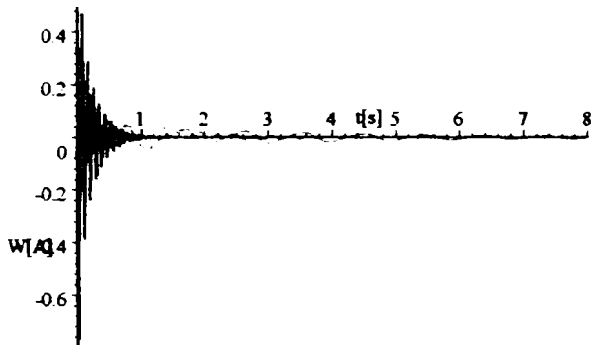


Fig.6.2.101. Variația în timp a lui  $I_D$ .

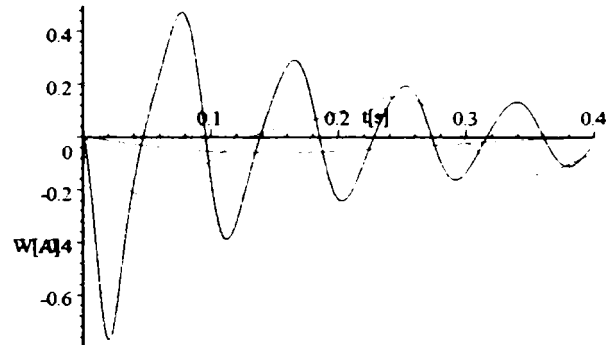


Fig.6.2.101'. Variația în timp a lui  $I_D$  (detaliu).

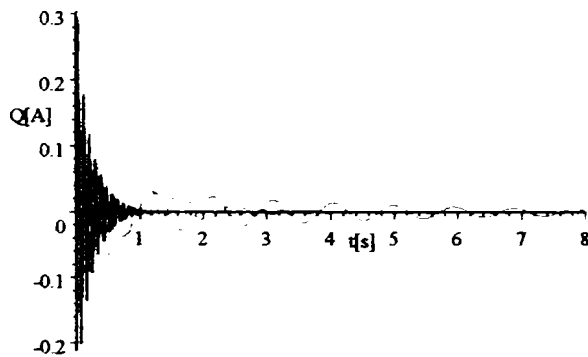


Fig.6.2.102. Variația în timp a lui  $I_Q$ .

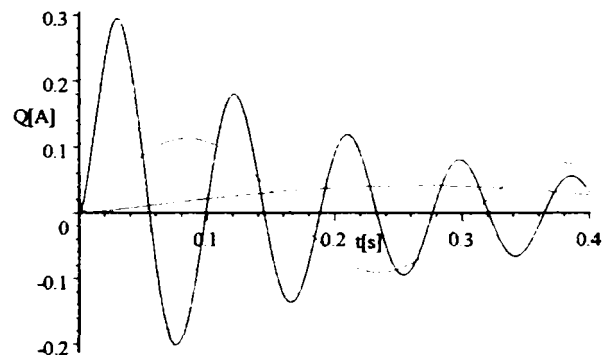


Fig.6.2.102'. Variația în timp a lui  $I_Q$  (detaliu).

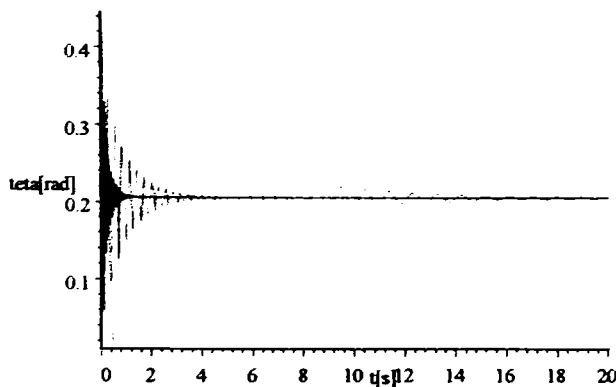


Fig.6.2.103. Variația în timp a lui  $\theta$ .

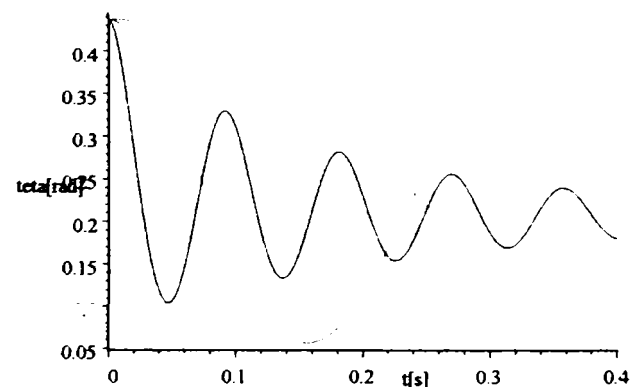


Fig.6.2.103'. Variația în timp a lui  $\theta$  (detaliu).

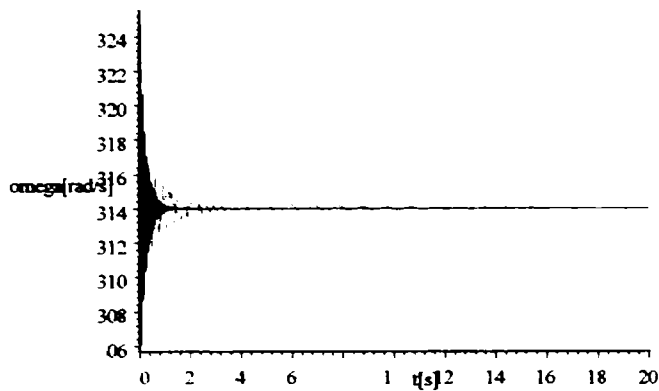


Fig.6.2.104. Variația în timp a lui  $\omega$ .

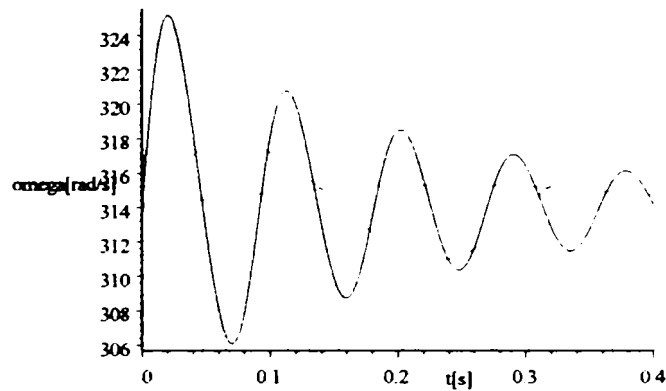


Fig.6.2.104'. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu).

Curentul statoric respectiv cuplul electromagnetic în mașina reală sunt:

$$I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos(\omega(t) \cdot t) - Z(t) \sin(\omega(t) \cdot t)) \quad (6.74)$$

$$M_{el\text{mag}}(t) = M(t) = 2(0.01X(t)Z(t) + 1.1Z(t)U(t) - 0.058X(t)Q(t) + 0.055Z(t)W(t)) \quad (6.75)$$

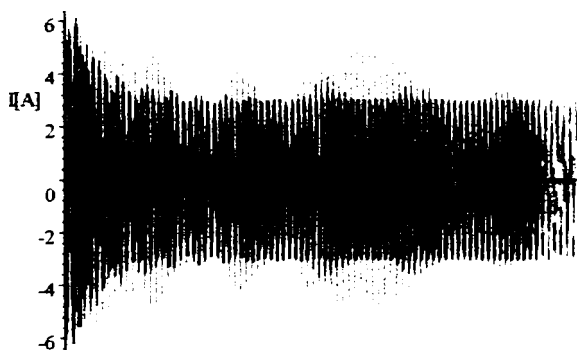


Fig.6.2.105. Variația în timp a lui  $I$ .

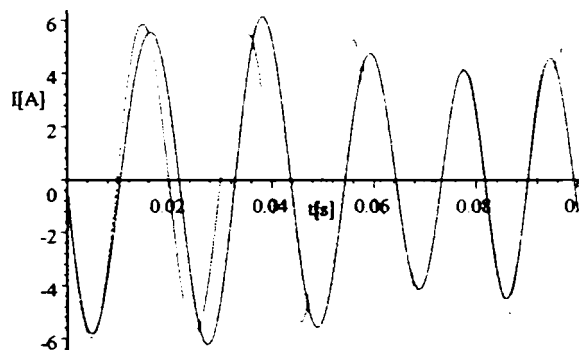


Fig.6.2.105'. Variația în timp a lui  $I$  (detaliu).

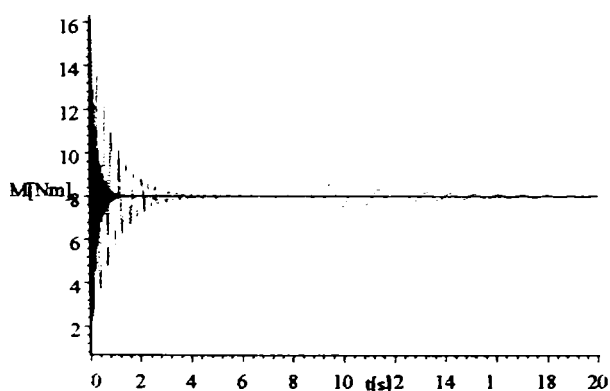


Fig.6.2.106. Variația în timp a lui  $M_{el\text{mag}}$ .

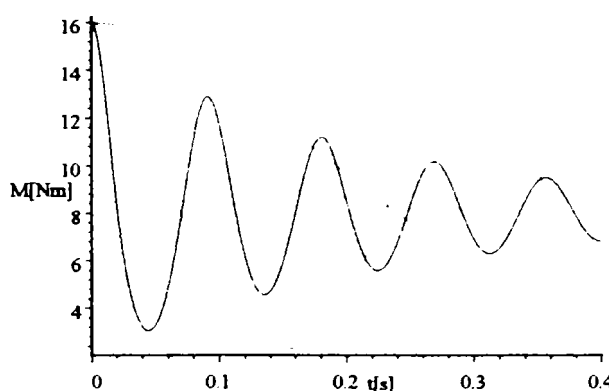


Fig.6.2.106'. Variația în timp a lui  $M_{el\text{mag}}$  (detaliu).

Din dorința de a sintetiza toate rezultatele studiului regimurilor tranzitorii prezentate în capitolul 6, și pentru a trage concluzii comparative și cât mai generale, concluziile și interpretările fenomenologice desprinse din evoluțiile în timp ale mărimilor ce caracterizează procesul tranzitoriu studiat în acest subparagraf sunt prezentate în paragraful 6.4 (la sfârșitul capitolului 6).

6.2.3.3.Descărcare bruscă de la 100% la 25% din  $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial

Sistemul de ecuații diferențiale care modelează acest proces este următorul(vezi tabelul 6.46, pag.63):

$$\begin{cases}
 1.6X + 0.08 \frac{dX}{dt} - 0.07\omega Z + 1.1 \frac{dU}{dt} + 0.055 \frac{dW}{dt} - 0.058\omega Q = -220\sqrt{3} \sin \theta \\
 0.08\omega X + 1.6Z + 0.07 \frac{dZ}{dt} + 1.1\omega U + 0.055\omega W + 0.058 \frac{dQ}{dt} = 220\sqrt{3} \cos \theta \\
 1.1 \frac{dX}{dt} + 41.3U + 18.51 \frac{dU}{dt} + 0.62 \frac{dW}{dt} = 41.3 \\
 0.055 \frac{dX}{dt} + 0.62 \frac{dU}{dt} + 7.95W + 0.067 \frac{dW}{dt} = 0 \\
 0.058 \frac{dZ}{dt} + 30.22Q + 0.25 \frac{dQ}{dt} = 0 \\
 2(0.01XZ + 1.1ZU - 0.058XQ + 0.055ZW) - 4 - 0.5 \cdot \boxed{J} \frac{d\omega}{dt} = 0 \\
 \frac{d\theta}{dt} + \omega - 314 = 0 \\
 \theta(0) = 0.4370842 \\
 X(0) = -0.4720558 \\
 Z(0) = 7.304072 \\
 W(0) = 0 \\
 Q(0) = 0 \\
 U(0) = 1 \\
 \omega(0) = 314
 \end{cases} \quad (6.76)$$

În urma soluționării sistemului de mai sus, se obțin următoarele evoluții în timp ale mărimilor:

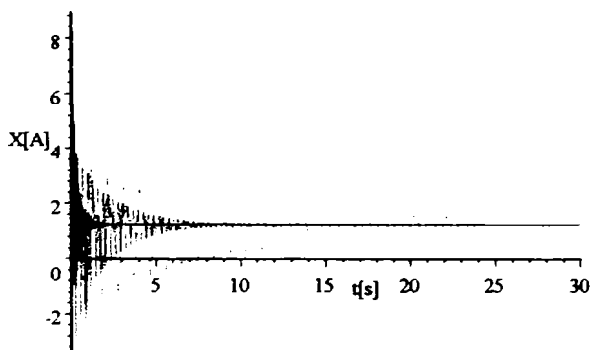


Fig.6.2.107.Variația în timp a lui  $I_d$ .

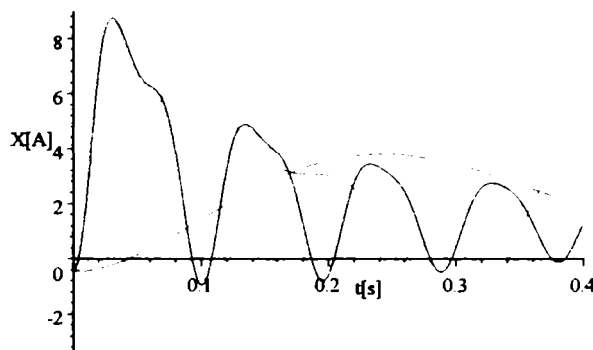


Fig.6.2.107'.Variația în timp a lui  $I_d$ (detaliu).

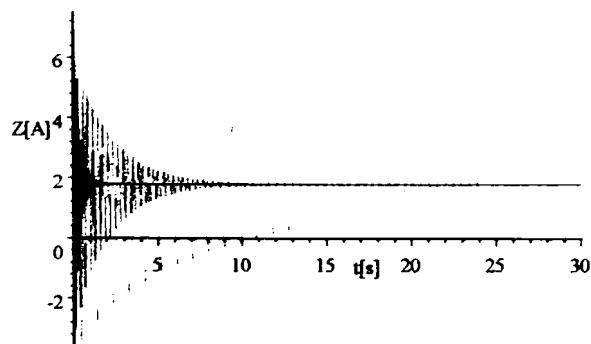


Fig.6.2.108.Variația în timp a lui  $I_q$ .

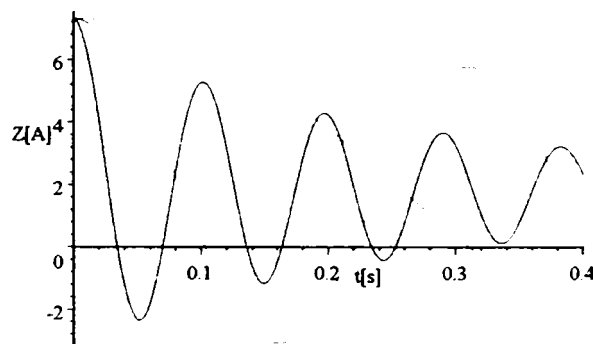


Fig.6.2.108'.Variația în timp a lui  $I_q$ (detaliu).

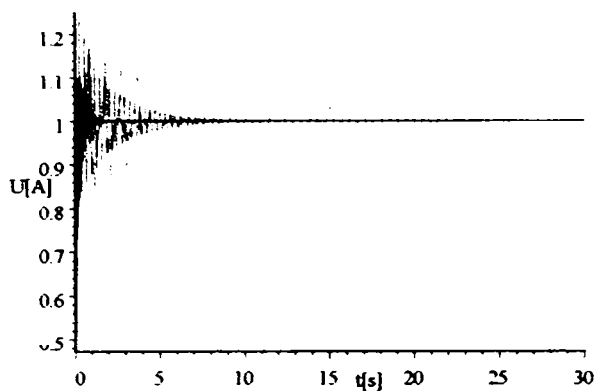


Fig.6.2.109. Variația în timp a lui  $I_E$ .

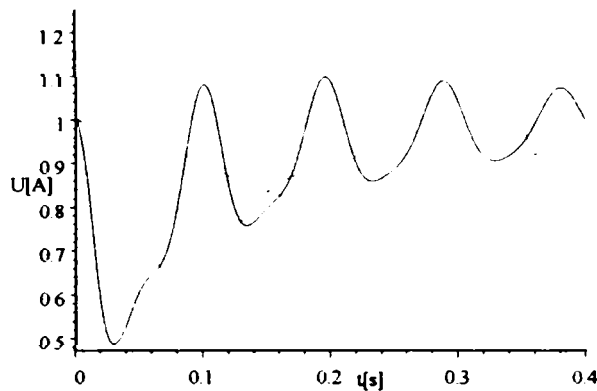


Fig.6.2.109'. Variația în timp a lui  $I_E$ (detaliu).

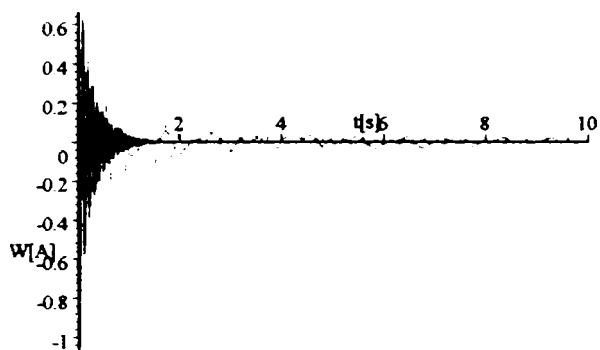


Fig.6.2.110. Variația în timp a lui  $I_D$ .

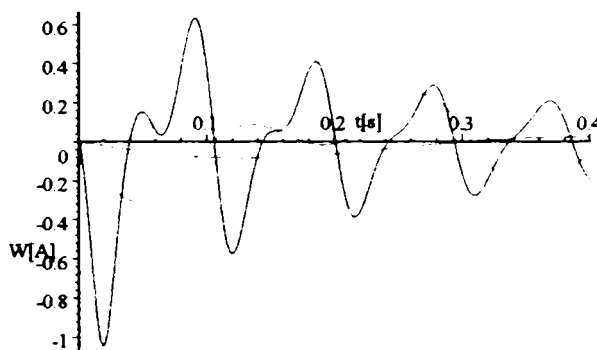


Fig.6.2.110'. Variația în timp a lui  $I_D$ (detaliu).

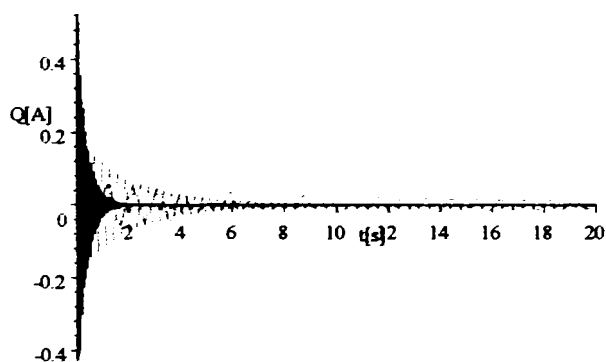


Fig.6.2.111. Variația în timp a lui  $I_Q$ .

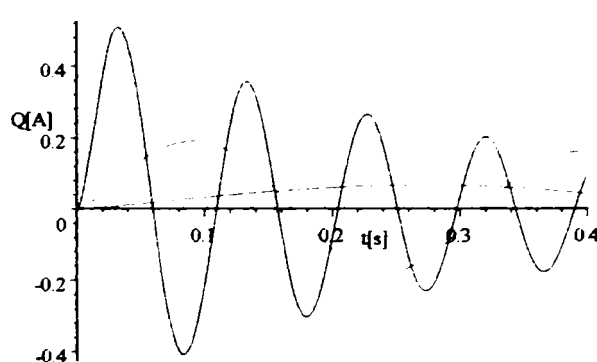


Fig.6.2.111'. Variația în timp a lui  $I_Q$ (detaliu)

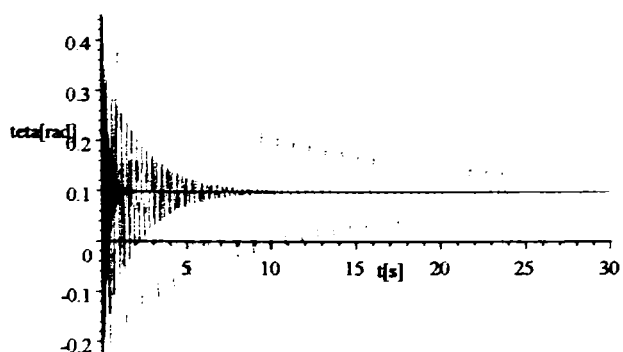


Fig.6.2.112. Variația în timp a lui  $\theta$ .

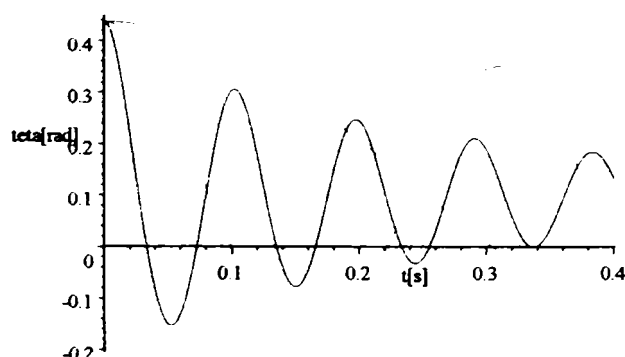


Fig.6.2.112'. Variația în timp a lui  $\theta$ (detaliu).



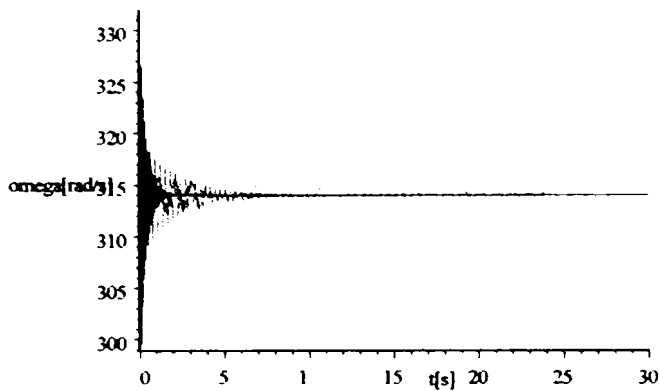


Fig.6.2.113. Variația în timp a lui  $\omega$ .

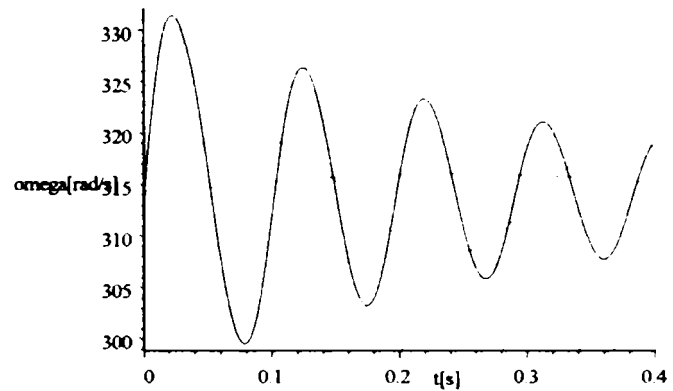


Fig.6.2.113'. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu).

Curentul statoric respectiv cuplul electromagnetic în mașina reală sunt:

$$I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos(\omega(t) \cdot t) - Z(t) \sin(\omega(t) \cdot t)) \quad (6.77)$$

$$M_{el\text{mag}}(t) = M(t) = 2(0.01X(t)Z(t) + 1.1Z(t)U(t) - 0.058X(t)Q(t) + 0.055Z(t)W(t)) \quad (6.78)$$



Fig.6.2.114. Variația în timp a lui  $I$ .

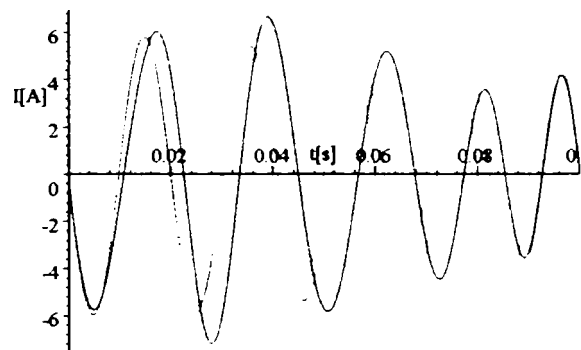


Fig.6.2.114'. Variația în timp a lui  $I$  (detaliu).

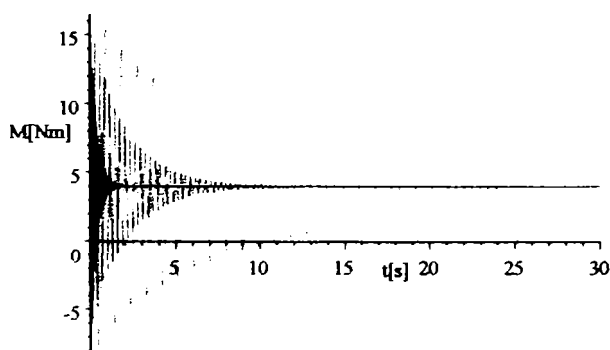


Fig.6.2.115. Variația în timp a lui  $M_{el\text{mag}}$ .

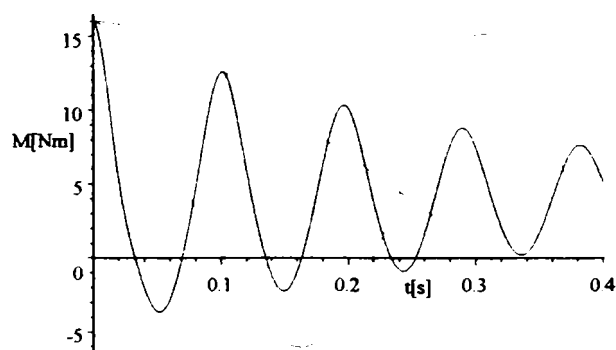


Fig.6.2.115'. Variația în timp a lui  $M_{el\text{mag}}$  (detaliu).

Din dorința de a sintetiza toate rezultatele studiului regimurilor tranzitorii prezentate în capitolul 6, și pentru a trage concluzii comparative și cât mai generale, concluziile și interpretările fenomenologice desprinse din evoluțiile în timp ale mărimilor ce caracterizează procesul tranzitoriu studiat în acest subparagraf sunt prezentate în paragraful 6.4 (la sfârșitul capitolului 6).

6.2.3.4.Descărcare bruscă de la 100% la 0% din  $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial  
Sistemul de ecuații diferențiale care modelează acest proces este următorul(vezi tabelul 6.46, pag.63):

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.6X + 0.08 \frac{dX}{dt} - 0.07\omega Z + 1.1 \frac{dU}{dt} + 0.055 \frac{dW}{dt} - 0.058\omega Q = -220\sqrt{3} \sin \theta \\ 0.08\omega X + 1.6Z + 0.07 \frac{dZ}{dt} + 1.1\omega U + 0.055\omega W + 0.058 \frac{dQ}{dt} = 220\sqrt{3} \cos \theta \\ 1.1 \frac{dX}{dt} + 41.3U + 18.51 \frac{dU}{dt} + 0.62 \frac{dW}{dt} = 41.3 \\ 0.055 \frac{dX}{dt} + 0.62 \frac{dU}{dt} + 7.95W + 0.067 \frac{dW}{dt} = 0 \\ 0.058 \frac{dZ}{dt} + 30.22Q + 0.25 \frac{dQ}{dt} = 0 \\ 2(0.01XZ + 1.1ZU - 0.058XQ + 0.055ZW) - 0 - 0.5 \cdot \boxed{J} \frac{d\omega}{dt} = 0 \\ \frac{d\theta}{dt} + \omega - 314 = 0 \\ \theta(0) = 0.4370842 \\ X(0) = -0.4720558 \\ Z(0) = 7.304072 \\ W(0) = 0 \\ Q(0) = 0 \\ U(0) = 1 \\ \omega(0) = 314 \end{array} \right. \quad (6.79)$$

În urma soluționării sistemului de mai sus, se obțin următoarele evoluții în timp ale mărimilor:

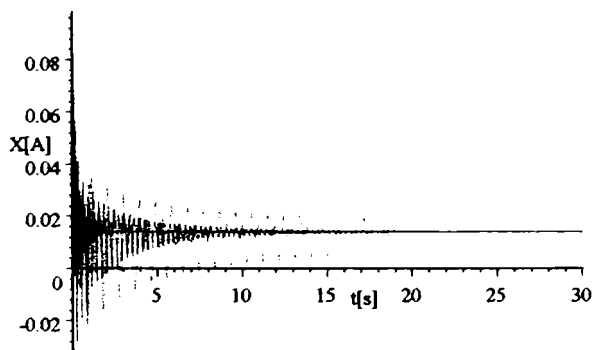


Fig.6.2.116.Variația în timp a lui  $I_d$ .

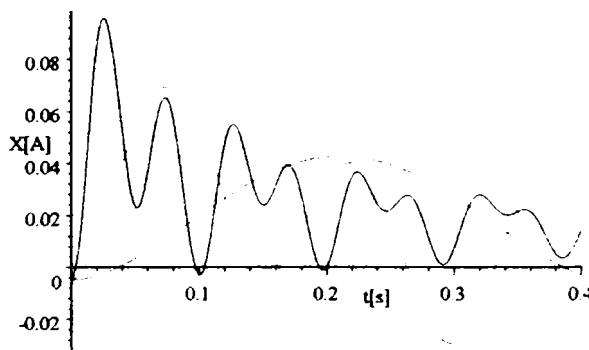


Fig.6.2.116'.Variația în timp a lui  $I_d$ (detaliu).

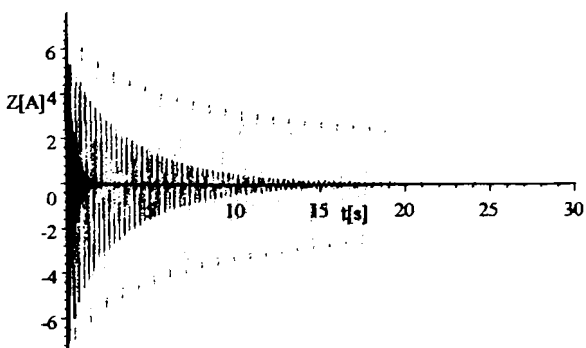


Fig.6.2.117.Variația în timp a lui  $I_q$ .

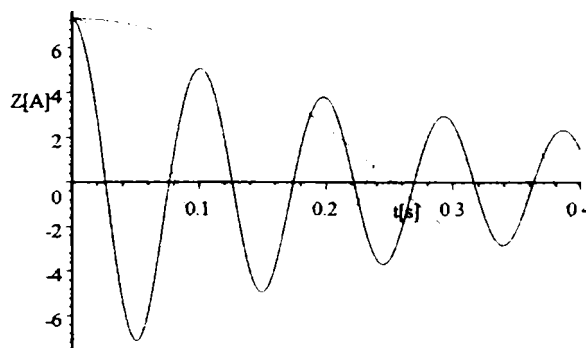


Fig.6.2.117'.Variația în timp a lui  $I_q$ (detaliu).

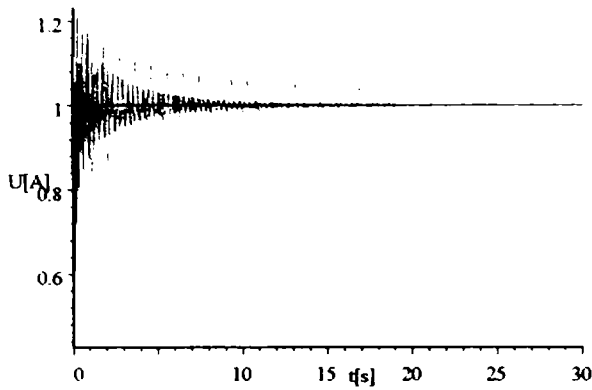


Fig.6.2.118. Variația în timp a lui  $I_E$ .

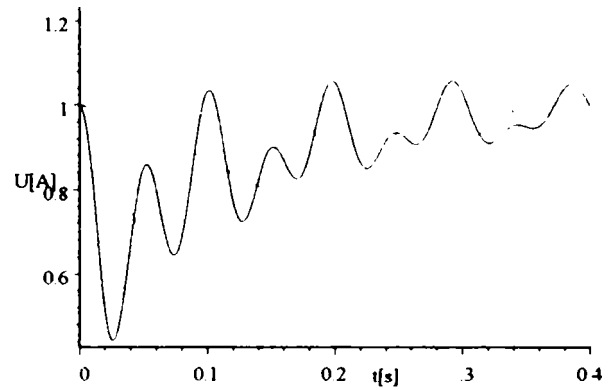


Fig.6.2.118'. Variația în timp a lui  $I_E$  (detaliu).

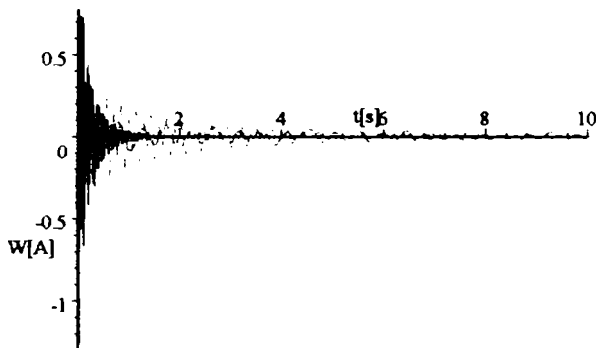


Fig.6.2.119. Variația în timp a lui  $I_D$ .

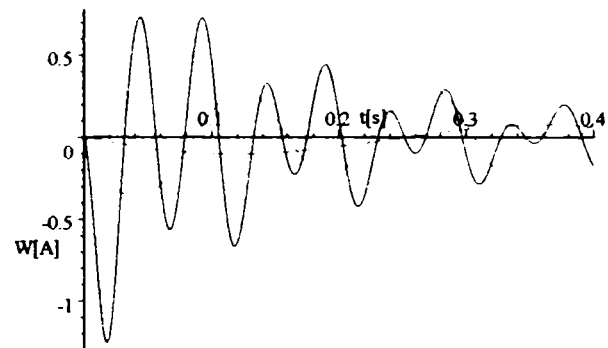


Fig.6.2.119'. Variația în timp a lui  $I_D$  (detaliu).

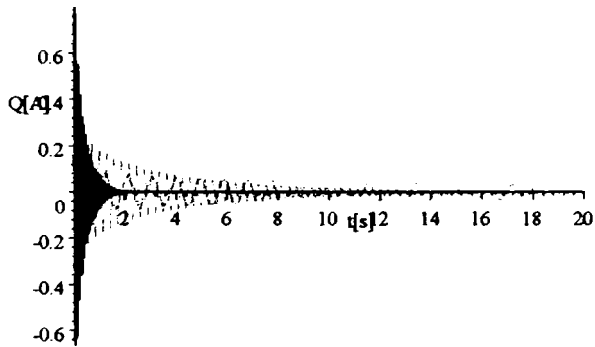


Fig.6.2.120. Variația în timp a lui  $I_Q$ .

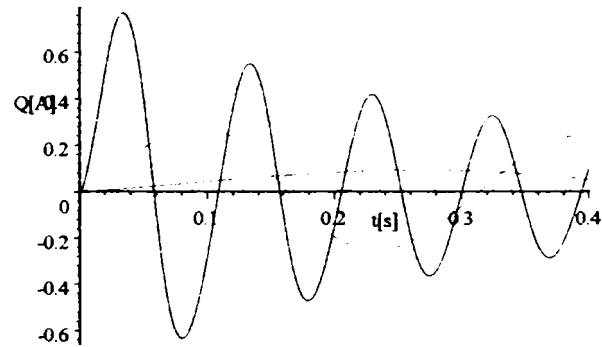


Fig.6.2.120'. Variația în timp a lui  $I_Q$  (detaliu).

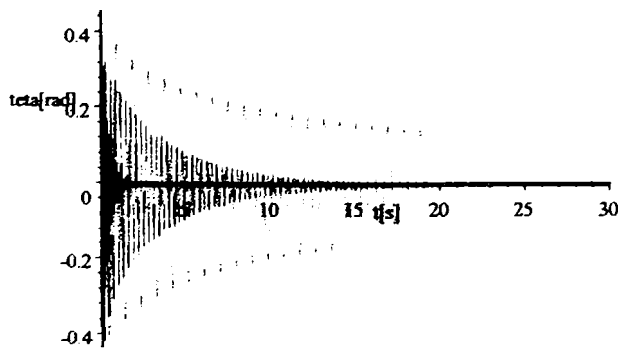


Fig.6.2.121. Variația în timp a lui  $\theta$ .

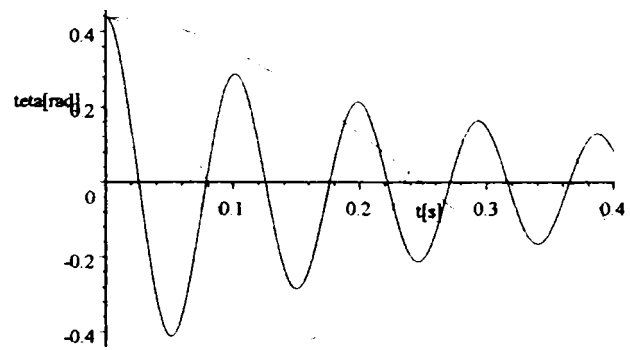


Fig.6.2.121'. Variația în timp a lui  $\theta$  (detaliu).

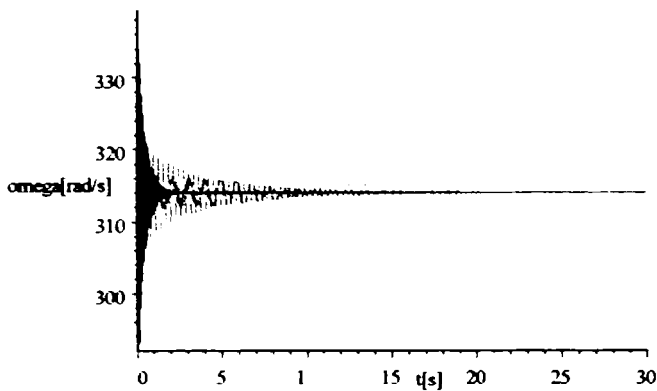


Fig.6.2.122. Variația în timp a lui  $\omega$ .

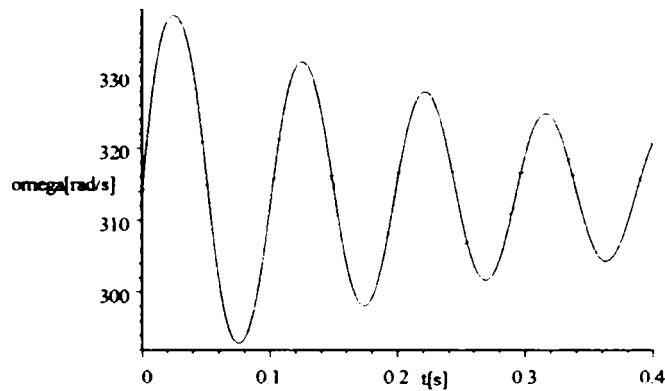


Fig.6.2.122'. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu).

Curentul statoric respectiv cuplul electromagnetic în mașina reală sunt:

$$I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos(\omega(t) \cdot t) - Z(t) \sin(\omega(t) \cdot t)) \quad (6.80)$$

$$M_{el\text{mag}}(t) = M(t) = 2(0.01X(t)Z(t) + 1.1Z(t)U(t) - 0.058X(t)Q(t) + 0.055Z(t)W(t)) \quad (6.81)$$

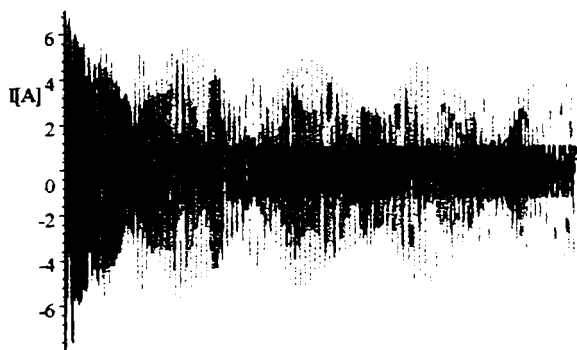


Fig.6.2.123. Variația în timp a lui  $I$ .

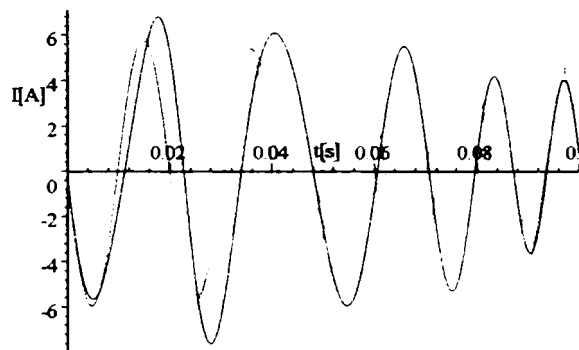


Fig.6.2.123'. Variația în timp a lui  $I$  (detaliu).

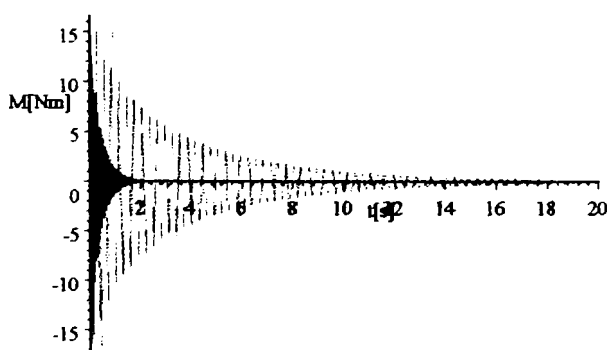


Fig.6.2.124. Variația în timp a lui  $M_{el\text{mag}}$ .

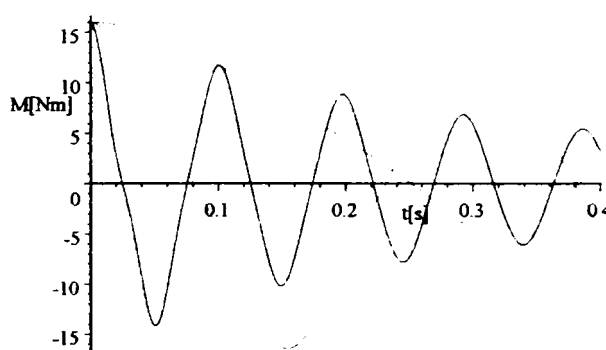


Fig.6.2.124'. Variația în timp a lui  $M_{el\text{mag}}$  (detaliu).

Din dorința de a sintetiza toate rezultatele studiului regimurilor tranzitorii prezentate în capitolul 6, și pentru a trage concluzii comparative și cât mai generale, concluziile și interpretările fenomenologice desprinse din evoluțiile în timp ale mărimilor ce caracterizează procesul tranzitoriu studiat în acest subparagraf sunt prezentate în paragraful 6.4 (la sfârșitul capitolului 6).

**6.2.4. Modelarea și simularea reversării motorului sincron**

Inițial motorul sincron funcționează la o încărcare de 0% din  $M_N$  respectiv la o încărcare de 100% din  $M_N$  (a se vedea subparagraful 6.2.2.4).

Reversarea motorului sincron presupune schimbarea sensului de rotație, ceea ce implică (în situația când este alimentat direct de la rețea- la tensiunea și frecvența rețelei industriale) scoaterea (ieșirea) acestuia din sincronism și apariția de solocități electromagnetice.

Procesul tranzitoriu de reversare a motorului sincron începe la momentul de timp  $t_0 = 0[s]$  după ce în prealabil motorul sincron a fost deconectat de la rețea (atât statorul cât și rotorul) respectiv s-au inversat între ele două faze de alimentare și apoi din nou s-a conectat motorul la rețea (cu rotorul în scurtcircuit), în tot acest timp considerându-se că turația s-a păstrat constantă.

**6.2.4.1. Reversarea motorului sincron de la 0% din  $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial**

Ca și la încărcarea respectiv descărcarea motorului sincron, se consideră pentru momentul de inerție axial  $J$  doar trei valori care sunt cele mai semnificative în intervalul de variație al acestuia și anume:

$$J_1 = 0.008663 [kg \cdot m^2]; J_2 = 0.08663 [kg \cdot m^2]; J_3 = 0.8663 [kg \cdot m^2].$$

Corespunzător acestor valori reprezentarea în timp a mărimilor ce intervin în procesele tranzitorii se face diferențiat prin culorile: negru, roșu respectiv verde.

În conformitate cu cele spuse mai sus, modelarea reversării motorului sincron (imediat după ieșirea lui din sincronism și până la intrarea din nou în sincronism în celălalt sens de rotație) se face pe baza ecuațiilor motorului asincron (a se vedea paragraful 6.2.1-Etapa I, respectiv anexa D, D1-D3), rezultând deci următorul sistem de ecuații diferențiale în care mărimile (necunoscutele) sunt funcții de timp, ele fiind notate conform cu tabelul 6.82 (a se vedea relațiile 6.1, 6.2, 6.8):

<u>Mărime</u>	<u>Notatie</u>	<u>Semnificație</u>	(6.82)
$I_d(t)$	= $X(t)$	-curentul statoric direct din axa d,	
$I_q(t)$	= $Y(t)$	-curentul statoric direct din axa q,	
$I_{dr}(t)$	= $Z(t)$	-curentul rotoric din axa d (direct și invers),	
$I_{qr}(t)$	= $U(t)$	-curentul rotoric din axa q (direct și invers),	
$I_{di}(t)$	= $V(t)$	-curentul statoric invers din axa d,	
$I_{qi}(t)$	= $W(t)$	-curentul statoric invers din axa q,	
$s(t)$	= $s(t)$	-alunecarea,	
$n(t)$	= $n(t)$	-turația,	
$I_{direct}(t)$	= $I(t)$	-curentul de secvență directă în mașina reală,	
$I_{invers}(t)$	= $J(t)$	-curentul de secvență inversă în mașina reală,	
$I_{rez}(t)$	= $H(t)$	-curentul rezultat în mașina reală,	
$M_{direct}(t)$	= $T(t)$	-cuplul electromagnetic de secvență directă,	
$M_{invers}(t)$	= $F(t)$	-cuplul electromagnetic de secvență inversă,	
$M_{el\ mag. rez}(t)$	= $M(t)$	-cuplul electromagnetic rezultat.	

$$\begin{aligned}
 & 1.6X + 0.08 \frac{dY}{dt} - 25.12Y + 0.06245 \frac{dZ}{dt} - 19.6093U = 220\sqrt{3} \\
 & 25.12X + 1.6Y + 0.08 \frac{dY}{dt} + 19.6093Z + 0.06245 \frac{dU}{dt} = 0 \\
 & 0.06245 \frac{dY}{dt} - 19.6093sY + 1.566Z + 0.0539 \frac{dZ}{dt} - 16.9246sU - 0.06245 \frac{dV}{dt} + 19.6093sW = 0 \\
 & 19.6093sX + 0.06245 \frac{dY}{dt} + 16.9246sZ + 1.566U + 0.0539 \frac{dU}{dt} - 19.6093sV - 0.06245 \frac{dW}{dt} = 0 \\
 & 0.06245 \frac{dZ}{dt} + 19.6093(1-2s)U + 1.6V + 0.08 \frac{dV}{dt} + 25.12(1-2s)W = 0 \\
 & 19.6093(2s-1)Z + 0.06245 \frac{dU}{dt} + 25.12(2s-1)V + 1.6W + 0.08 \frac{dW}{dt} = 0 \\
 & 2(0.06245(YZ - XU) + 0.06245(UV - ZW)) + \boxed{J} \cdot 157 \frac{ds}{dt} = 0 \quad (6.83)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 X(0) &= 0 \\
 Y(0) &= 0 \\
 Z(0) &= 0 \\
 U(0) &= 0 \\
 V(0) &= 0 \\
 W(0) &= 0 \\
 s(0) &= 2
 \end{aligned}$$

Procesul de reversare începe la momentul de timp  $t_0 = 0[s]$ , moment la care înfășurarea de excitație a motorului sincron este deconectată de la sursa de tensiune continuă și conectată peste o rezistență de  $10R_E$  ( $R_E$ - rezistența înfășurării de excitație)[B4].

În urma soluționării sistemului de ecuații diferențiale (6.83), procesul tranzitoriu de reversare este cunoscut prin interpretarea evoluției în timp a următoarelor mărimi:

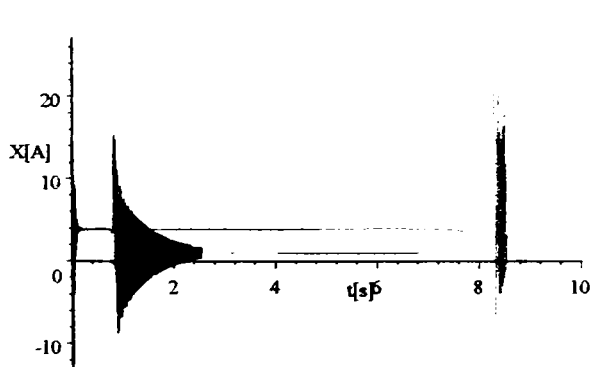


Fig.6.2.125. Variația în timp a lui  $I_d$ .

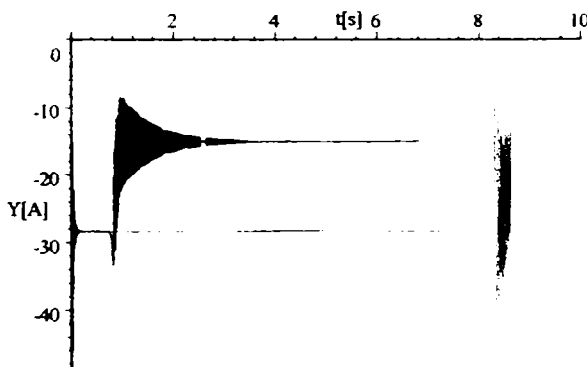


Fig.6.2.126. Variația în timp a lui  $I_q$ .

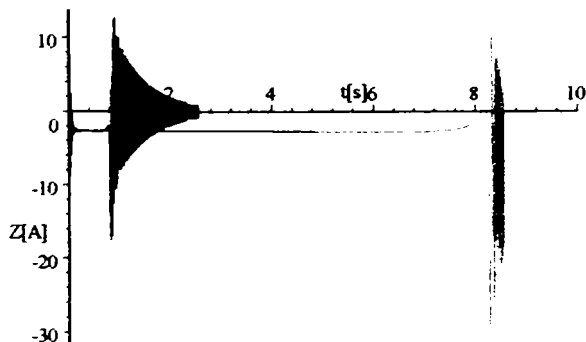


Fig.6.2.127. Variația în timp a lui  $I_{dr}$ .

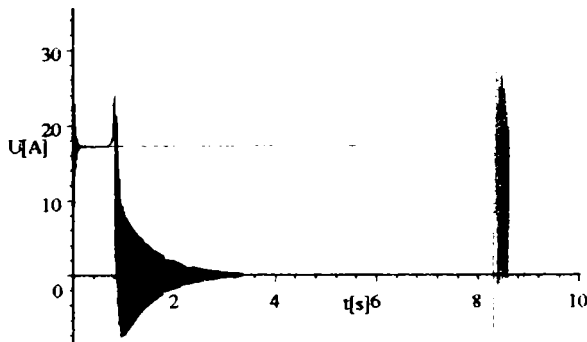


Fig.6.2.128. Variația în timp a lui  $I_{qr}$ .

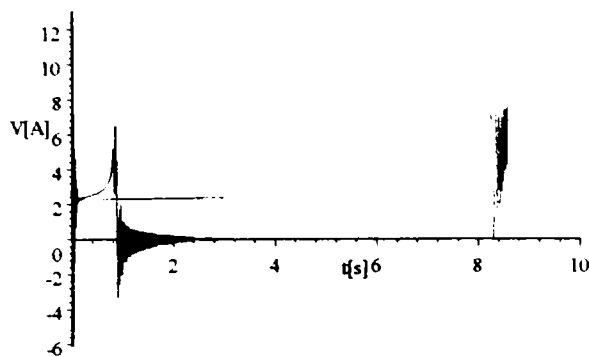


Fig.6.2.129. Variația în timp a lui  $I_{di}$ .

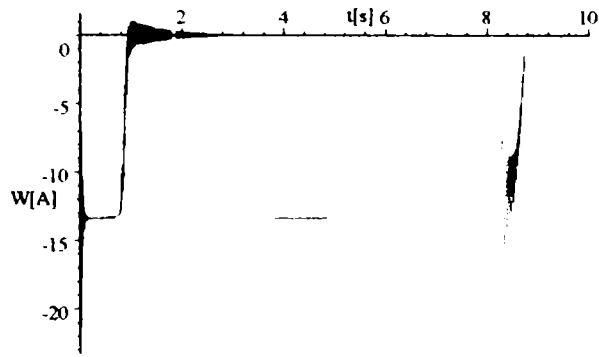


Fig.6.2.130. Variația în timp a lui  $I_{qt}$ .

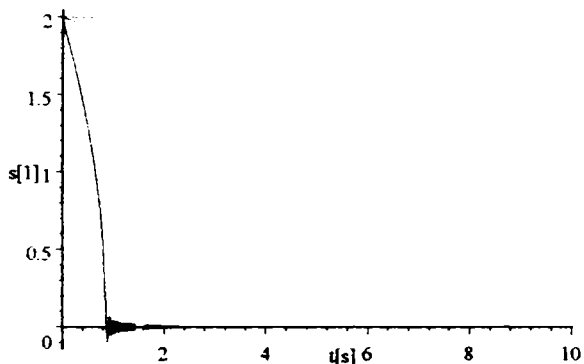


Fig.6.2.131. Variația în timp a lui  $s$ .

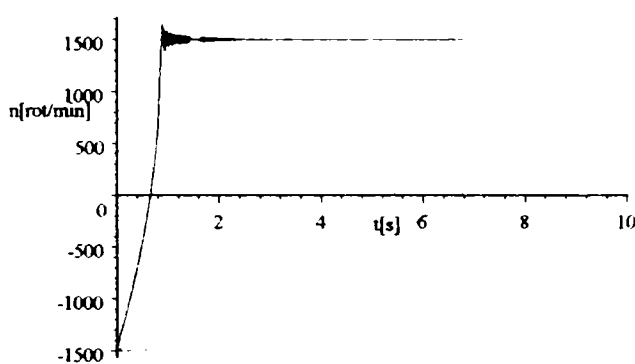


Fig.6.2.132. Variația turației  $n(t) = 1500(1 - s(t))$ .

Curenții de secvență directă respectiv de secvență inversă, în mașina reală sunt dați de relațiile(a se vedea relațiile 6.3, 6.4):

$$I_{direct}(t) = I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos 314t - Y(t) \sin 314t) \quad (6.84)$$

$$I_{invers}(t) = J(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (V(t) \cos 314|2s(t) - 1|t - W(t) \sin 314|2s(t) - 1|t). \quad (6.85)$$

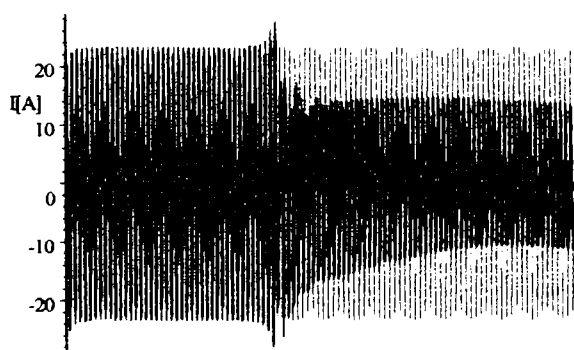


Fig.6.2.133. Variația în timp a lui  $I_{direct}$ .

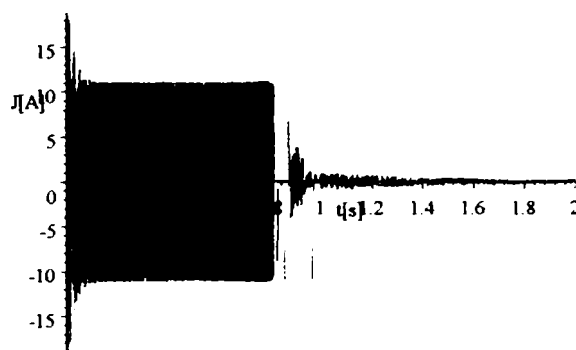


Fig.6.2.134. Variația în timp a lui  $I_{invers}$ .

Cuplul electromagnetic de secvență directă respectiv de secvență inversă în mașina reală în procesul de reversare este(a se vedea relațiile 6.6, 6.7):

$$M_{direct}(t) = T(t) = 2(0.0573(Y(t)Z(t) - X(t)U(t))) \quad (6.86)$$

$$M_{invers}(t) = F(t) = 2(0.0573(U(t)V(t) - Z(t)W(t))) \quad (6.87)$$

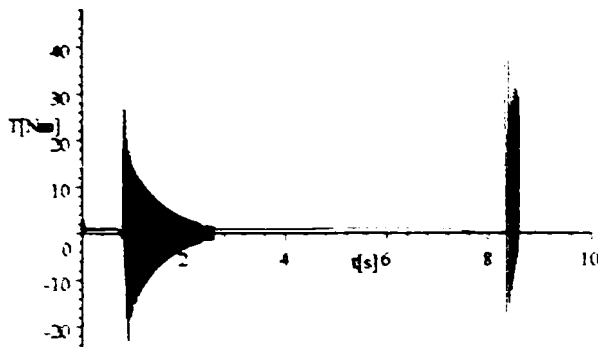


Fig. 6.2.135. Variația în timp a lui  $M_{direct}$ .

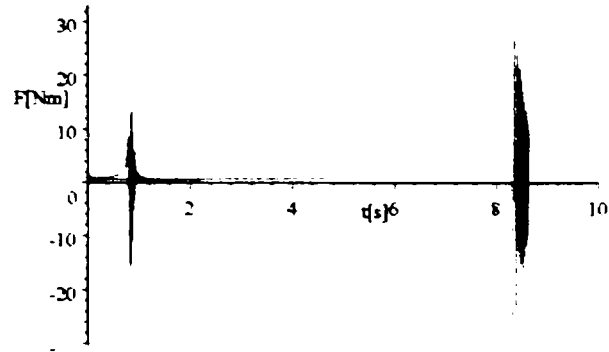


Fig. 6.2.136. Variația în timp a lui  $M_{invers}$ .

Curentul real rezultat respectiv cuplul electromagnetic rezultat în mașina reală în procesul de reversare al motorului sincron sunt (a se vedea relațiile 6.5, 6.8):

$$I_{rec}(t) = H(t) = I(t) + J(t). \quad (6.88)$$

$$M_{elmag}(t) = M(t) = 2(0.0573(Y(t)Z(t) - X(t)U(t)) + 0.0573(U(t)V(t) - Z(t)W(t))) \quad (6.89)$$

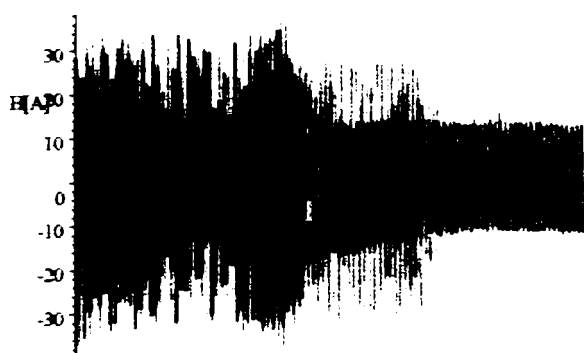


Fig. 6.2.137. Variația în timp a lui  $I_{rec}$ .

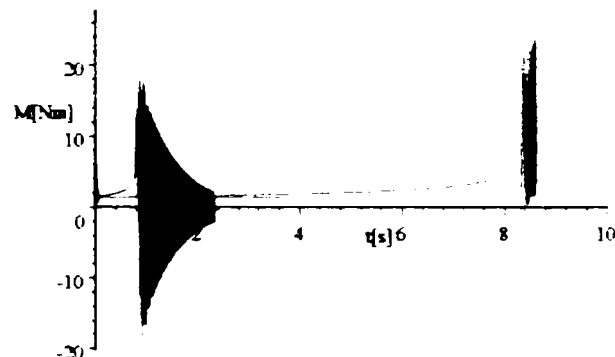


Fig. 6.2.138. Variația în timp a lui  $M_{elmag,rec}$ .

Procesul sincronizării la motorul sincron reversat (în asincron) cu  $J_1 = 0.008663 [kg \cdot m^2]$ , are loc la  $t = 4[s]$  când:  $\theta = 0^\circ$ , respectiv:

$$\begin{cases} I_d(4) = 0.9705248[A]; I_q(4) = -15.02869[A] \\ \omega(4) = 2\pi f = \frac{2\pi \cdot p_1(1500(1-s(4)))}{60} = 312.5928 [rad \cdot s^{-1}] \\ s(4) = 0.00448146 \\ n(4) = 1493.278 [rot/min] \end{cases} \quad (6.90)$$

În vederea simplificării scrierii, se fac următoarele notații:

Mărime	Notăție	Semnificație
$I_d(t)$	$X(t)$	- curentul prin înfășurarea statorică din axa d,
$I_q(t)$	$Z(t)$	- curentul prin înfășurarea statorică din axa q,
$I_D(t)$	$W(t)$	- curentul prin înfășurarea de amortizare din axa d,
$I_Q(t)$	$Q(t)$	- curentul prin înfășurarea de amortizare din axa q,
$I_E(t)$	$U(t)$	- curentul prin înfășurarea de excitație,
$\omega(t)$	$\omega(t), \omega(t)$	- pulsația electrică (sau viteza unghiulară),
$I(t)$	$I(t)$	- curentul în mașina reală,
$M_{elmag}$	$M(t)$	- cuplul electromagnetic.



Sistemul de ecuații diferențiale pentru acest caz este următorul:

$$\begin{cases}
 1.6X + 0.08 \frac{dX}{dt} - 16.6682Z + 1.1 \frac{dU}{dt} + 0.055 \frac{dW}{dt} - 13.81079Q = 0 \\
 19.04937X + 1.6Z + 0.07 \frac{dZ}{dt} + 261.9288U + 13.09644W + 0.058 \frac{dQ}{dt} = 220\sqrt{3} \\
 1.1 \frac{dX}{dt} + 41.3U + 18.51 \frac{dU}{dt} + 0.62 \frac{dW}{dt} = 41.3 \\
 0.055 \frac{dX}{dt} + 0.62 \frac{dU}{dt} + 7.95W + 0.067 \frac{dW}{dt} = 0 \\
 0.058 \frac{dZ}{dt} + 30.22Q + 0.25 \frac{dQ}{dt} = 0 \\
 2(0.01XZ + 1.1ZU - 0.058XQ + 0.055ZW) - 0.5 \cdot 0.008663 \frac{d\omega}{dt} = 0 \\
 X(0) = 0.9705248 \\
 Z(0) = -15.02869 \\
 W(0) = 0 \\
 Q(0) = 0 \\
 U(0) = 1 \\
 \omega(0) = 312.5928
 \end{cases} \quad (6.92)$$

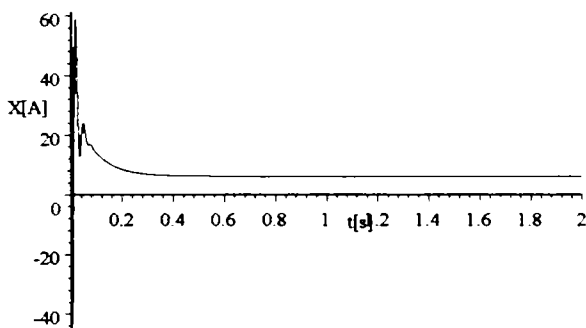


Fig.6.2.139. Variația în timp a lui  $I_d$ .

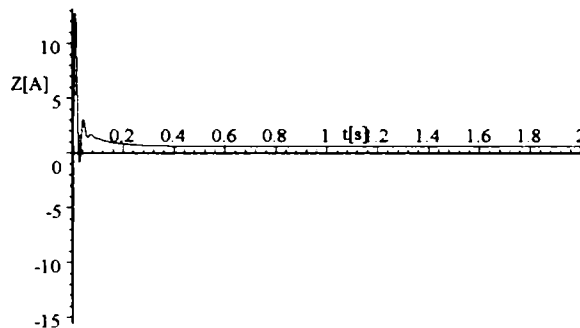


Fig.6.2.140. Variația în timp a lui  $I_q$ .

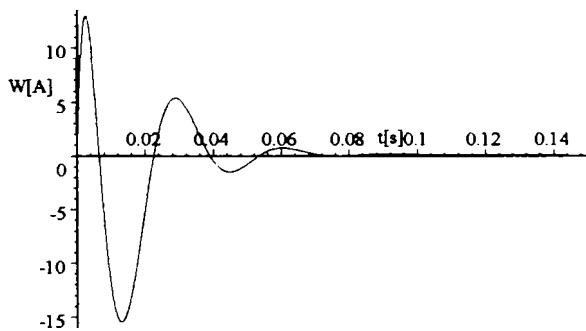


Fig.6.2.141. Variația în timp a lui  $I_D$ .

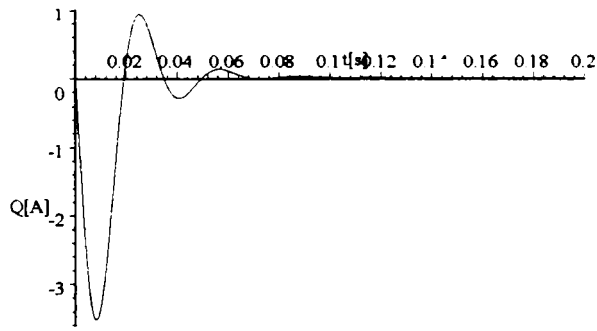


Fig.6.2.142. Variația în timp a lui  $I_Q$ .

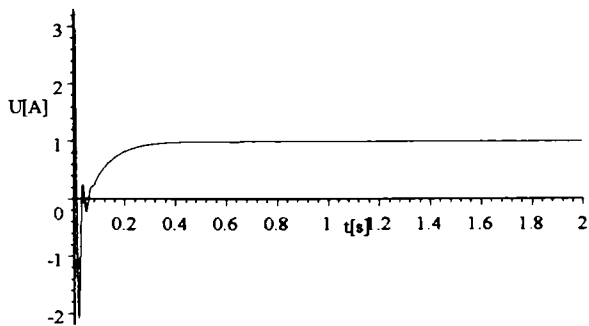


Fig.6.2.143. Variația în timp a lui  $I_E$ .

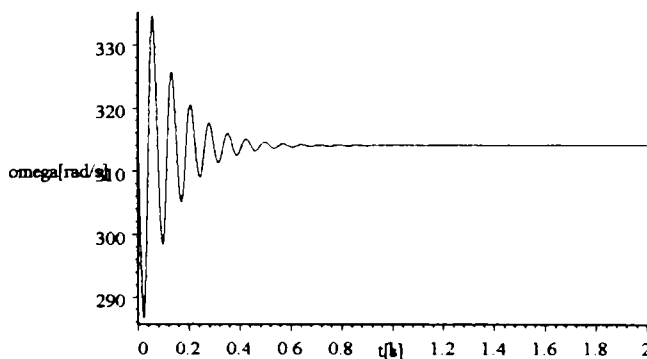


Fig.6.2.144. Variația în timp a lui  $\omega$ .

Curentul static respectiv cuplul electromagnetic în mașina reală sunt:

$$I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos 314t - Z(t) \sin 314t) \quad (6.93)$$

$$M_{elmag}(t) = M(t) = 2(0.01X(t)Z(t) + 1.1Z(t)U(t) - 0.058X(t)Q(t) + 0.055Z(t)W(t)) \quad (6.94)$$



Fig.6.2.145. Variația în timp a lui  $I$ .

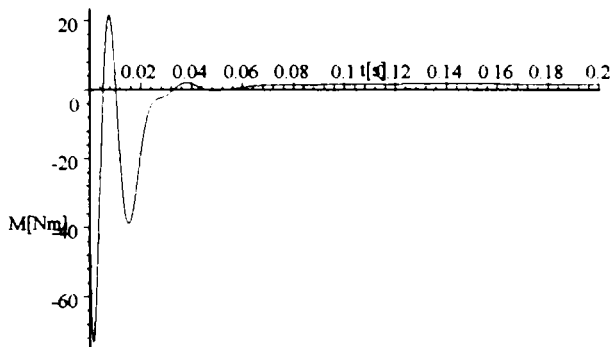


Fig.6.2.146. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$ .

6.2.4.2.Reversarea motorului sincron de la 100% din  $M_N$ ,  
cu modificarea momentului de inerție axial

Ca și în cazul anterior, se consideră pentru momentul de inerție axial  $J$  aceleași trei valori menționate la cazul de mai înainte, reprezentate prin aceeași ordine de culori. Deasemenea se păstrează aceleași notații(6.82).

Sistemul de ecuații diferențiale în acest caz este următorul(a se vedea relațiile 6.1, 6.2, 6.8):

$$\left\{ \begin{aligned} 1.6X + 0.08 \frac{dX}{dt} - 25.12Y + 0.06245 \frac{dZ}{dt} - 19.6093U &= 220\sqrt{3} \\ 25.12X + 1.6Y + 0.08 \frac{dY}{dt} + 19.6093Z + 0.06245 \frac{dU}{dt} &= 0 \\ 0.06245 \frac{dX}{dt} - 19.6093sY + 1.566Z + 0.0539 \frac{dZ}{dt} - 16.9246sU - 0.06245 \frac{dV}{dt} + 19.6093sW &= 0 \\ 19.6093sX + 0.06245 \frac{dY}{dt} + 16.9246sZ + 1.566U + 0.0539 \frac{dU}{dt} - 19.6093sV - 0.06245 \frac{dW}{dt} &= 0 \\ 0.06245 \frac{dZ}{dt} + 19.6093(1-2s)U + 1.6V + 0.08 \frac{dV}{dt} + 25.12(1-2s)W &= 0 \\ 19.6093(2s-1)Z + 0.06245 \frac{dU}{dt} + 25.12(2s-1)V + 1.6W + 0.08 \frac{dW}{dt} &= 0 \\ 2(0.06245(YZ - XU) + 0.06245(UV - ZW)) + 16 + \boxed{J} \cdot 157 \frac{ds}{dt} &= 0 \end{aligned} \right. \quad (6.95)$$

$$\begin{aligned} X(0) &= 0 \\ Y(0) &= 0 \\ Z(0) &= 0 \\ U(0) &= 0 \\ V(0) &= 0 \\ W(0) &= 0 \\ s(0) &= 2 \end{aligned}$$

În urma soluționării sistemului de ecuații diferențiale, se obțin următoarele variații în timp ale mărimilor din model și din mașina reală:

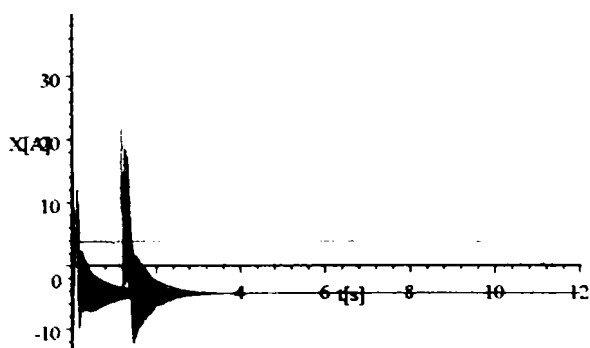


Fig.6.2.147. Variația în timp a lui  $I_d$ .

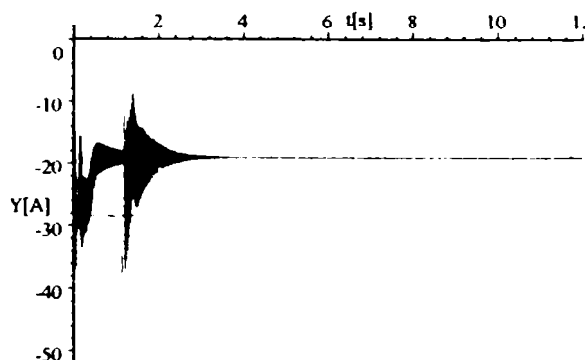


Fig.6.2.148. Variația în timp a lui  $I_q$ .

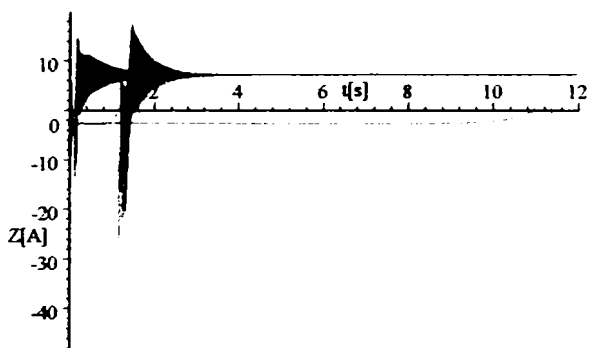


Fig.6.2.149. Variația în timp a lui  $I_{dr}$ .

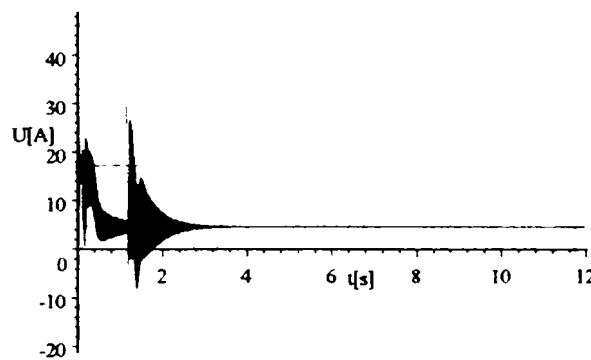


Fig.6.2.150. Variația în timp a lui  $I_{qr}$ .

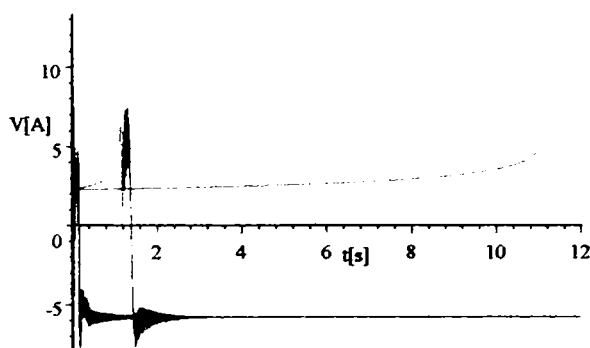


Fig.6.2.151. Variația în timp a lui  $I_{di}$ .

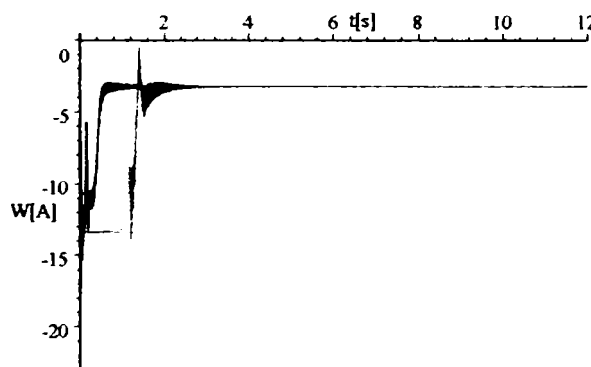


Fig.6.2.152. Variația în timp a lui  $I_{qi}$ .

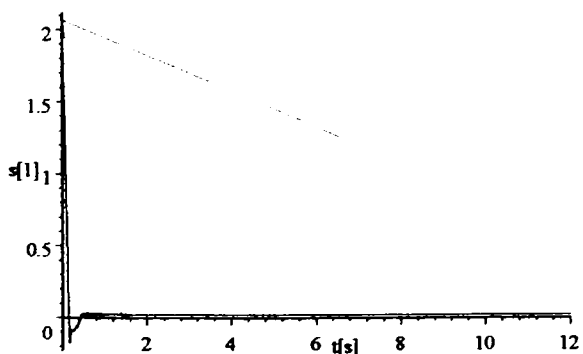


Fig.6.2.153. Variația în timp a lui  $s$ .

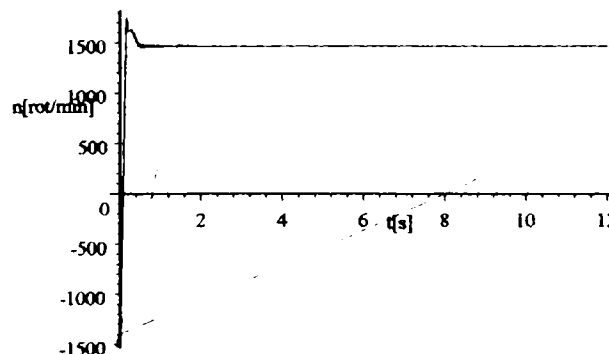


Fig.6.2.154. Variația lui  $n(t) = 1500(1 - s(t))$ .

Curenții de secvență directă respectiv de secvență inversă, în mașina reală sunt dați de relațiile[B4]:

$$I_{direct}(t) = I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos 314t - Y(t) \sin 314t) \quad (6.96)$$

$$I_{invers}(t) = J(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (V(t) \cos 314|2s(t) - 1|t - W(t) \sin 314|2s(t) - 1|t). \quad (6.97)$$



Fig. 6.2.155. Variația în timp a lui  $I_{direct}$ .

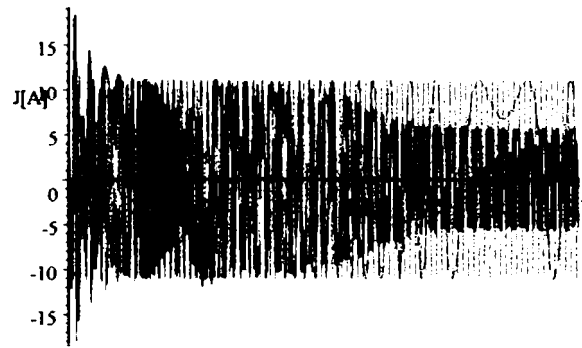


Fig. 6.2.156. Variația în timp a lui  $I_{invers}$ .

Cuplul electromagnetic de secvență directă respectiv de secvență inversă în mașina reală în procesul de reversare este:

$$M_{direct}(t) = T(t) = 2(0.0573(Y(t)Z(t) - X(t)U(t))) \quad (6.98)$$

$$M_{invers}(t) = F(t) = 2(0.0573(U(t)V(t) - Z(t)W(t))) \quad (6.99)$$

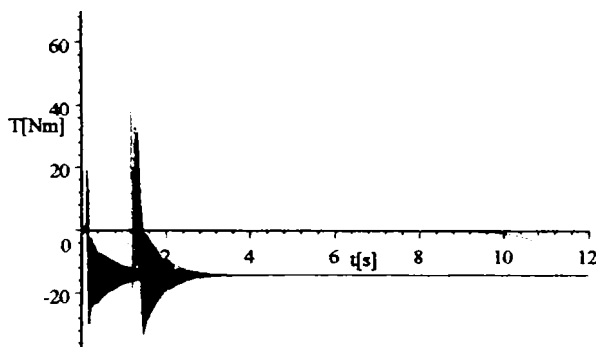


Fig. 6.2.157. Variația în timp a lui  $M_{direct}$ .

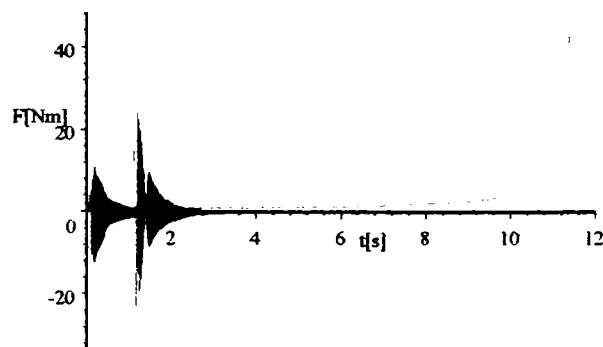


Fig. 6.2.158. Variația în timp a lui  $M_{invers}$ .

Curentul real rezultat respectiv cuplul electromagnetic rezultat în mașina reală în procesul de reversare al motorului sincron sunt:

$$I_{rez}(t) = H(t) = I(t) + J(t). \quad (6.100)$$

$$M_{elmag}(t) = M(t) = 2(0.0573(Y(t)Z(t) - X(t)U(t)) + 0.0573(U(t)V(t) - Z(t)W(t))) \quad (6.101)$$

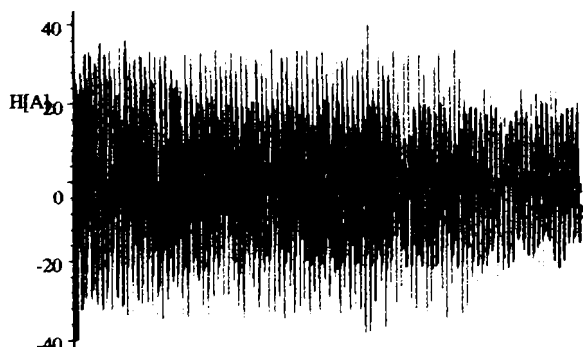


Fig. 6.2.159. Variația în timp a lui  $I_{rez}$ .

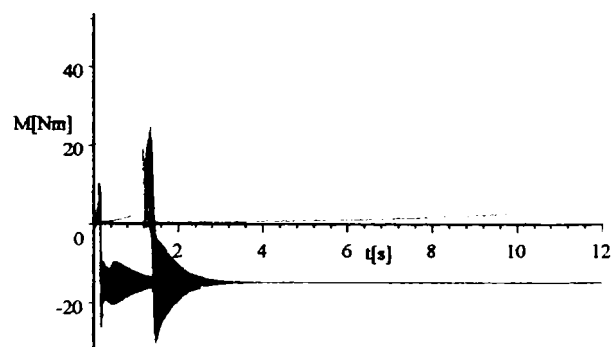


Fig. 6.2.160. Variația în timp a lui  $M_{elmag,rez}$ .

Procesul sincronizării la motorul sincron reversat (în asincron) cu  $J_1 = 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ , are loc la  $t = 3[\text{s}]$  (după ce s-a stabilizat procesul tranzitoriu de reversare) când:  $\theta = 0^\circ$ , respectiv:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_d(3) = -4.399832[\text{A}] \\ I_q(3) = -19.06922[\text{A}] \\ \omega(3) = 2\pi f = \frac{2\pi \cdot p_1 (1500(1-s(3)))}{60} \\ \omega(3) = 307.3372[\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] \\ s(3) = 0.02183769 \\ n(3) = 1467.427[\text{rot}/\text{min}] \end{array} \right. \quad (6.102)$$

Cu aceleași notații ca și la cazul precedent (a se vedea relațiile 6.91), sistemul de ecuații diferențiale pentru această situație este următorul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.6X + 0.08 \frac{dX}{dt} - 16.6682Z + 1.1 \frac{dU}{dt} + 0.055 \frac{dW}{dt} - 13.81079Q = 0 \\ 19.04937X + 1.6Z + 0.07 \frac{dZ}{dt} + 261.9288U + 13.09644W + 0.058 \frac{dQ}{dt} = 220\sqrt{3} \\ 1.1 \frac{dX}{dt} + 41.3U + 18.51 \frac{dU}{dt} + 0.62 \frac{dW}{dt} = 41.3 \\ 0.055 \frac{dX}{dt} + 0.62 \frac{dU}{dt} + 7.95W + 0.067 \frac{dW}{dt} = 0 \\ 0.058 \frac{dZ}{dt} + 30.22Q + 0.25 \frac{dQ}{dt} = 0 \\ 2(0.01XZ + 1.1ZU - 0.058XQ + 0.055ZW) - 16 - 0.5 \cdot 0.008663 \frac{d\omega}{dt} = 0 \end{array} \right. \quad (6.103)$$

$$\begin{array}{l} X(0) = -4.399832 \\ Z(0) = -19.06922 \\ W(0) = 0 \\ Q(0) = 0 \\ U(0) = 1 \\ \omega(0) = 307.3372 \end{array}$$

cu soluția următoare:

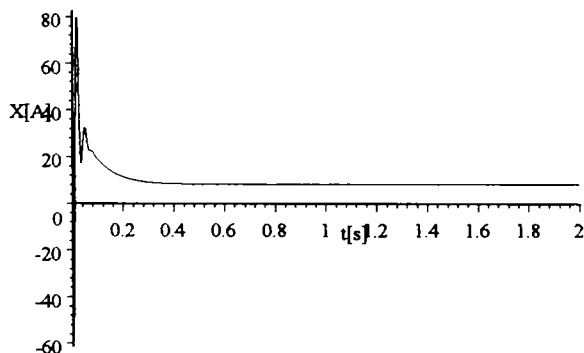


Fig.6.2.161. Variația în timp a lui  $I_d$ .

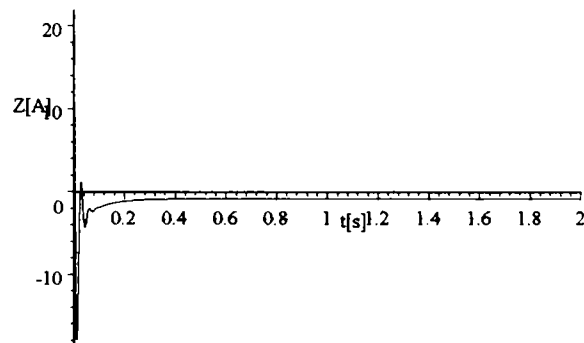


Fig.6.2.162. Variația în timp a lui  $I_q$ .

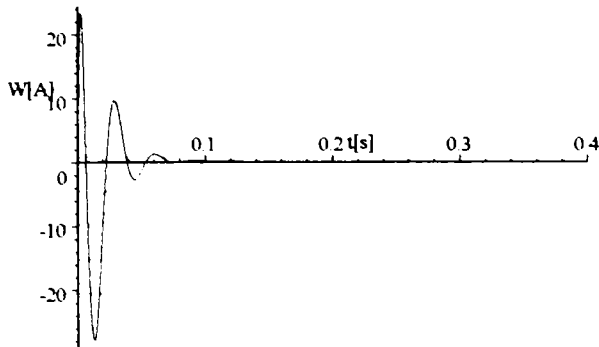


Fig.6.2.163. Variația în timp a lui  $I_D$ .

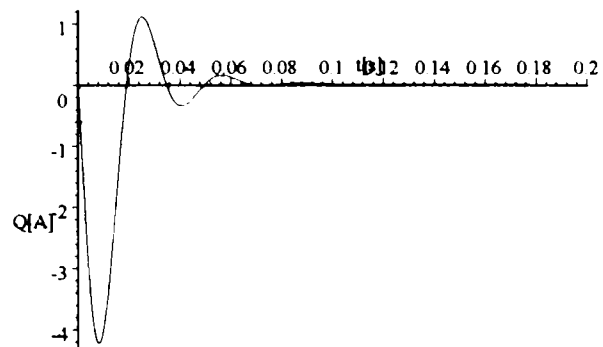


Fig.6.2.164. Variația în timp a lui  $I_Q$ .

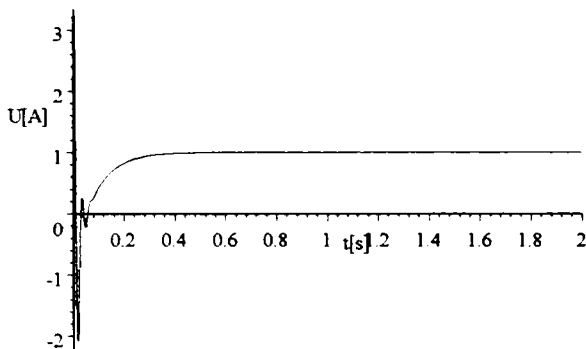


Fig.6.2.165. Variația în timp a lui  $I_E$ .

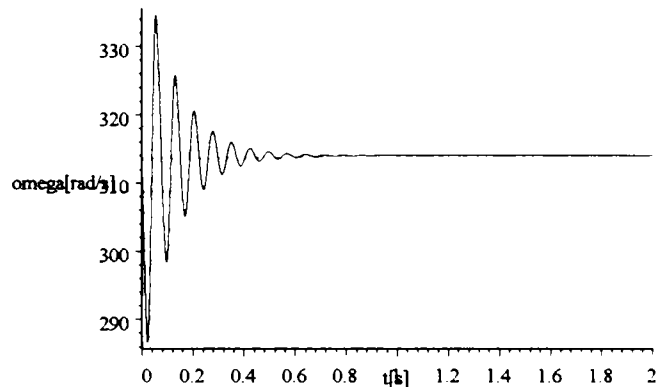


Fig.6.2.166. Variația în timp a lui  $\omega$ .

Curentul statoric respectiv cuplul electromagnetic în mașina reală sunt:

$$I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos 314t - Z(t) \sin 314t) \quad (6.104)$$

$$M_{el\text{mag}}(t) = M(t) = 2(0.01X(t)Z(t) + 1.1Z(t)U(t) - 0.058X(t)Q(t) + 0.055Z(t)W(t)) \quad (6.105)$$

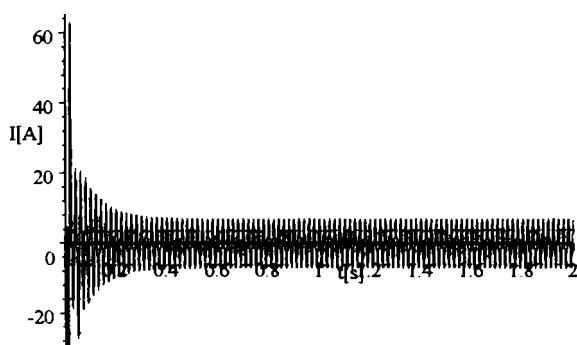


Fig.6.2.167. Variația în timp a lui  $I$ .

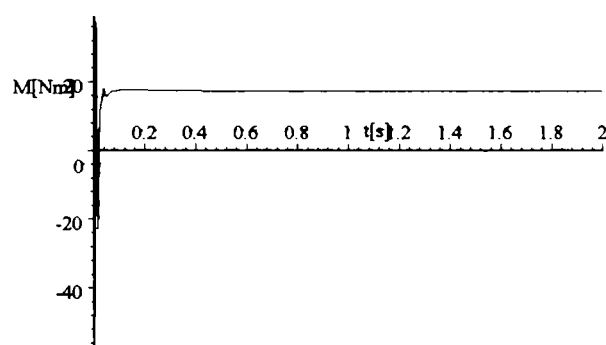


Fig.6.2.168. Variația în timp a lui  $M_{el\text{mag}}$ .

Din dorința de a sintetiza toate rezultatele studiului regimurilor tranzitorii prezentate în capitolul 6, și pentru a trage concluzii comparative și cât mai generale, concluziile și interpretările fenomenologice desprinse din evoluțiile în timp ale mărimilor ce caracterizează procesul tranzitoriu studiat în acest subparagraf sunt prezentate în paragraful 6.4 (la sfârșitul capitolului 6).

6.3.Funcționarea mașinii sincrone la tensiune și frecvență variabile

Funcționarea mașinii sincrone la tensiune și frecvență variabile a devenit posibilă odată cu evoluția electronicii de putere respectiv realizarea de convertoare statice care să permită modificarea în timp a valorii tensiunii de alimentare respectiv a valorii frecvenței acesteia.Ca urmare a acestor noi posibilități de alimentare a motoarelor din diverse acționări electrice, au rezultat sistemele de acționare electrică reglabile a căror utilizare(conducere și control) se poate face în cadrul unor anumite "strategii".

6.3.1.Strategii de conducere și control a mașinii sincrone

Funcționarea la frecvență variabilă și la flux controlat s-a dezvoltat la mașina sincronă(în lucrarea de față se consideră regimul de motor sincron) după patru direcții(sau strategii)[B4, B17]:

- funcționarea la frecvență variabilă și la flux *statoric* controlat,
- funcționarea la frecvență variabilă și la flux *în întrefier* controlat,
- funcționarea la frecvență variabilă și la flux *rotoric* controlat,
- funcționarea la frecvență variabilă și la flux *de excitație* controlat.

Dintre aceste patru direcții prezentate mai sus, prima și a treia sunt cele mai utilizate în prezent, datorită faptului că asigură cel mai riguros control al factorului de putere.Ca atare, în lucrarea de față se vor prezenta pe larg doar cele două arătate mai sus.

6.3.2.Modelarea și simularea funcționării motorului sincron la flux statoric controlat cu influența modificării momentului de inerție axial

Exprimarea fazorială a fluxului statoric este următoarea:

$$\underline{\Psi} = \Psi_d + j\Psi_q = L_d I_d + M_{Ed} I_E + jL_q I_q \tag{6.106}$$

Ecuția M.S. este:

$$\underline{U} = R_1 \underline{I} + j\omega \underline{\Psi}_s \tag{6.107}$$

iar cuplul electromagnetic se calculează cu următoarea relație:

$$M_{elmag} = p_1 \text{Im}(\underline{I}_s \underline{\Psi}_s^*) \tag{6.108}$$

sau

$$M_{elmag} = p_1 [I_d I_q (L_d - L_q) + M_{Ed} I_q I_E] = p_1 [I_{dmodel} I_{qmodel} (L_d - L_q) + M_{Ed} I_{qmodel} I_{Emodel}] \tag{6.109}$$

Diagrama fazorială a motorului sincron la  $\cos \varphi = 1$  (la  $R_1 \rightarrow 0$ ) este următoarea:

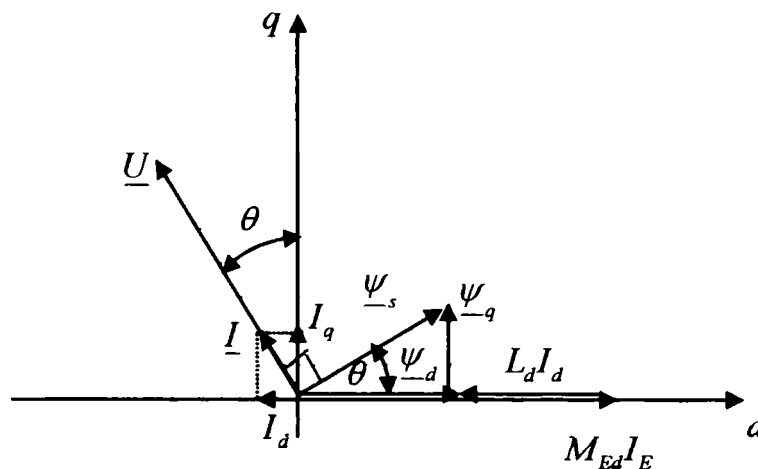


Fig.6.3.1.Explicativă la funcționarea cu  $\cos \varphi = 1$ .

Condiția de  $\cos \varphi = 1$  (la  $R_1 \rightarrow 0$ ), din diagrama vectorială, se scrie sub forma:

$$\tan \theta = \frac{|I_d|}{|I_q|} = \frac{L_q |I_q|}{M_{Ed} I_E - L_d |I_d|} = \frac{L_q I_q}{M_{Ed} I_E + L_d I_d} \tag{6.110}$$

La  $\cos \varphi = 1$ , legea de modificare a tensiunii cu turația rezultă din (6.107), ea fiind:

$$U = R_1 I + 2\pi f \Psi_s \quad (6.111)$$

unde

$$I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad (6.112)$$

Din (6.106), fluxul statoric se poate scrie:

$$\Psi_s^2 = (-L_d I_d + M_{Ed} I_E)^2 + L_q^2 I_q^2 \quad (6.113)$$

iar din (6.109), cuplul electromagnetic este:

$$M_{elmag} = p_1 [I_d I_q (L_d - L_q) + M_{Ed} I_q I_E] = p_1 \Psi_s I \quad (6.114)$$

deoarece la  $\cos \varphi = 1$ ,

$$M_{elmag} = p_1 \operatorname{Im}(j I_s \Psi_s) = p_1 I_{smodel} \Psi_{smodel} = 3p_1 I_{sreal} \Psi_{sreal} \quad (6.115)$$

Din relațiile (6.110, 6.113, 6.114) se pot determina valorile curenților  $I_d, I_q$  și  $I_E$ .

Din figura 6.3.1. se pot scrie relațiile:

$$I_q = I \cos \theta \quad (6.116)$$

$$L_q I_q = \Psi_s \sin \theta$$

rezultând

$$\tan \theta = \frac{L_q I}{\Psi_s} = \frac{L_q M_{elmag}}{p_1 \Psi_s^2} \quad (6.117)$$

ceea ce arată că la un cuplu dat, unghiul de sarcină  $\theta$  este cunoscut (dependența unghiului de sarcină de cuplul electromagnetic la un  $\Psi_s$  dat și controlat).

Tot din figura 6.3.1. se pot scrie relațiile:

$$I_d = -I \sin \theta \quad (6.118)$$

$$M_{Ed} I_E + L_d I_d = \Psi_s \cos \theta$$

de unde se poate determina  $I_E$  din model, de forma:

$$\begin{aligned} I_E &= \frac{\Psi_s \cos \theta - L_d I_d}{M_{Ed}} = \frac{\Psi_s \cos \theta}{M_{Ed}} + \frac{L_d}{M_{Ed}} \left[ \frac{M_{elmag}}{p_1 \Psi_s} \right] \sin \theta = \\ &= \frac{p_1^2 \Psi_s^4 + L_d L_q M_{elmag}^2}{p_1 \Psi_s M_{Ed} \sqrt{(p_1 \Psi_s^2)^2 + (L_q M_{elmag})^2}} \end{aligned} \quad (6.119)$$

care ne dă dependența curentului de excitație de cuplul electromagnetic.

La  $U = ct.$ , se obține caracteristica mecanică:

$$U = \omega \Psi_s + R_1 I = \omega \Psi_s + R_1 \frac{M_{elmag}}{p_1 \Psi_s} \quad (6.120)$$

de unde:

$$n = \frac{1}{2\pi p_1} \left[ \frac{U}{\Psi_s} - R_1 \frac{M_{elmag}}{p_1 \Psi_s^2} \right] \quad (6.121)$$

sau frecvența  $f$ :

$$f = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{U}{\Psi_s} - R_1 \frac{M_{elmag}}{p_1 \Psi_s^2} \right] \quad (6.122)$$

La modificarea cuplului electromagnetic, se modifică atât curentul de excitație cât și frecvența tensiunii de alimentare.



Pe baza relațiilor(6.110,6.112,6.113,6.114), la  $\cos \varphi = 1$ , se formează următorul sistem de ecuații:

$$\begin{cases} \frac{V_d}{V_q} = \frac{L_q I_q}{M_{Ed} I_E + L_d I_d} \\ \Psi_s^2 = (L_d I_d + M_{Ed} I_E)^2 + L_q^2 I_q^2 \text{ cu} \\ M_{elmag} = p_1 \Psi_s \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \end{cases} \begin{cases} I_d < 0 \\ I_q > 0 \\ I_E > 0 \end{cases} \quad (6.123)$$

în necunoscutele:  $I_d, I_q$  și  $I_E$  care definește la frecvența  $f$  tensiunea statorică  $U$ , de valoare:

$$U = R_1 I + 2\pi f \Psi_s \quad (6.124)$$

Frecvența maximă la  $M_{elmag}$  dat rezultă din relația:

$$f_{max} = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{U}{\Psi_{sminim}} - R_1 \frac{M_{elmag}}{p_1 \Psi_{sminim}^2} \right] \quad (6.125)$$

unde  $\Psi_{sminim}$  se obține din cuplu(relația 6.114):

$$\Psi_{sminim} = \frac{M_{elmag}}{p_1 I_N} \quad (6.126)$$

și este determinat de valoarea cuplului electromagnetic impusă de cuplul rezistent ( $M_{elmag} = M_{rez}$ ).

Tensiunea minimă la  $M_{elmag}$  dat se obține pentru  $n \rightarrow 0$  ( $f \rightarrow 0$ ), rezultă din relația(6.125) și are valoarea:

$$U_{minim} = \frac{R_1 M_{elmag}}{p_1 \Psi_{sN}} \quad (6.127)$$

Conform celor prezentate până acum, se poate prezenta schematic funcționarea unui sistem de acționare electrică cu motor sincron la flux statoric controlat(constant) la  $\cos \varphi = 1$  în următoarea schemă:

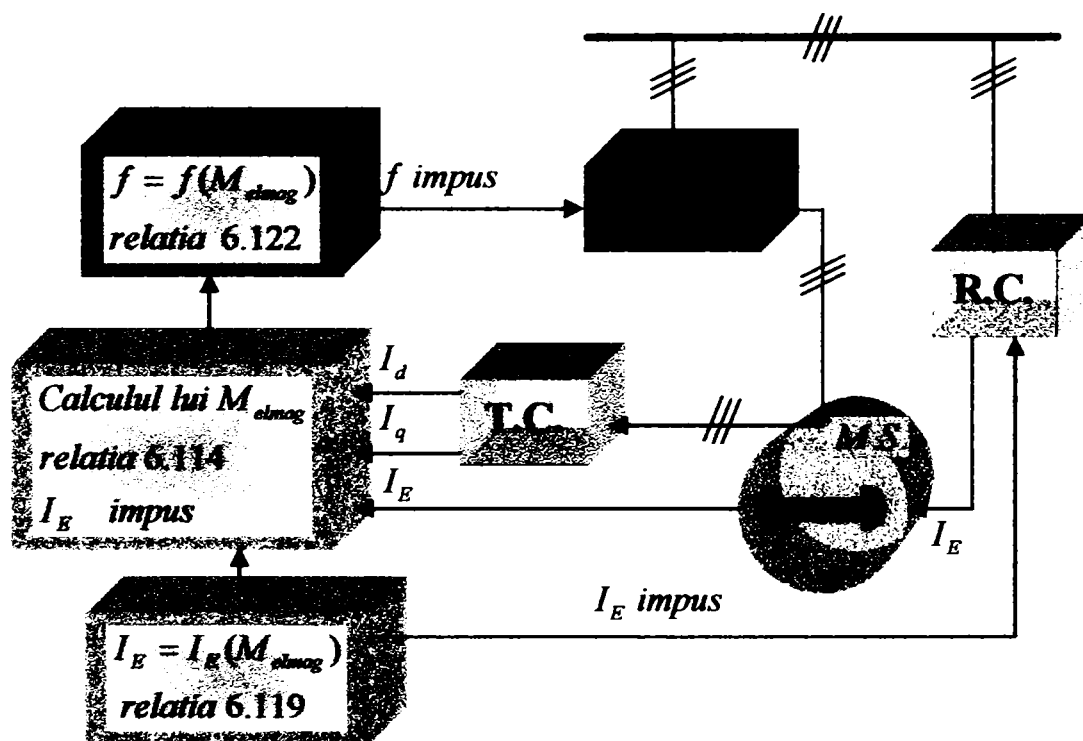


Fig.6.3.2. Sistemul de reglare automată pentru funcționarea la  $\Psi_s = ct$ .

unde:

C.S.F. - convertor static de frecvență;

T.C. - blocul transformării de sistem pentru curenți („ trifazat “ – „, d-q “);

R.C. - redresor comandat;

M.S.- motor sincron.

În această lucrare(pentru exemplificare), pentru mașina sincronă considerată, se prezintă funcționarea acesteia la frecvență variabilă și flux statoric controlat în situația unei încărcări bruște de sarcină de la 50% $M_N$  ( $\approx 8[Nm]$ ) la 100% $M_N$  ( $\approx 16[Nm]$ ).Pentru aceasta se prezintă sistemul automat de reglare în detaliu (care se bazează pe cel prezentat în figura 6.3.2) care conține: un regulator pe frecvența tensiunii statorice notat în schemă cu R respectiv un alt regulator pe tensiunea de excitație notat în schemă cu RUE.

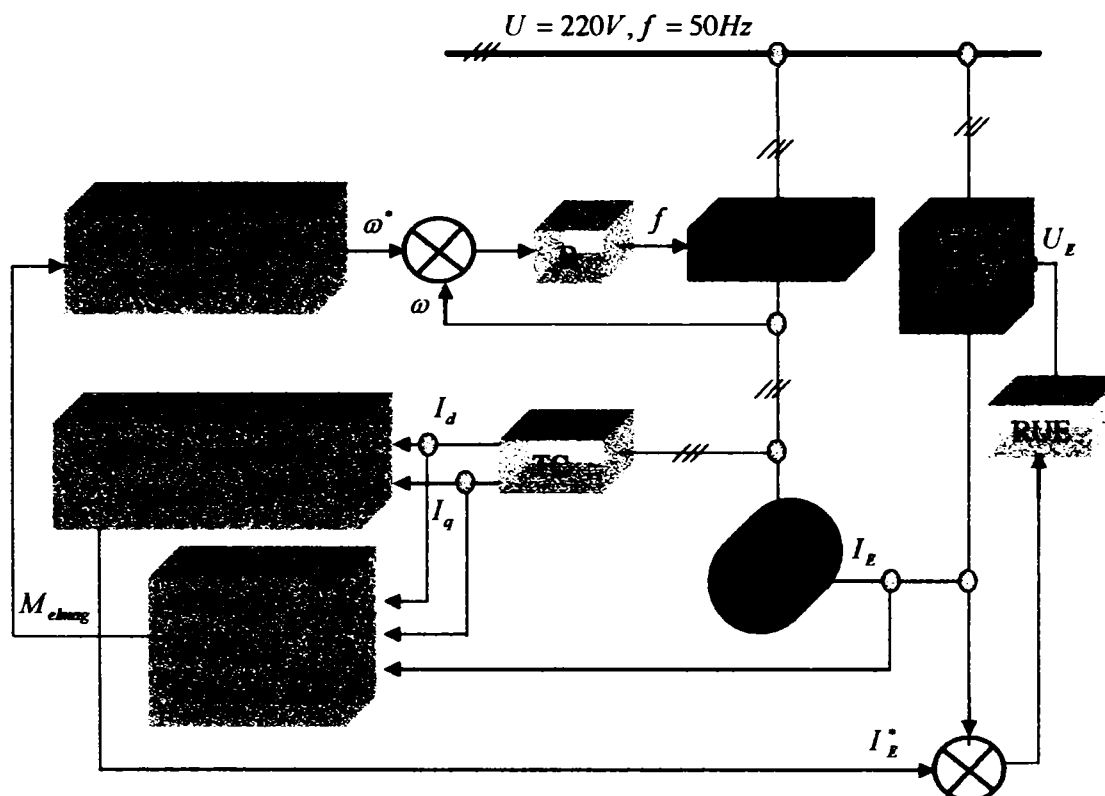


Fig.6.3.3.Sistemul de reglare automată detaliat pentru funcționarea la  $\Psi_s = ct$ .

Reglatoarele automate de tensiune și frecvență pot fi:

- reglatoare PI(proporțional-integrator), de ecuație:

$$KT_i \frac{dE_r}{dt} + KE_r = T_i \frac{da}{dt} \tag{6.128}$$

- reglatoare PID(proporțional-integrator-derivativ), de ecuație:

$$KT_D \frac{d^2E_r}{dt^2} + KT_i \frac{dE_r}{dt} + KE_r = T_i \frac{da}{dt} \tag{6.129}$$

unde:

$K$	-factorul de amplificare al regulatorului,	
$T_i$	-constanta de timp, de integrare a reglatoarelor PI și PID,	
$T_D$	-constanta de timp, de derivare a regulatorului PID,	
$E_r = \alpha^* - \alpha$	-eroarea mărimii de reglat,	
$\alpha^*$	-valoarea prescrisă,	
$\alpha$	-valoarea reglată.	(6.130)

Cele mai utilizate regulatoare automate în sistemele de acționare electrică cu mașini de curent alternativ sunt regulatoarele de tip PI a căror ecuație de ordinul I este simplă și în care, pentru situația de față au factorul de amplificare  $K \in [1 \div 100]$  iar constanta de timp (dat fiind faptul că pentru mașina sincronă considerată în această lucrare, procesele tranzitorii la încărcare bruscă fără regulatoare durează (funcție de valoarea momentului de inerție axial  $J$ ) cel mult  $20[s]$ ) este  $T_i \in [0.01 \div 20]$ .

Rolul regulatoarelor automate este acela de a regla mărimea respectivă intervenind la un moment de timp dictat de  $T_i$ . Pentru ca intervenția regulatorului să fie eficientă (în sensul limitării dacă este posibil a șocurilor care apar, ca amplitudine și durată), intervenția (răspunsul) acestuia trebuie să se facă într-un interval timp real, foarte scurt. Pe de altă parte însă, există situații când o intervenție foarte rapidă ( $T_i$  foarte mic) a regulatorului duce la amplificarea valorii și duratei șocurilor (proceselor tranzitorii), ceea ce este de nedorit.

Pentru aplicația considerată în lucrare (încărcare bruscă de sarcină de la  $50\%M_N (\approx 8[Nm])$  la  $100\%M_N (\approx 16[Nm])$ ) se consideră  $K = 10$ , respectiv pentru  $T_i$  se aleg trei valori din intervalul de mai sus, și anume:

$$\begin{aligned}
 T_{i1} = 0.01[s] & \quad \text{-corespunzător căreia evoluțiile în timp ale mărimilor} \\
 & \quad \text{vor fi reprezentate pe grafic prin culoarea } \mathbf{albastru}, \\
 T_{i2} = 0.1[s] & \quad \text{-corespunzător căreia evoluțiile în timp ale mărimilor} \\
 & \quad \text{vor fi reprezentate pe grafic prin culoarea } \mathbf{portacaliu}, \\
 T_{i3} = 1[s] & \quad \text{-corespunzător căreia evoluțiile în timp ale mărimilor} \\
 & \quad \text{vor fi reprezentate pe grafic prin culoarea } \mathbf{galben}.
 \end{aligned}
 \tag{6.131}$$

În vederea simplificării scrierii, se fac următoarele notații:

<u>Mărime</u>	<u>Notăție</u>	<u>Semnificație</u>
$I_d(t)$	$= X(t)$	- curentul prin înfășurarea statorică din axa d,
$U_E(t)$	$= Y(t)$	- tensiunea pe înfășurarea de excitație,
$I_q(t)$	$= Z(t)$	- curentul prin înfășurarea statorică din axa q,
$I_D(t)$	$= W(t)$	- curentul prin înfășurarea de amortizare din axa d,
$I_Q(t)$	$= Q(t)$	- curentul prin înfășurarea de amortizare din axa q,
$I_E(t)$	$= U(t)$	- curentul prin înfășurarea de excitație,
$U_b(t)$	$= V(t)$	- tensiunea pe înfășurarea statorică,
$\omega(t)$	$= \omega(t), \text{omega}(t)$	- pulsația electrică (sau viteza unghiulară),
$s(t)$	$= \Omega(t), (\omega_m(t))$	- viteza unghiulară mecanică,
$\theta(t)$	$= \theta(t), \text{teta}(t)$	- unghiul de sarcină,
$I(t)$	$= I(t)$	- curentul în mașina reală,
$M_{elmag}$	$= M(t)$	- cuplul electromagnetic.

Din relațiile (6.110,6.113,6.114), pe baza notațiilor făcute mai sus(6.132), pentru un flux statoric nominal impus  $\Psi_{sN} = 0.7[Wb]$  ( $\Psi_{sNmodel} = 0.7\sqrt{3}[Wb]$ ) și pentru un cuplu electromagnetic de  $50\%M_N (\approx 8[Nm])$ , se poate forma următorul sistem de ecuații:

$$\begin{cases} -\frac{X}{Z} = \frac{0.07Z}{U+0.08X} \\ 1.47 = (0.08X + U)^2 + (0.07Z)^2 \\ 8 = 2(0.01XZ + ZU) \end{cases} \quad (6.133)$$

cu soluția:

<u>mașina model</u>	<u>mașina reală</u>	
$X_{\text{model}} = -0.6173099[A]$	$X = -0.6173099/\sqrt{3}[A]$	(6.134)
$Z_{\text{model}} = 3.240877[A]$	$Z = 3.240877/\sqrt{3}[A]$	
$U_{\text{model}} = 1.240407[A]$	$U = 1.240407/\sqrt{3}[A]$	

Din relația (6.119) se obține numeric  $I_E = 1.2404[A]$  la  $M_{el\text{mag.}} = 8[Nm]$ .  
Curentul în mașina reală este:

$$I = \sqrt{X^2 + Z^2} = \sqrt{\left(\frac{-0.6173099}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{3.240877}{\sqrt{3}}\right)^2} = 1.904762[A] < I_N = 4.5[A] \quad (6.135)$$

Tensiunea la bornele mașinii reale, la turația nominală de  $25[rot/s]$  ( $1500[rot/min]$ ) și frecvența  $f = p_1 \cdot n = 50[Hz]$ , are valoarea:

$$U = IR_1 + \omega\Psi_s = 1.6 \cdot 3.299144 + 314 \cdot 0.7 = 225.0786[V] \quad (6.136)$$

Corespunzător punctului de funcționare la  $50\%M_N$  ( $\approx 8[Nm]$ ), sistemul de ecuații ce definește regimul staționar în acest punct este următorul:

$$\begin{cases} 1.6X - 0.07\omega Z = -220\sqrt{3} \sin\theta \\ 0.08\omega X + 1.6Z + 1.1\omega U = 220\sqrt{3} \cos\theta \\ 41.3U = Y \\ 2(0.01XZ + 1.1ZU) = 8 \\ \tan\theta = \frac{0.07 \cdot 8}{2 \cdot 1.47} \\ \omega = 314 \end{cases} \quad (6.137)$$

cu soluția:

$$\begin{aligned} X &= -0.6173099[A]; Z = 3.240877[A]; U = 1.240407[A]; \\ Y &= 51.22852[V]; \theta = 0.1882215[rad] \end{aligned} \quad (6.138)$$

care constituie condițiile inițiale ale sistemului de ecuații diferențiale ce modelează încărcarea motorului la flux statoric controlat.

Prin mărirea cuplului rezistent la arbore la  $100\%M_N$  ( $\approx 16[Nm]$ ), curenții  $I_d$ ,  $I_q$  și  $I_E$  se vor modifica, respectând în regim staționar relațiile din următorul sistem de ecuații:

$$\begin{cases} -\frac{X}{Z} = \frac{0.07Z}{U+0.08X} \\ 1.47 = (0.08X + U)^2 + (0.07Z)^2 \\ 16 = 2(0.01XZ + ZU) \end{cases} \quad (6.139)$$

cu soluția:

$$\begin{array}{ll}
 \text{mașina model} & \text{mașina reală} \\
 X_{\text{model}} = -3.825904[A] & X = -3.825904/\sqrt{3}[A] \\
 Z_{\text{model}} = 5.659013[A] & Z = 5.659013/\sqrt{3}[A] \\
 U_{\text{model}} = 1.320923[A] & U = 1.320923/\sqrt{3}[A]
 \end{array} \quad (6.140)$$

și din

$$\tan \theta = \frac{0.07 \cdot 16}{2 \cdot 1.47} = 0.3809524 \quad (6.141)$$

rezultă:

$$\theta = 0.343979[\text{rad}] \quad (6.142)$$

Curentul în mașina reală este:

$$I = \sqrt{X^2 + Z^2} = \sqrt{\left(\frac{-3.825904}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{5.659013}{\sqrt{3}}\right)^2} = 3.943855[A] \quad (6.143)$$

Cunoscând cuplul rezistent, la tensiune la borne și flux statoric date, din relația (6.119) rezultă curentul de excitație:

$$I_E = \frac{p_1^2 \Psi_s^4 + L_d L_q M_{elmag}^2}{p_1 \Psi_s M_{Ed} \sqrt{(p_1 \Psi_s^2)^2 + (L_q M_{elmag})^2}} = 1.32[A] \quad (6.144)$$

Frecvența tensiunii de alimentare rezultă din relația (6.122), astfel:

$$f = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{U}{\Psi_s} - R_1 \frac{M_{elmag}}{p_1 \Psi_s^2} \right] = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{225.0786\sqrt{3}}{0.7\sqrt{3}} - 1.6 \frac{16}{2 \cdot 3 \cdot 0.7^2} \right] = 49.7[\text{Hz}] \quad (6.145)$$

Corespunzător punctului de funcționare la 100%  $M_N$  ( $\approx 16[Nm]$ ), sistemul de ecuații ce definește regimul staționar în acest punct este următorul:

$$\begin{cases}
 1.6X - 0.07\omega Z = -135.6525 \\
 0.08\omega X + 1.6Z + 1.1\omega U = 356.0877 \\
 2(0.01XZ + 1.1ZU) = 16 \\
 \omega = 312.8335
 \end{cases} \quad (6.146)$$

cu soluția:

$$X = -3.825904[A]; Z = 5.659013[A]; U = 1.320923[A]; \quad (6.147)$$

Sistemul de ecuații diferențiale la flux statoric controlat, cu reglatoare PI pe frecvența tensiunii statorice și pe tensiunea de excitație, în condițiile în care factorul de amplificare al reglatoarelor este  $K = 10$  iar constanta de timp a reglatoarelor  $T_i = 0.1[s]$ , este următorul (a se vedea figura 6.3.3 și relația 6.128):

$$\begin{aligned}
 1.6X + 0.08 \frac{dX}{dt} - 0.07\omega Z + 1.1 \frac{dU}{dt} + 0.055 \frac{dW}{dt} - 0.058\omega Q &= -225.0786\sqrt{3} \sin \theta \\
 0.08\omega X + 1.6Z + 0.07 \frac{dZ}{dt} + 1.1\omega U + 0.055\omega W + 0.058 \frac{dQ}{dt} &= 225.0786\sqrt{3} \cos \theta \\
 1.1 \frac{dX}{dt} + 41.3U + 18.51 \frac{dU}{dt} + 0.62 \frac{dW}{dt} &= Y \\
 0.055 \frac{dX}{dt} + 0.62 \frac{dU}{dt} + 7.95W + 0.067 \frac{dW}{dt} &= 0 \\
 0.058 \frac{dZ}{dt} + 30.22Q + 0.25 \frac{dQ}{dt} &= 0 \\
 2(0.01XZ + 1.1ZU - 0.058XQ + 0.055ZW) - 16 - \boxed{J} \frac{ds}{dt} &= 0 \\
 \frac{ds}{dt} + s - \omega &= 0 \\
 -\frac{d\omega}{dt} - 10(\omega - 312.8335) - 0.1 \frac{d\omega}{dt} &= 0 \\
 -\frac{dY}{dt} - 10(Y - 54.516) - 0.1 \frac{dY}{dt} &= 0
 \end{aligned} \tag{6.148}$$

$$\begin{aligned}
 X(0) &= -0.6173099 \\
 Y(0) &= 51.22852 \\
 Z(0) &= 3.240877 \\
 U(0) &= 1.240407 \\
 W(0) &= 0 \\
 Q(0) &= 0 \\
 \omega(0) &= 314 \\
 s(0) &= 157 \\
 \theta(0) &= 0.1882215
 \end{aligned}$$

În urma soluționării sistemului de ecuații diferențiale (6.148) cu programul Mathematica, rezultă următoarele evoluții în timp ale mărimilor din mașina model și din mașina reală:

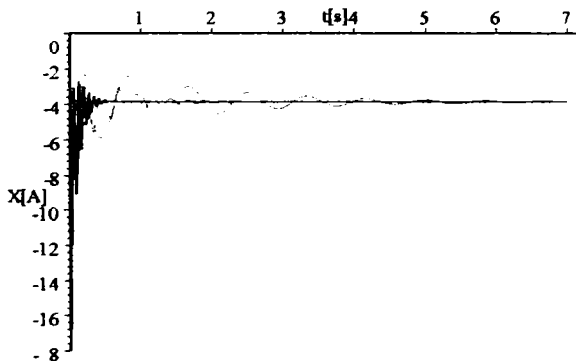


Fig.6.3.4. Variația în timp a lui  $I_d$ .

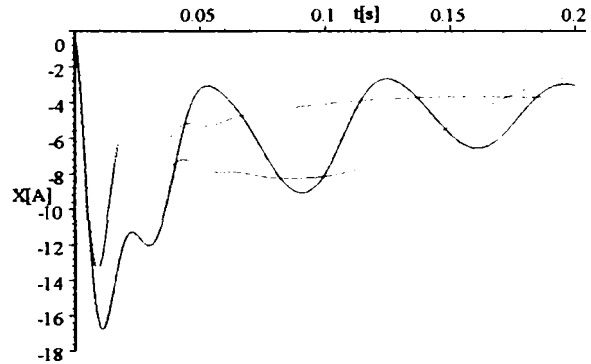


Fig.6.3.4'. Variația în timp a lui  $I_d$  (detaliu).

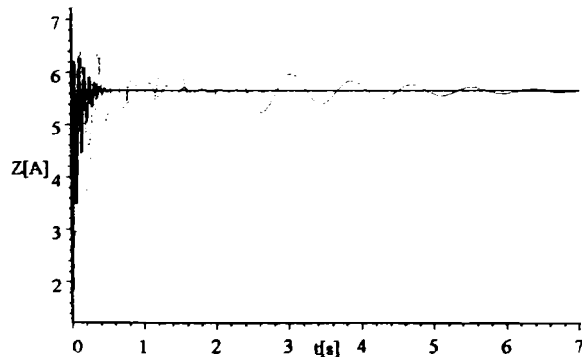


Fig.6.3.5. Variația în timp a lui  $I_q$ .

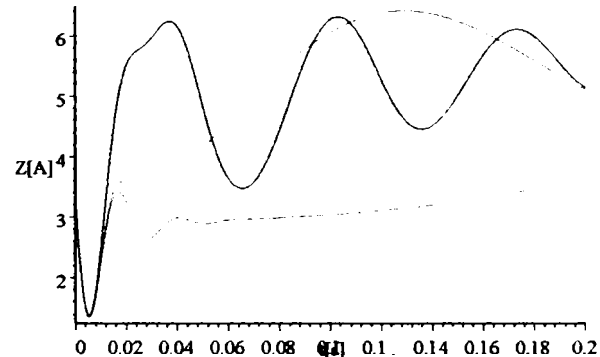


Fig.6.3.5'. Variația în timp a lui  $I_q$  (detaliu).

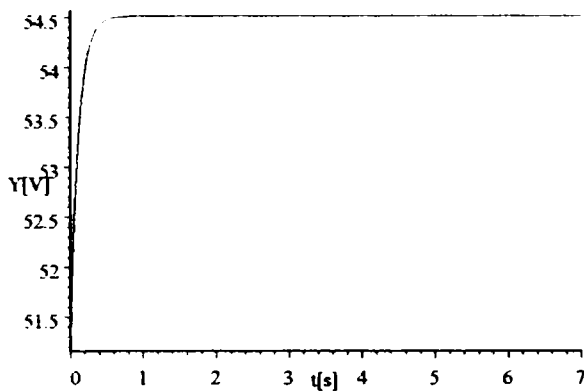


Fig.6.3.6. Variația în timp a lui  $U_E$ .

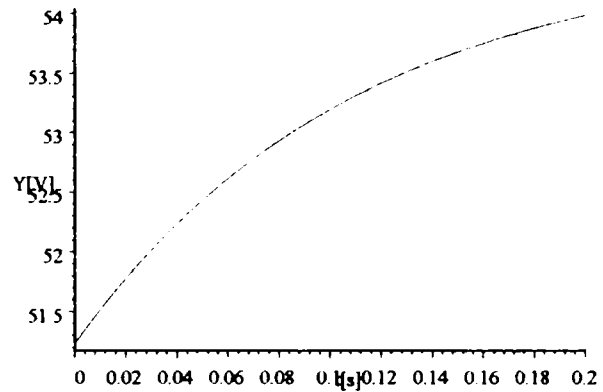


Fig.6.3.6'. Variația în timp a lui  $U_E$ (detaliu).

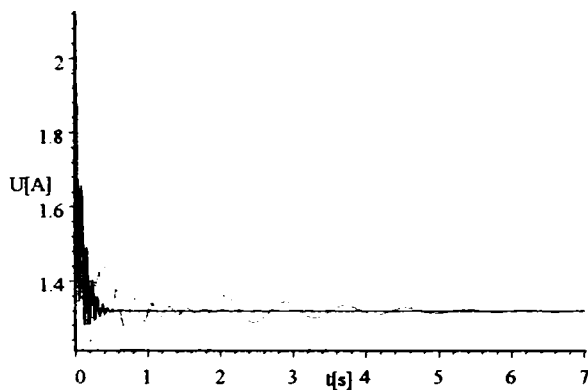


Fig.6.3.7. Variația în timp a lui  $I_E$ .

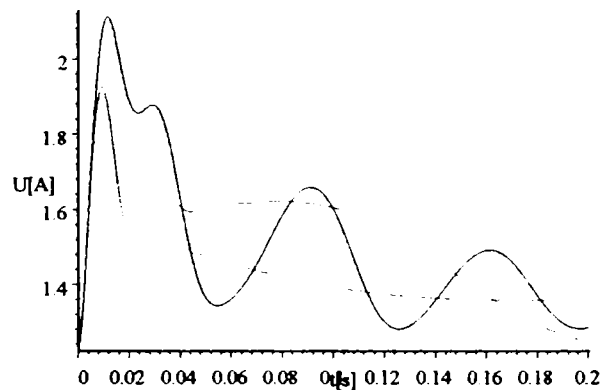


Fig.6.3.7'. Variația în timp a lui  $I_E$ (detaliu).

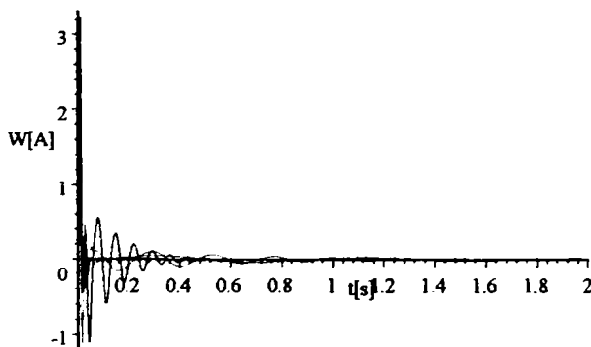


Fig.6.3.8. Variația în timp a lui  $I_D$ .

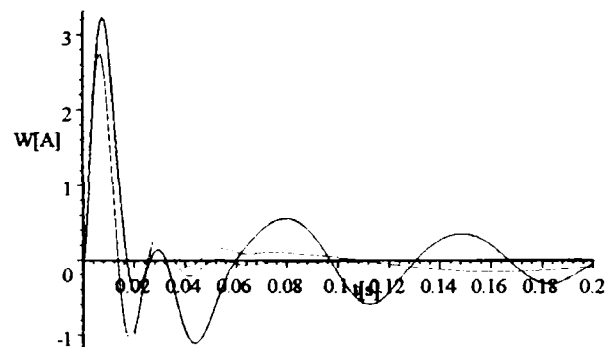


Fig.6.3.8'. Variația în timp a lui  $I_D$ (detaliu).

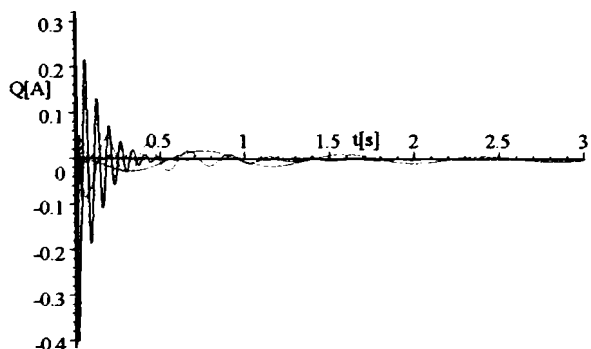


Fig.6.3.9. Variația în timp a lui  $I_Q$ .

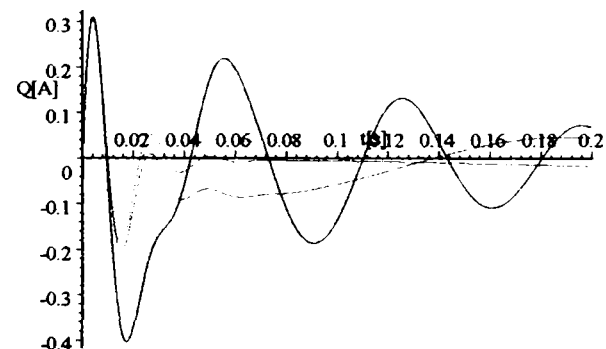


Fig.6.3.9'. Variația în timp a lui  $I_Q$ (detaliu).

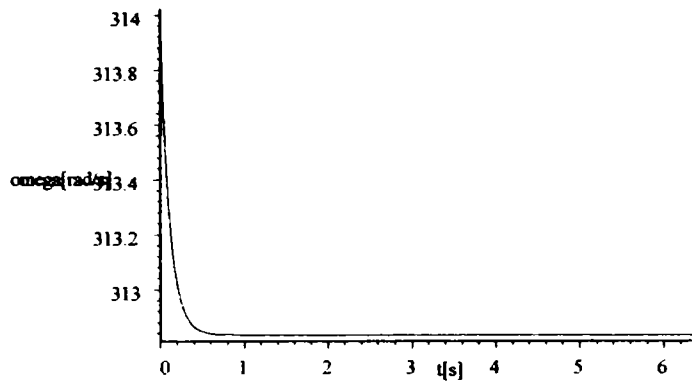


Fig. 6.3.10. Variația în timp a lui  $\omega$ .

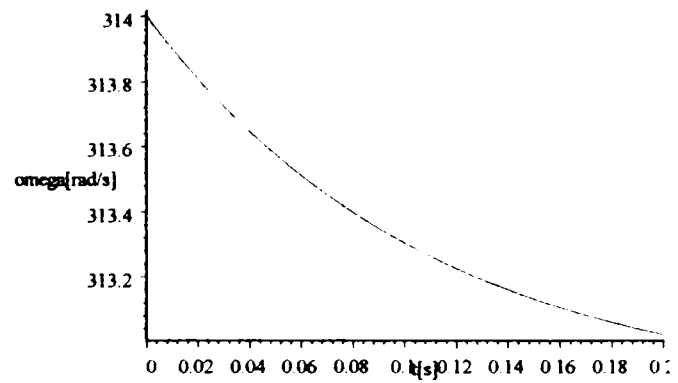


Fig. 6.3.10'. Variația în timp a lui  $\omega$  (detaliu).

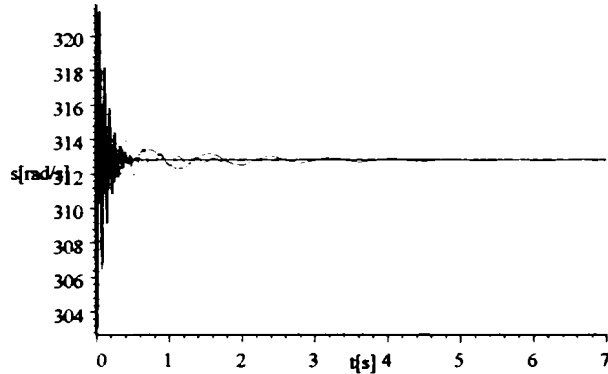


Fig. 6.3.11. Variația în timp a lui  $2\Omega$ .

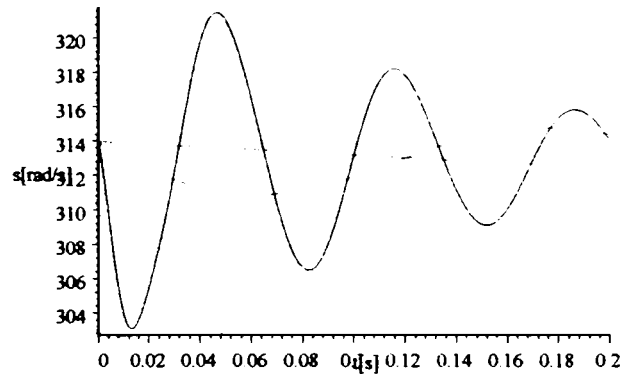


Fig. 6.3.11'. Variația în timp a lui  $2\Omega$  (detaliu).

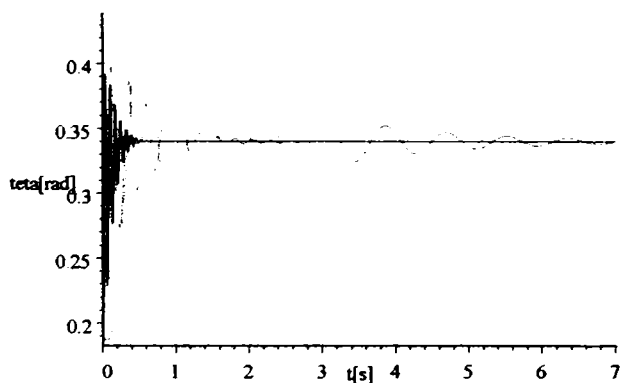


Fig. 6.3.12. Variația în timp a lui  $\theta$ .

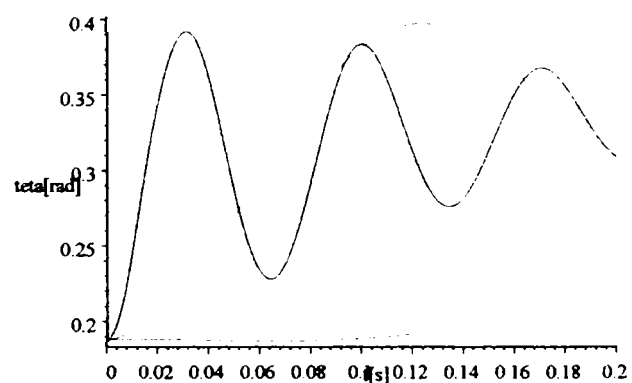


Fig. 6.3.12'. Variația în timp a lui  $\theta$  (detaliu).

Curentul statoric respectiv cuplul electromagnetic în mașina reală sunt[B4]:

$$I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos(\omega(t) \cdot t) - Z(t) \sin(\omega(t) \cdot t)) \quad (6.149)$$

$$M_{el\text{mag}}(t) = M(t) = 2(0.01X(t)Z(t) + 1.1Z(t)U(t) - 0.058X(t)Q(t) + 0.055Z(t)W(t)) \quad (6.150)$$



Fig. 6.3.13. Variația în timp a lui  $I$ .

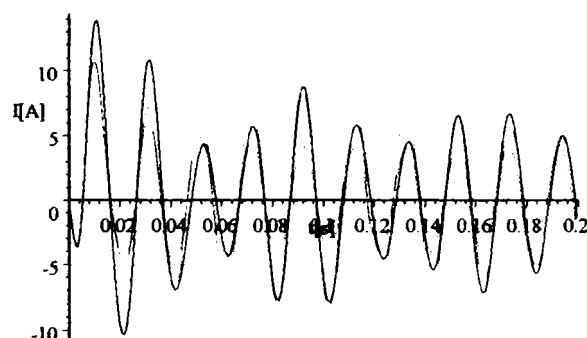


Fig. 6.3.13'. Variația în timp a lui  $I$  (detaliu).



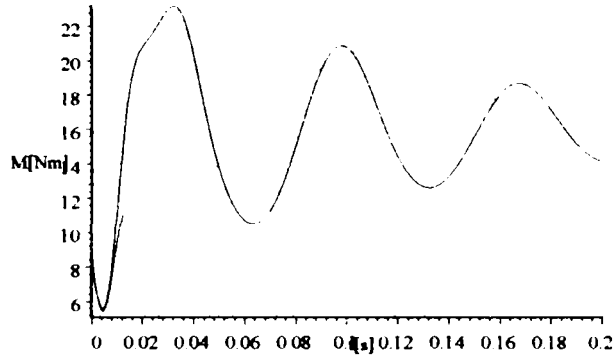
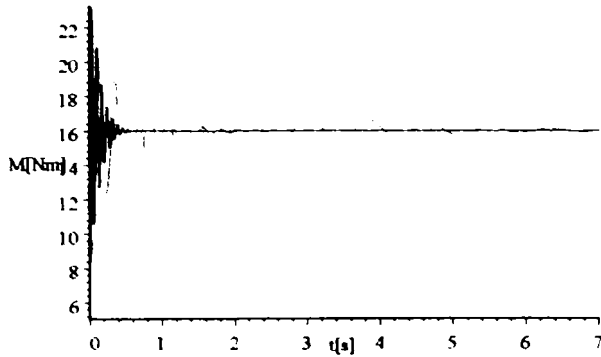


Fig. 6.3.14. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$ . Fig. 6.3.14'. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$  (detaliu).

Concluziile și interpretările fenomenologice desprinse din evoluțiile în timp ale mărimilor ce caracterizează procesul tranzitoriu studiat în acest subparagraf sunt prezentate în paragraful 6.4 (la sfârșitul capitolului 6).

6.3.3. Modelarea și simularea funcționării motorului sincron la flux rotoric controlat cu influența modificării momentului de inerție axial

Din ecuația matricială a mașinii sincrone (pentru regimul de motor), în regim permanent se scrie:

$$\begin{cases} U_d = R_1 I_d - \omega L_q I_q \\ U_q = R_1 I_q + \omega L_d I_d + \omega M_E I_E \end{cases} \quad (6.151)$$

unde [B1],

$$M_E = M_{Ed} = M_{Eq} \quad (6.152)$$

Din (6.151), prin ridicare la pătrat și adunare, rezultă:

$$\begin{aligned} U^2 &= U_d^2 + U_q^2 = \\ &= I_q^2 [R_1^2 + (\omega L_q)^2] - 2I_q [\omega R_1 L_q I_d - \omega R_1 (M_E I_E + L_d I_d)] + \omega^2 (M_E I_E + L_d I_d)^2 + (R_1 I_d)^2 \end{aligned} \quad (6.153)$$

de unde

$$\begin{aligned} I_q &= \frac{\omega R_1 [L_q I_d - (M_E I_E + L_d I_d)]}{R_1^2 + (\omega L_q)^2} + \\ &+ \frac{\sqrt{U^2 [R_1^2 + (\omega L_q)^2] - \omega^4 L_q^2 (M_E I_E + L_d I_d)^2 - 2\omega^2 R_1^2 L_q I_d (M_E I_E + L_d I_d) - (R_1 I_d)^2}}{R_1^2 + (\omega L_q)^2} \end{aligned} \quad (6.154)$$

sau la  $R_1 \rightarrow 0$  se obține o expresie mai simplă:

$$I_q = \frac{1}{L_q} \sqrt{\left(\frac{U}{\omega}\right)^2 - (M_E I_E + L_d I_d)^2} \quad (6.155)$$

Factorul de putere se calculează din următoarea diagramă fazorială:

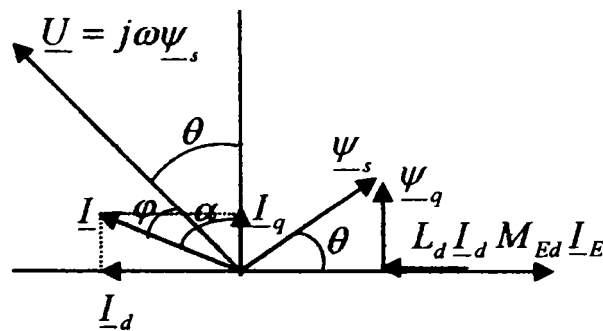


Fig. 6.3.15. Diagrama fazorială a MS la  $R_1 \rightarrow 0$ .

$$\varphi = \alpha - \theta \quad (6.156)$$

sau

$$\cos \varphi = \cos \alpha \cos \theta + \sin \alpha \sin \theta = \frac{I_q(M_E I_E + L_d I_d) - L_q I_d I_q}{I \Psi_s} \quad (6.157)$$

deoarece

$$\sin \alpha = -\frac{I_d}{I} \text{ la } I_d < 0 \quad (6.158)$$

obținându-se:

$$\cos \varphi = \frac{I_q(M_E I_E + L_d I_d - L_q I_d)}{I \Psi_s} \quad (6.159)$$

unde

$$\Psi_s = \sqrt{(M_E I_E + L_d I_d)^2 + (L_q I_q)^2} \quad (6.160)$$

Condiția de  $\cos \varphi = 1$  (din diagrama fazorială prezentată în figura 6.3.15) se poate scrie sub forma:

$$-\frac{I_d}{I_q} = \frac{L_q I_q}{M_E I_E + L_d I_d} \text{ pentru } I_d < 0 \quad (6.161)$$

Pentru  $I_q = 0$  se obține  $M_{elmag} = 0$  și rezultă turația de gol:

$$n_0 = \frac{1}{2\pi p_1} \cdot \frac{U}{M_E I_E + L_d I_d} \quad (6.162)$$

Cuplul electromagnetic al mașinii sincrone este dat de relația(6.163):

$$M_{elmag} = p_1 [I_d I_q (L_d - L_q) + M_E I_q I_E] \quad (6.163)$$

care, prin înlocuirea lui  $I_q$  devine:

$$M_{elmag} = \frac{p_1}{L_q} [I_d (L_d - L_q) + M_E I_E] \cdot \sqrt{\left(\frac{U}{\omega}\right)^2 - (M_E I_E + L_d I_d)^2} \quad (6.164)$$

de unde rezultă:

$$\frac{U}{\omega} = \sqrt{(M_E I_E + L_d I_d)^2 + \left(\frac{M_{elmag} L_q}{p_1 [I_d (L_d - L_q) + M_E I_E]}\right)^2} \quad (6.165)$$

respectiv:

$$n = \frac{1}{2\pi p_1} \cdot \frac{U}{\sqrt{(M_E I_E + L_d I_d)^2 + \left(\frac{M_{elmag} L_q}{p_1 [I_d (L_d - L_q) + M_E I_E]}\right)^2}} \quad (6.166)$$

sau frecvența

$$f = p_1 \cdot n = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{U}{\sqrt{(M_E I_E + L_d I_d)^2 + \left(\frac{M_{elmag} L_q}{p_1 [I_d (L_d - L_q) + M_E I_E]}\right)^2}} \quad (6.167)$$

Relația (6.166) reprezintă caracteristica mecanică ( $n = f(M_{elmag})$ ) a mașinii sincrone, dependentă de parametri: tensiunea  $U$  și curentul  $I_d$  (care se alege inițial având în vedere sistemul de acționare), iar relația (6.165) dă dependența:  $\frac{U}{\omega} = f(M_{elmag})$ .

Funcționarea la flux rotor controlat ( $M_E I_E = \text{constant}$ , adică  $I_E = \text{constant}$ ), ceea ce este echivalent situației când mașina sincronă este cu magnet permanent (un caz particular de funcționare al mașinii sincrone "clasice" - cu înfășurare de excitație în curent continuu), se realizează cu un sistem de reglare automată (SRA) de următoarea structură:

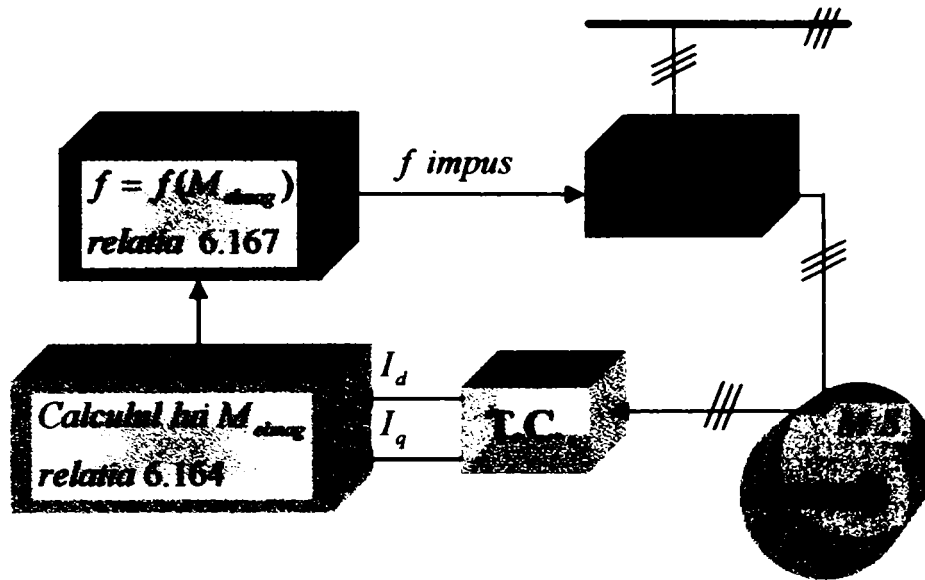


Fig.6.3.16. Sistemul de reglare automată pentru funcționarea la  $\Psi_r = ct$ .

Ca și în paragraful anterior, se prezintă funcționarea motorului sincron considerat în lucrare, la frecvență variabilă și flux rotoric controlat în situația unei încărcări bruște de sarcină de la  $50\%M_N$  ( $\approx 8[Nm]$ ) la  $100\%M_N$  ( $\approx 16[Nm]$ ). Pentru aceasta se prezintă sistemul automat de reglare în detaliu (care se bazează pe cel prezentat în figura 6.3.16) care conține un regulator pe frecvența tensiunii statorice notat în schemă cu R.

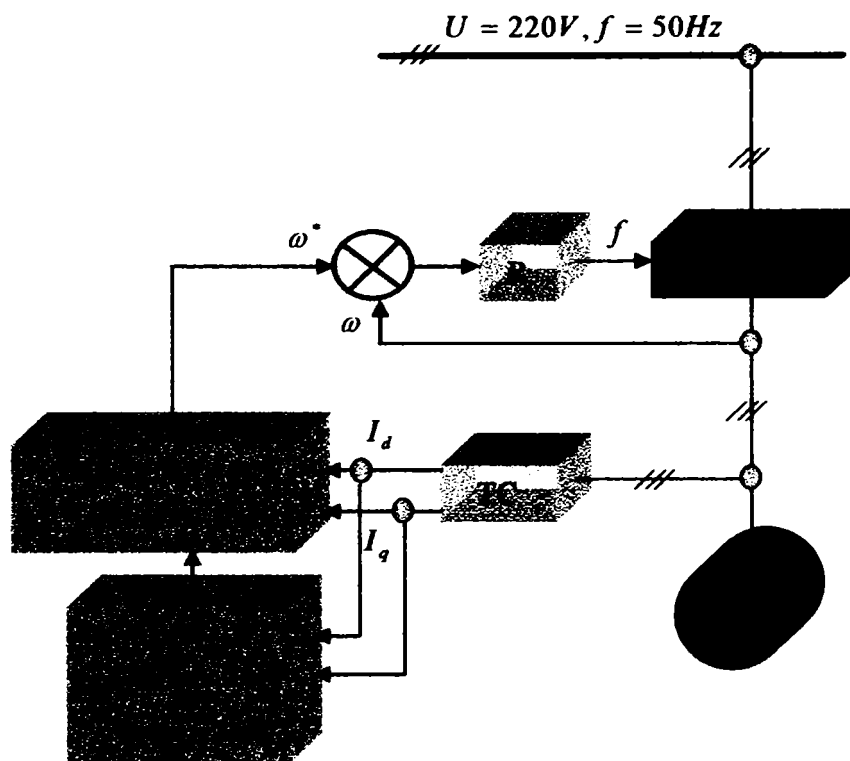


Fig.6.3.17. Sistemul de reglare automată detaliat pentru funcționarea la  $\Psi_r = ct$ .

Elementele din scheme au aceeași semnificație ca și în paragraful precedent.

În punctul inițial de funcționare corespunzător unei încărcări de  $50\%M_N$  ( $\approx 8[Nm]$ ), caracteristicile mecanice se obțin la  $U$  și  $I_d$  ca și parametrii, de exemplu:

$$U = U_N = 220[V](220\sqrt{3} [V] - \text{în mașina model})$$

$$I_d = -1[A](-\sqrt{3} [V] - \text{în mașina model})$$

$$(6.168)$$

Curentul de excitație în mașina model este  $I_{E\text{model}} = 1[A]$ , rezultând:

$$M_{Ed} \cdot I_E = M_E \cdot I_E = 1.1 \cdot 1 = 1.1 [Wb] \quad (6.169)$$

Turația motorului sincron(6.166) este:

$$n = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{220\sqrt{3}}{\sqrt{(1.1 - 0.08 \cdot \sqrt{3})^2 + \left(\frac{8 \cdot 0.07}{2(-0.01 \cdot \sqrt{3} + 1.1)}\right)^2}} = 30.45676 [\text{rot/s}] = 1827.406 [\text{rot/min}] \quad (6.170)$$

iar frecvența tensiunii  $f$  este:

$$f = p_1 \cdot n = 2 \cdot 30.45676 = 60.91352 [\text{Hz}] \quad (6.171)$$

Din valoarea cuplului electromagnetic(6.163) se calculează curentul  $I_q$  de valoare:

$$I_q = \frac{M_{el\text{mag}}}{p_1[(L_d - L_q)I_d + M_E I_E]} = \frac{8}{2(-0.01 \cdot \sqrt{3} + 1.1)} = 3.694538 [A] \quad (6.172)$$

Prin mărirea cuplului rezistent la arbore de la  $50\%M_N (\approx 8[Nm])$  la  $100\%M_N (\approx 16[Nm])$ , curentul  $I_q$  va avea valoarea:

$$I_q = \frac{M_{el\text{mag}}}{p_1[(L_d - L_q)I_d + M_E I_E]} = \frac{16}{2(-0.01 \cdot \sqrt{3} + 1.1)} = 7.389075 [A] \quad (6.173)$$

Curentul  $I_d$  va fi readus la valoarea inițială ( $-1[A]$ ) de către regulatorul de frecvență **R**(figura 6.3.17) al SRA care va modifica frecvența  $f$  de la valoarea de  $60.91[\text{Hz}]$ (6.171) la valoarea(6.167):

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{220\sqrt{3}}{\sqrt{(1.1 - 0.08\sqrt{3})^2 + \left(\frac{16 \cdot 0.07}{2(-0.01 \cdot \sqrt{3} + 1.1)}\right)^2}} = 55.55013 [\text{Hz}] \quad (6.174)$$

Turația finală va avea valoarea:

$$n = \frac{f}{p_1} = \frac{55.55013}{2} = 27.77507 [\text{rot/s}] = 1666.504 [\text{rot/min}] \quad (6.175)$$

Factorul de putere la care funcționează motorul sincron este(6.159):

$$\begin{aligned} \cos \varphi &= \frac{I_q(M_E I_E + L_d I_d - L_q I_d)}{P_s} = \\ &= \frac{3.694538(1.1 - 0.08\sqrt{3} + 0.07\sqrt{3})}{\sqrt{(\sqrt{3})^2 + 3.694538^2} \cdot \sqrt{(1.1 - 0.08\sqrt{3})^2 + (0.07 \cdot 3.694538)^2}} = 0.984618 (\varphi = 0.1756223^\circ) \end{aligned} \quad (6.176)$$

Conform cu notațiile (6.132), condițiile inițiale ale sistemului de ecuații diferențiale se determină din următorul sistem de ecuații algebrice:

$$\begin{cases} 1.6X - 0.07\omega Z = -220\sqrt{3} \sin \theta \\ 0.08\omega X + 1.6Z + 1.1\omega = 220\sqrt{3} \cos \theta \\ 2(0.01XZ + 1.1Z) - 8 = 0 \\ \omega = 382.7309 \end{cases} \quad (6.177)$$

cu soluția:

$$\omega = 382.7309 [\text{rad/s}]; \theta = 0.2718404 [\text{rad}]; X = -1.732051 [A]; Z = 3.694538 [A] \quad (6.178)$$

Condițiile finale ale sistemului de ecuații diferențiale se determină din următorul sistem de ecuații algebrice(a se vedea relația 6.47):

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.6X - 0.07\omega Z = -V\sin\theta \\ 0.08\omega X + 1.6Z + 1.1\omega = V\cos\theta \\ 2(0.01XZ + 1.1Z) - 16 = 0 \\ 1.41 = (1.1 + 0.08X)^2 + (0.07Z)^2 \\ \omega = 349.0319 \end{array} \right. \quad (6.179)$$

cu soluția:

$$Z = 7.389[A]; X = -1.732[A]; \theta = 0.4339868[rad]; \omega = 349.0319[rad/s]; V = 425.2559[V] \quad (6.180)$$

Sistemul de ecuații diferențiale la flux rotoric controlat, cu un regulator PI pe frecvența tensiunii statorice, respectiv un regulator PI pe tensiunea statorică, în condițiile în care factorul de amplificare al reguletoarelor este  $K = 10$  iar constanta de timp a regulatorului  $T_i = 0.1[s]$ , este următorul (a se vedea figura 6.3.17 și relația 6.128):

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.6X + 0.08\frac{dX}{dt} - 0.07\omega Z + 0.055\frac{dW}{dt} - 0.058\omega Q = -V\sin\theta \\ 0.08\omega X + 1.6Z + 0.07\frac{dZ}{dt} + 1.1\omega + 0.055\omega W + 0.058\frac{dQ}{dt} = V\cos\theta \\ 0.055\frac{dX}{dt} + 7.95W + 0.067\frac{dW}{dt} = 0 \\ 0.058\frac{dZ}{dt} + 30.22Q + 0.25\frac{dQ}{dt} = 0 \\ 2(0.01XZ + 1.1Z - 0.058XQ + 0.055ZW) - 16 - \boxed{J}\frac{ds}{dt} = 0 \\ \frac{ds}{dt} + s - \omega = 0 \\ -\frac{d\omega}{dt} - 10(\omega - 349.0319) - 0.1\frac{d\omega}{dt} = 0 \\ -\frac{dV}{dt} - 10(V - 425.2559) - 0.1\frac{dV}{dt} = 0 \end{array} \right. \quad (6.181)$$

$$\begin{array}{l} X(0) = -1.732051 \\ Z(0) = 3.694538 \\ V(0) = 220\sqrt{3} \\ W(0) = 0 \\ Q(0) = 0 \\ \omega(0) = 382.7309 \\ s(0) = 191.3655 \\ \theta(0) = 0.2718404 \end{array}$$

În urma soluționării sistemului de ecuații diferențiale (6.181), rezultă următoarele evoluții în timp ale mărimilor din mașina model și din mașina reală:

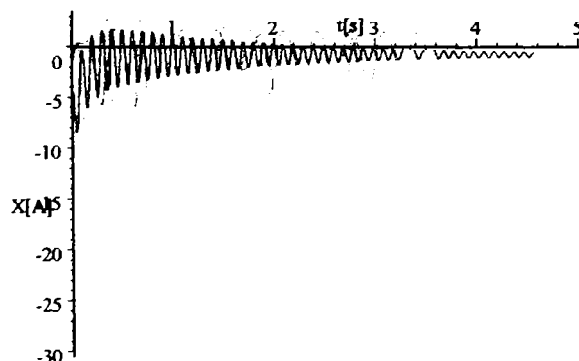


Fig.6.3.18. Variația în timp a lui  $I_d$ .

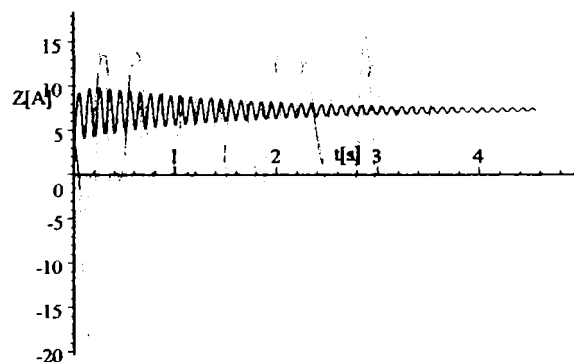


Fig.6.3.19. Variația în timp a lui  $I_q$ .

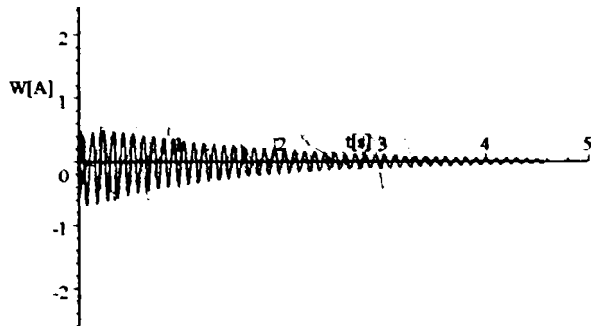


Fig. 6.3.20. Variația în timp a lui  $I_D$ .

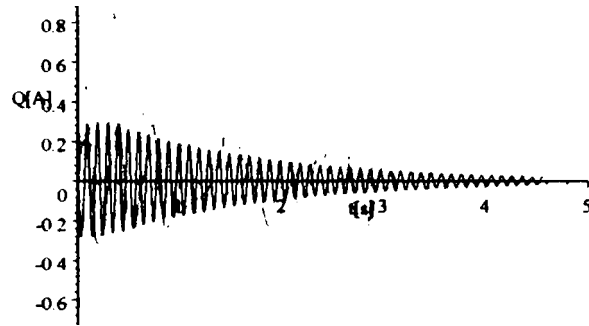


Fig. 6.3.21. Variația în timp a lui  $I_Q$ .

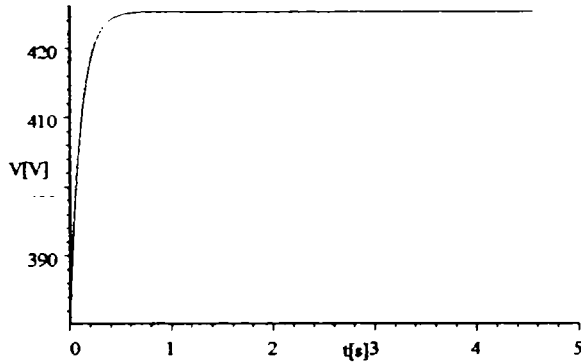


Fig. 6.3.22. Variația în timp a lui  $U_b$ .

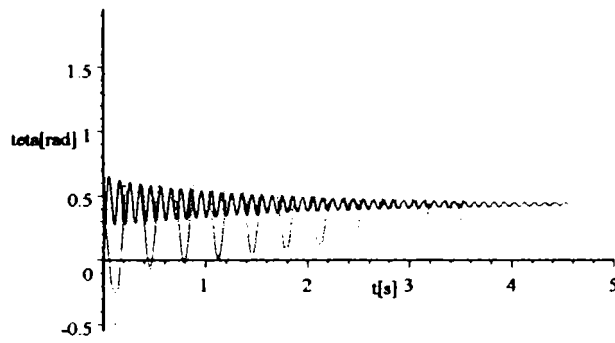


Fig. 6.3.23. Variația în timp a lui  $\theta$ .

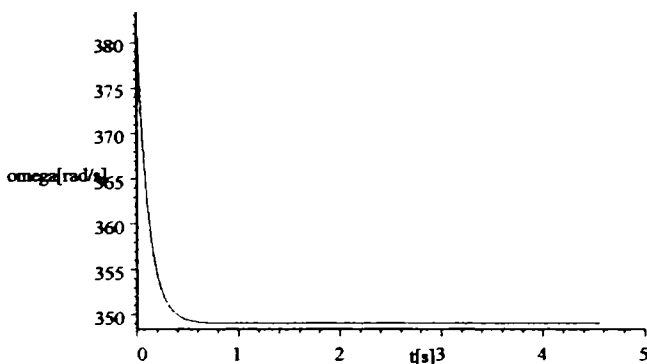


Fig. 6.3.24. Variația în timp a lui  $\omega$ .

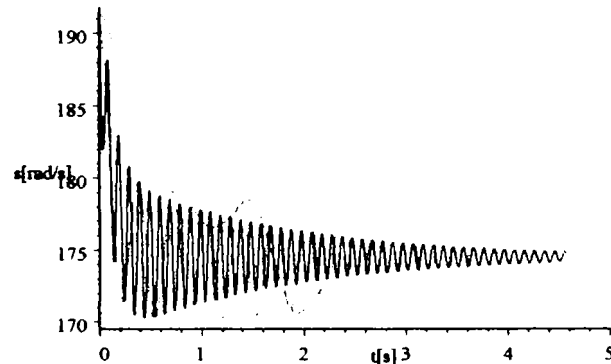


Fig. 6.3.25. Variația în timp a lui  $\Omega$ .

Curentul statoric respectiv cuplul electromagnetic în mașina reală sunt[B2, B4]:

$$I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos(\omega(t) \cdot t) - Z(t) \sin(\omega(t) \cdot t)) \quad (6.182)$$

$$M_{el\text{mog}}(t) = M(t) = 2(0.01X(t)Z(t) + 1.1Z(t) - 0.058X(t)Q(t) + 0.055Z(t)W(t)) \quad (6.183)$$

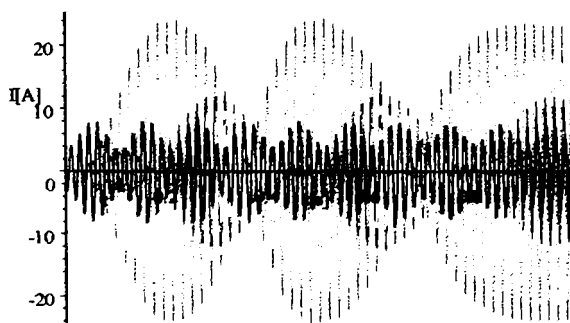


Fig. 6.3.26. Variația în timp a lui  $I$ .

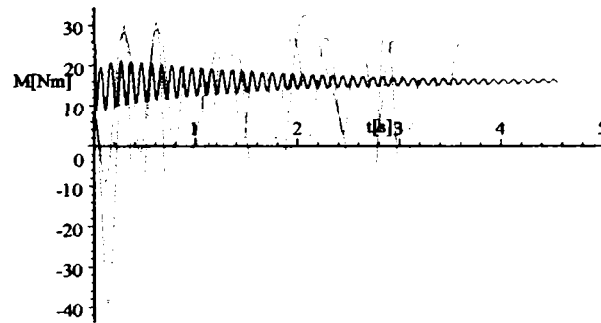


Fig. 6.3.27. Variația în timp a lui  $M_{el\text{mog}}$ .

Concluziile și interpretările fenomenologice desprinse din evoluțiile în timp ale mărimilor ce caracterizează procesul tranzitoriu studiat în acest subparagraf sunt prezentate în paragraful 6.4.

6.3.4. Modelarea şi simularea funcţionării motorului sincron la flux statoric controlat  
cu influenţa modificării constantei de timp a reguletoarelor

În acest paragraf se prezintă influenţa modificării constantei de timp a reguletoarelor PI asupra proceselor tranzitorii care au loc la funcţionarea motorului sincron la flux statoric controlat, în cazul unei încărcări bruşte de sarcină de la  $50\%M_N (\approx 8[Nm])$  la  $100M_N (\approx 16[Nm])$ . Se alege pentru constanta de timp a reguletoarelor  $T_i$  trei valori mai semnificative din plaja de interes (cele trei valori determinând plaja de interes pentru sistemele de acţionare electrică considerate în lucrare [B2, B4, C2, F2, K2, S1]), conform cu tabelul (6.131). Momentul de inerţie axial se consideră a fi cel de catalog, dat de firma constructoare,  $J = 0.008663 [kg \cdot m^2]$ . Pe baza aceluiaşi notaţii (6.132), sistemul de ecuaţii diferenţiale care modelează acest proces tranzitoriu este (a se vedea relaţia 6.148) următorul (a se vedea prima parte a capitolului 3 respectiv relaţia 6.128):

$$\begin{cases}
 1.6X + 0.08 \frac{dX}{dt} - 0.07\omega Z + 1.1 \frac{dU}{dt} + 0.055 \frac{dW}{dt} - 0.058\omega Q = -225.0786\sqrt{3} \sin\theta \\
 0.08\omega X + 1.6Z + 0.07 \frac{dZ}{dt} + 1.1\omega U + 0.055\omega W + 0.058 \frac{dQ}{dt} = 225.0786\sqrt{3} \cos\theta \\
 1.1 \frac{dX}{dt} + 41.3U + 18.51 \frac{dU}{dt} + 0.62 \frac{dW}{dt} = Y \\
 0.055 \frac{dX}{dt} + 0.62 \frac{dU}{dt} + 7.95W + 0.067 \frac{dW}{dt} = 0 \\
 0.058 \frac{dZ}{dt} + 30.22Q + 0.25 \frac{dQ}{dt} = 0 \\
 2(0.01XZ + 1.1ZU - 0.058XQ + 0.055ZW) - 16 - 0.008663 \frac{ds}{dt} = 0 \\
 \frac{ds}{dt} + s - \omega = 0 \\
 -10 \boxed{T_i} \frac{d\omega}{dt} - 10(\omega - 312.8335) - \boxed{T_i} \frac{d\omega}{dt} = 0 \\
 -10 \boxed{T_i} \frac{dY}{dt} - 10(Y - 54.516) - \boxed{T_i} \frac{dY}{dt} = 0
 \end{cases} \tag{6.184}$$

$$\begin{aligned}
 X(0) &= -0.6173099 \\
 Y(0) &= 51.22852 \\
 Z(0) &= 3.240877 \\
 U(0) &= 1.240407 \\
 W(0) &= Q(0) = 0 \\
 \omega(0) &= 314 \\
 s(0) &= 157 \\
 \theta(0) &= 0.1882215
 \end{aligned}$$

În urma soluţionării sistemului de ecuaţii diferenţiale (6.184), rezultă următoarele evoluţii în timp ale mărimilor din maşina model şi din maşina reală:

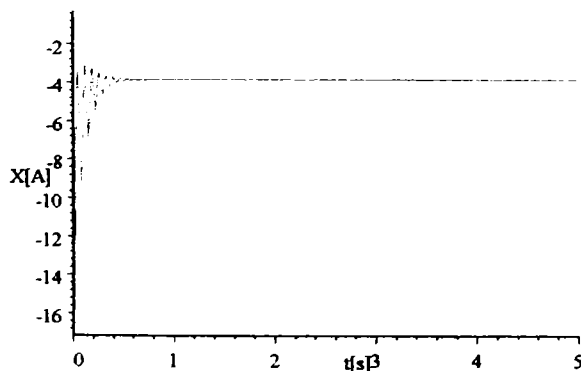


Fig.6.3.28. Variaţia în timp a lui  $I_d$ .

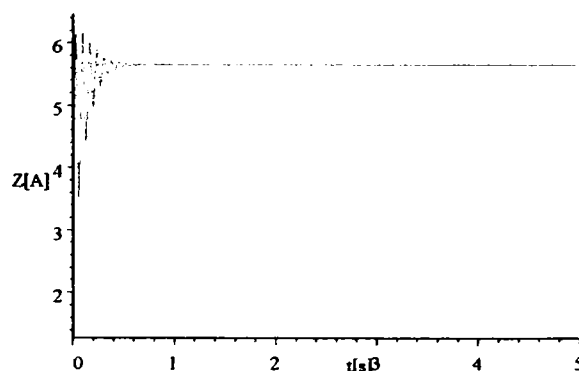


Fig.6.3.29. Variaţia în timp a lui  $I_q$ .

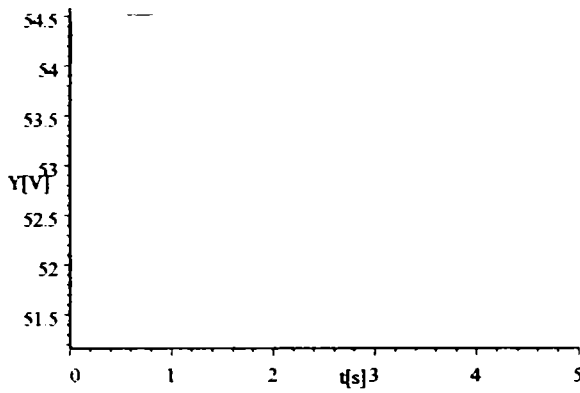


Fig.6.3.30. Variația în timp a lui  $U_E$ .

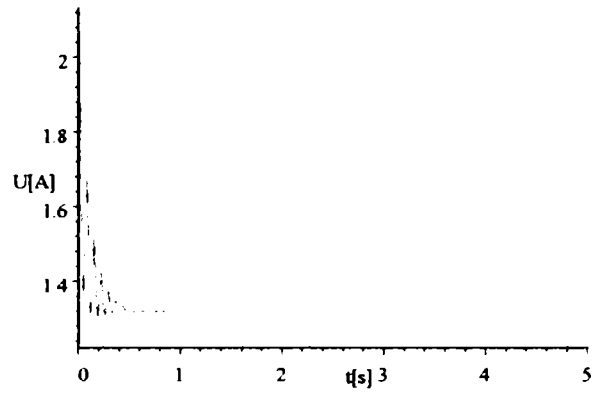


Fig.6.3.31. Variația în timp a lui  $I_E$ .

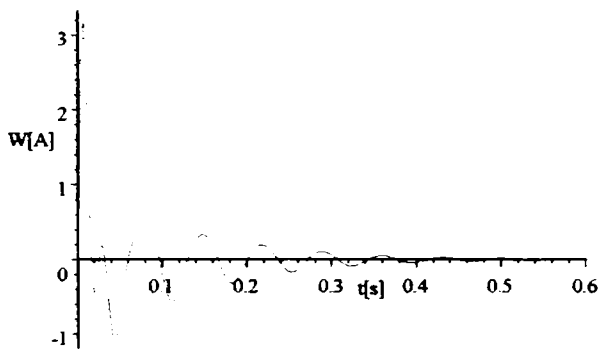


Fig.6.3.32. Variația în timp a lui  $I_D$ .

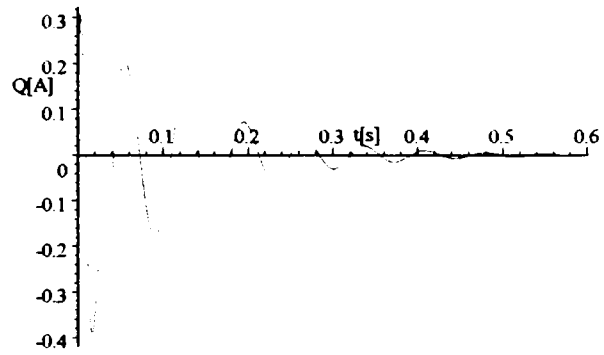


Fig.6.3.33. Variația în timp a lui  $I_Q$ .

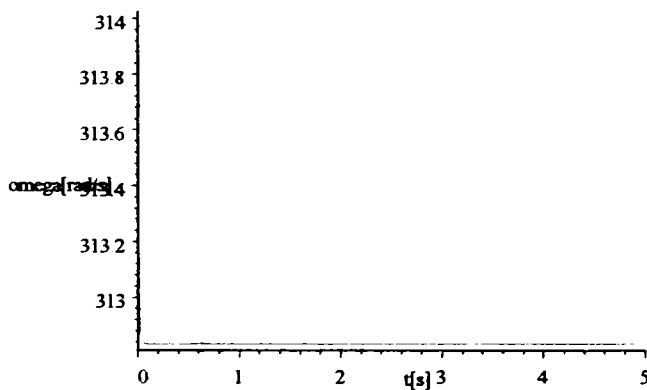


Fig.6.3.34. Variația în timp a lui  $\omega$ .

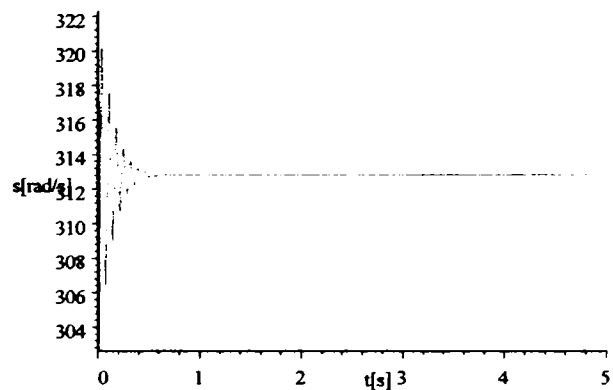


Fig.6.3.35. Variația în timp a lui  $p_1\Omega$ .

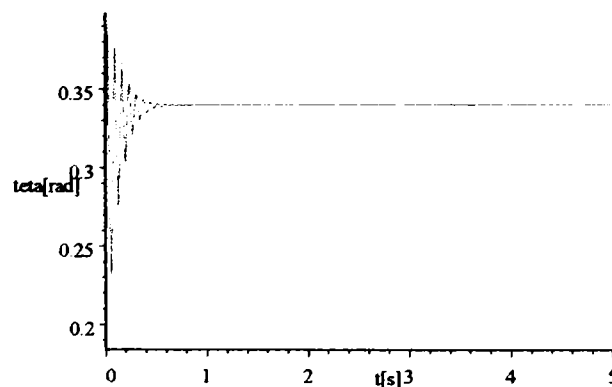


Fig.6.3.36. Variația în timp a lui  $\theta$ .



Curentul statoric respectiv cuplul electromagnetic în mașina reală sunt(a se vedea relațiile 6.182, 6.183):

$$I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos(\omega(t) \cdot t) - Z(t) \sin(\omega(t) \cdot t)) \quad (6.185)$$

$$M_{elmag}(t) = M(t) = 2(0.01X(t)Z(t) + 1.1Z(t)U(t) - 0.058X(t)Q(t) + 0.055Z(t)W(t)) \quad (6.186)$$

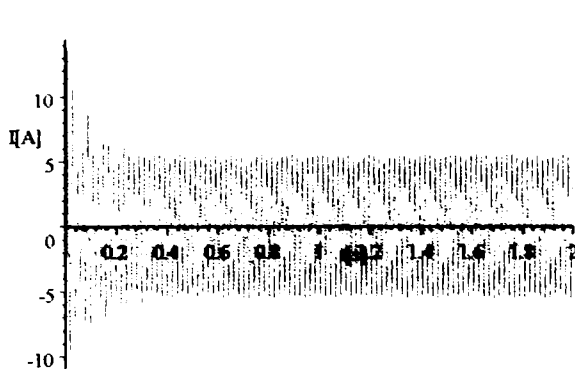


Fig. 6.3.37. Variația în timp a lui  $I$ .

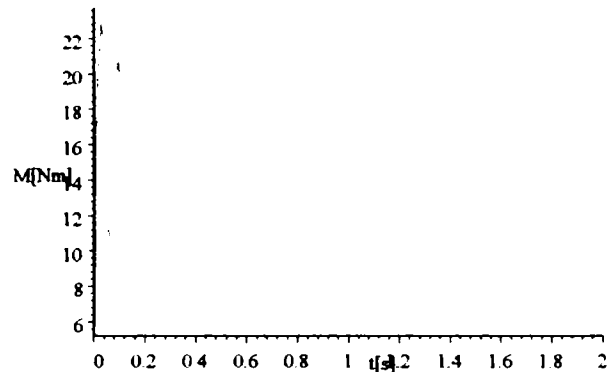


Fig. 6.3.38. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$ .

Concluziile și interpretările fenomenologice desprinse din evoluțiile în timp ale mărimilor ce caracterizează procesul tranzitoriu studiat în acest subparagraf sunt prezentate în paragraful 6.4.

### 6.3.5. Modelarea și simularea funcționării motorului sincron la flux rotoric controlat cu influența modificării constantei de timp a reguletoarelor

În acest paragraf se prezintă influența modificării constantei de timp a reguletoarelor PI asupra proceselor tranzitorii care au loc la funcționarea motorului sincron la flux rotoric controlat, în cazul unei încărcări bruște de sarcină de la  $50\%M_N (\approx 8[Nm])$  la  $100M_N (\approx 16[Nm])$ , pentru aceleași trei valori ale lui  $T_i$  respectiv aceeași valoare a lui  $J$  ca și la subparagraful precedent. Sistemul de ecuații diferențiale care modelează acest proces tranzitoriu este(a se vedea relațiile 6.181 și 6.132) următorul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.6X + 0.08 \frac{dX}{dt} - 0.07\omega Z + 0.055 \frac{dW}{dt} - 0.058\omega Q = -V \sin \theta \\ 0.08\omega X + 1.6Z + 0.07 \frac{dZ}{dt} + 1.1\omega + 0.055\omega W + 0.058 \frac{dQ}{dt} = V \cos \theta \\ 0.055 \frac{dX}{dt} + 7.95W + 0.067 \frac{dW}{dt} = 0 \\ 0.058 \frac{dZ}{dt} + 30.22Q + 0.25 \frac{dQ}{dt} = 0 \\ 2(0.01XZ + 1.1Z - 0.058XQ + 0.055ZW) - 16 - 0.008663 \frac{ds}{dt} = 0 \\ \frac{d\theta}{dt} + s - \omega = 0 \\ -10 \left[ T_i \right] \frac{d\omega}{dt} - 10(\omega - 349.0319) - \left[ T_i \right] \frac{ds}{dt} = 0 \\ -10 \left[ T_i \right] \frac{dV}{dt} - 10(V - 425.2559) - \left[ T_i \right] \frac{dV}{dt} = 0 \end{array} \right. \quad (6.187)$$

$$\begin{array}{l} X(0) = -1.732051 \\ Z(0) = 3.694538 \\ V(0) = 220\sqrt{3} \\ W(0) = 0 \\ Q(0) = 0 \\ \omega(0) = 382.7309 \\ s(0) = 191.3655 \\ \theta(0) = 0.2718404 \end{array}$$

În urma soluționării sistemului de ecuații diferențiale (6.187), rezultă următoarele evoluții în timp ale mărimilor din mașina model și din mașina reală:

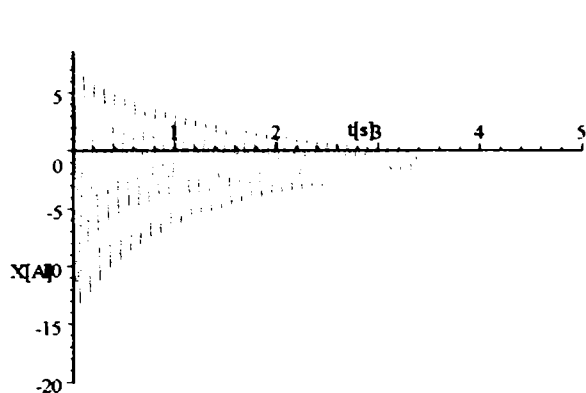


Fig. 6.3.39. Variația în timp a lui  $I_d$ .

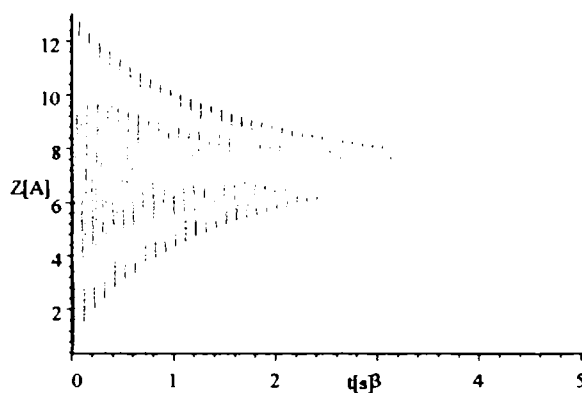


Fig. 6.3.40. Variația în timp a lui  $I_q$ .

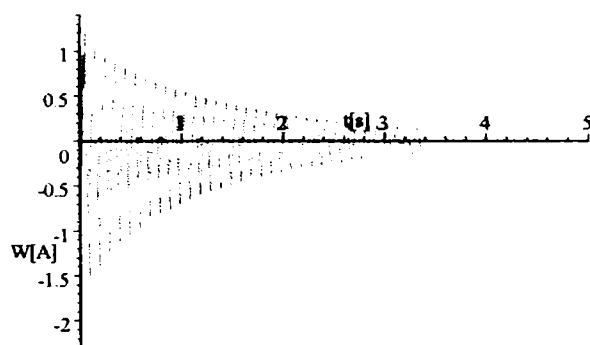


Fig. 6.3.41. Variația în timp a lui  $I_D$ .

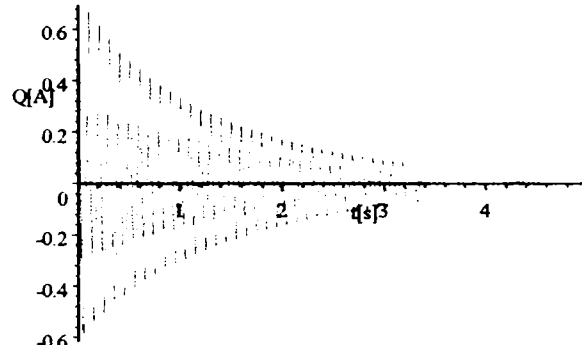


Fig. 6.3.42. Variația în timp a lui  $I_Q$ .

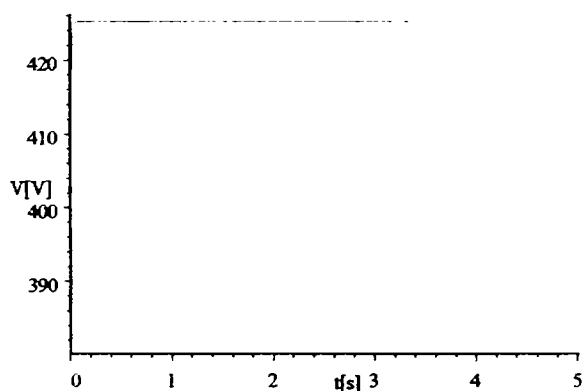


Fig. 6.3.43. Variația în timp a lui  $U_b$ .

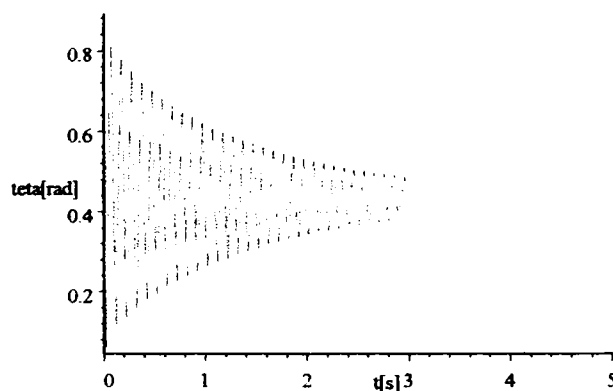


Fig. 6.3.44. Variația în timp a lui  $\theta$ .

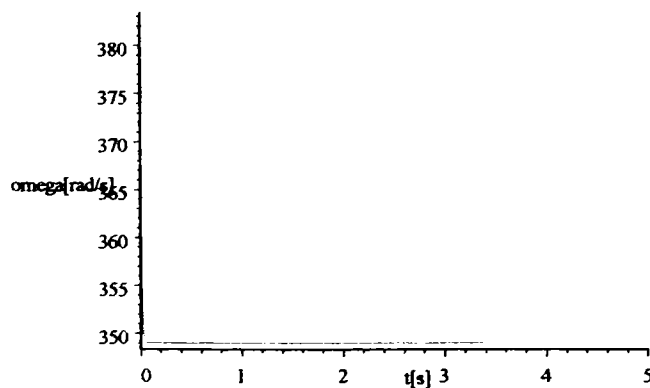


Fig. 6.3.45. Variația în timp a lui  $\omega$ .

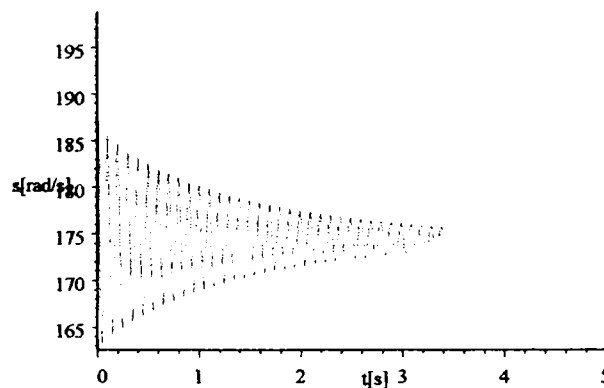


Fig. 6.3.46. Variația în timp a lui  $\Omega$ .

Curentul statoric respectiv cuplul electromagnetic în mașina reală sunt[B2, B4]:

$$I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos(\omega(t) \cdot t) - Z(t) \sin(\omega(t) \cdot t)) \tag{6.188}$$

$$M_{el\text{mag}}(t) = M(t) = 2(0.01X(t)Z(t) + 1.1Z(t) - 0.058X(t)Q(t) + 0.055Z(t)W(t)) \tag{6.189}$$

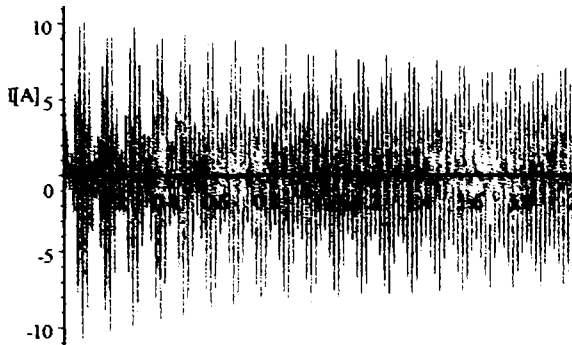


Fig. 6.3.47. Variația în timp a lui I.

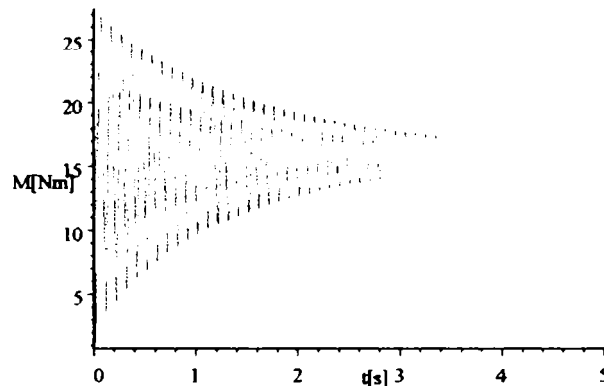


Fig. 6.3.48. Variația în timp a lui  $M_{el\text{mag}}$ .

Concluziile desprinse din evoluțiile în timp ale mărimilor ce caracterizează procesul tranzitoriu studiat în acest subparagraf sunt prezentate în continuare.

6.4. Concluzii

Pentru pornirea în asincron a motorului sincron, rezultatele desprinse din evoluțiile timp ale mărimilor din mașina model și mașina reală se prezintă în următorul tabel:

	<b>P O R N I R E</b>														
$f(t)=$	$I_d$	$I_q$	$I_{dr}$	$I_{qr}$	$I_{di}$	$I_{qi}$	s	n	$I_{direct}$	$I_{invers}$	$I_{rez.}$	$M_{direct}$	$M_{invers}$	$M_{el\text{mag. rez.}}$	
<i>u. m.</i>	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[1]	[rpm]	[A]	[A]	[A]	[Nm]	[Nm]	[Nm]	
$f(0)$	0.	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
$f(\infty)$	0.96	15	0	0	0	0	$2 \cdot 10^{-5}$	1499.2	13.5	0	1.2	0	0	0	
$f_{\text{max}}$	19	33	3.9	5.7	3.3	4.1	1	1499.2	17	3.5	2.1	10.4	1.12	10	
$t_{f\text{max}} [s]$	0.01	0.02	0.4	0.02	0.01	0.03	0	1	0.02	0.03	0.018	0.02	0.44	0.025	
$t_{\text{stab. } f} [s]$	1	1	1	0.8	1.05	0.8	1	1	0.75	1	0.8	1.08	0.77	1.04	

(6.190)

<b>SINCRONIZARE</b>								
$f(t)=$	$I_d$	$I_q$	$I_D$	$I_Q$	$I_E$	$\omega$	I	$M_{el\text{mag.}}$
<i>u. m.</i>	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[rad/s]	[A]	[Nm]
$f(0)$	1.091	-16	0	0	1	313.993	1.2	0
$f(\infty)$	0.6	0.8	0	0	1	314	4.2	1.3
$f_{\text{max}}$	5	13.2	16	3.65	3.4	335	46	84
$t_{f\text{max}} [s]$	0.02	0.02	0.013	0.01	0.01	0.05	0.02	0.003
$t_{\text{stab. } f} [s]$	0.6	0.4	0.13	0.14	0.6	0.8	0.4	0.3

(6.191)

Pentru încărcarea/descărcarea bruscă a motorului sincron, rezultatele desprinse din evoluțiile timp ale mărimilor din mașina model și mașina reală se prezintă în următoarele tabele:

<b>ÎNCĂRCARE</b>	$f(t)=$	$I_d$	$I_q$	$I_D$	$I_Q$	$I_E$	$\omega$	$\theta$	$I$	$M_{elmag.}$
<b>BRUSCĂ 0%-25%<math>M_N</math></b>	<i>u. m.</i>	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[rad/s]	[rad]	[A]	[Nm]
$J_1 = 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	0	0	0	0	1	314	0	0	0
	$f(\infty)$	1.23	1.798	0	0	1	314	0.098	1.45	4
	$f_{\max}$	12.8	3.8	2.8	0.32	1.08	320	0.21	10.4	7.5
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.01	0.05	0.01	0.005	0.5	0.07	0.045	0.01	0.04
	$t_{\text{stab.},r}[s]$	1.7	2.2	1.5	1.8	1.8	2.2	2.2	1	2.2
$J_2 = 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	0	0	0	0	1	314	0	0	0
	$f(\infty)$	1.23	1.798	0	0	1	314	0.098	1.45	4
	$f_{\max}$	12.9	3.45	2.9	0.31	1.06	316	0.195	10.5	7.6
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.01	0.16	0.01	0.005	0.52	0.8	0.15	0.01	0.17
	$t_{\text{stab.},r}[s]$	8	12	2.5	8	7	9	11	5	12
$J_3 = 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	0	0	0	0	1	314	0	0	0
	$f(\infty)$	1.23	1.798	0	0	1	314	0.098	1.45	4
	$f_{\max}$	12.8	3.35	0.25	0.3	1.04	314.2	0.191	10.4	7.4
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.01	0.45	0.03	0.005	0.7	1.5	0.7	0.01	0.5
	$t_{\text{stab.},r}[s]$	38	40	3	18	35	35	40	30	40

(6.192)

<b>ÎNCĂRCARE</b>	$f(t)=$	$I_d$	$I_q$	$I_D$	$I_Q$	$I_E$	$\omega$	$\theta$	$I$	$M_{elmag.}$
<b>BRUSCĂ 0%-50%<math>M_N</math></b>	<i>u. m.</i>	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[rad/s]	[rad]	[A]	[Nm]
$J_1 = 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	0	0	0	0	1	314	0	0	0
	$f(\infty)$	0.868	3.607	0	0	1	314	0.205	2.47	8
	$f_{\max}$	12.5	6.5	2.65	0.41	1.21	326	0.4	10	17
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.04	0.04	0.01	0.03	0.04	0.06	0.04	0.01	0.04
	$t_{\text{stab.},r}[s]$	1.25	1.5	1	1.4	1.4	1.4	1.4	0.8	1.4
$J_2 = 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	0	0	0	0	1	314	0	0	0
	$f(\infty)$	0.868	3.607	0	0	1	314	0.205	2.47	8
	$f_{\max}$	12.4	6.4	2.65	0.33	1.2	317	0.39	10.1	16.4
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.04	0.15	0.01	0.01	0.125	0.25	0.13	0.01	0.14
	$t_{\text{stab.},r}[s]$	4	5	2.3	3	4.3	3.5	5	4	4.5
$J_3 = 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	0	0	0	0	1	314	0	0	0
	$f(\infty)$	0.868	3.607	0	0	1	314	0.205	2.47	8
	$f_{\max}$	12.2	6.4	2.64	0.32	1.12	315	0.39	10	15.3
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.04	0.45	0.01	0.01	0.38	0.8	0.5	0.01	0.45
	$t_{\text{stab.},r}[s]$	14	20	3	10	15	10	19	12	19

(6.193)

ÎNCĂRCARE	$f(t)=$	$I_d$	$I_q$	$I_D$	$I_Q$	$I_E$	$\omega$	$\theta$	$I$	$M_{elmag.}$
<b>BRUSCĂ 0%-75%<math>M_N</math></b>	<i>u. m.</i>	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[rad/s]	[rad]	[A]	[Nm]
$J_1 = 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	0	0	0	0	1	314	0	0	0
	$f(\infty)$	0.313	5.439	0	0	1	314	0.317	3.63	12
	$f_{\max}$	12.8	8.4	2.61	0.38	1.5	330	0.54	10	26.5
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.01	0.04	0.01	0.065	0.04	0.05	0.03	0.01	0.04
	$t_{\text{stab.},r}[s]$	0.8	1	0.7	0.8	1	1	1	0.4	1
$J_2 = 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	0	0	0	0	1	314	0	0	0
	$f(\infty)$	0.313	5.439	0	0	1	314	0.317	3.63	12
	$f_{\max}$	12.9	8.55	2.62	0.15	1.45	319	0.56	12	25.5
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.01	0.14	0.01	0.015	0.12	0.19	0.125	0.01	0.13
	$t_{\text{stab.},r}[s]$	2.2	2.3	1.42	1.75	2.3	3	2.4	2	2.4
$J_3 = 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	0	0	0	0	1	314	0	0	0
	$f(\infty)$	0.313	5.439	0	0	1	314	0.317	3.63	12
	$f_{\max}$	12.8	9	2.61	0.18	1.27	315	0.57	12	23
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.01	0.5	0.01	0.015	0.35	0.7	0.45	0.01	0.42
	$t_{\text{stab.},r}[s]$	7	8	1.8	3	6.8	4.2	8	8	8

(6.194)

ÎNCĂRCARE	$f(t)=$	$I_d$	$I_q$	$I_D$	$I_Q$	$I_E$	$\omega$	$\theta$	$I$	$M_{elmag.}$
<b>BRUSCĂ 0%-100%<math>M_N</math></b>	<i>u. m.</i>	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[rad/s]	[rad]	[A]	[Nm]
$J_1 = 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	0	0	0	0	1	314	0	0	0
	$f(\infty)$	-0.472	7.304	0	0	1	314	0.437	4.87	16
	$f_{\max}$	14	9.7	2.6	0.66	1.8	335	0.66	13.8	36.3
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.01	0.04	0.01	0.03	0.04	0.05	0.03	0.04	0.032
	$t_{\text{stab.},r}[s]$	0.7	0.7	0.6	0.6	0.7	0.9	0.7	0.2	0.7
$J_2 = 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	0	0	0	0	1	314	0	0	0
	$f(\infty)$	-0.472	7.304	0	0	1	314	0.437	4.87	16
	$f_{\max}$	12.8	10.2	2.8	0.16	1.69	319	0.68	13	35
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.01	0.13	0.01	0.017	0.11	0.17	0.13	0.095	0.12
	$t_{\text{stab.},r}[s]$	1.6	1.4	1	1.2	1.8	1.22	1.8	1.8	1.8
$J_3 = 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	0	0	0	0	1	314	0	0	0
	$f(\infty)$	-0.472	7.304	0	0	1	314	0.437	4.87	16
	$f_{\max}$	8.3	11	2.6	0.19	1.44	315	0.73	11	30.6
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.37	0.5	0.01	0.017	0.34	0.6	0.5	0.4	0.38
	$t_{\text{stab.},r}[s]$	3.6	4	1.75	1.8	3.8	2	4	4	4

(6.195)

<b>LIMITA</b>										
<b>DE STABILITATE</b>	$f(t)=$	$I_d$	$I_q$	$I_D$	$I_Q$	$I_E$	$\omega$	$\theta$	$I$	$M_{elmag.}$
<b>LA ÎNCĂRCARE</b>	<i>u. m.</i>	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[rad/s]	[rad]	[A]	[Nm]
$J_1 = 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	0	0	0	0	1	314	0	0	0
	$f(\infty)$	-11.68	16.11	0	0	1	314	1.361	13.24	31.7
	$f_{\max}$	40	16.11	6	0.85	3.2	353	1.361	33	78
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.03	30	0.05	0.02	0.03	0.05	30	0.03	0.03
	$t_{\text{stab},f}[s]$	30	30	0.5	0.44	3	0.55	30	1.8	0.6
$J_2 = 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	0	0	0	0	1	314	0	0	0
	$f(\infty)$	-11.68	16.11	0	0	1	314	1.361	13.24	31.7
	$f_{\max}$	32	16.11	2.7	0.36	2.8	323	1.361	28	71
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.1	30	0.01	0.05	0.1	0.15	30	0.1	0.1
	$t_{\text{stab},f}[s]$	30	30	0.64	0.5	3.2	0.7	30	2	0.9
$J_3 = 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	0	0	0	0	1	314	0	0	0
	$f(\infty)$	-11.68	16.11	0	0	1	314	1.361	13.24	31.7
	$f_{\max}$	24	16.11	2.8	0.32	2.15	314	1.361	22	58
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.32	30	0.01	0.005	0.3	0.7	30	0.32	0.32
	$t_{\text{stab},f}[s]$	30	30	0.65	0.48	3.8	0.7	30	1	1

(6.196)

<b>DESCĂRCARE</b>										
<b>BRUSCĂ 100%-75%<math>M_N</math></b>	$f(t)=$	$I_d$	$I_q$	$I_D$	$I_Q$	$I_E$	$\omega$	$\theta$	$I$	$M_{elmag.}$
<i>u. m.</i>	<i>u. m.</i>	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[rad/s]	[rad]	[A]	[Nm]
$J_1 = 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	-0.472	7.304	0	0	1	314	0.437	4.87	16
	$f(\infty)$	0.313	5.439	0	0	1	314	0.317	3.63	12
	$f_{\max}$	3.7	7.304	0.42	0.13	1	319.4	0.437	6	16
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.04	0	0.02	0.03	0	0.025	0	0.005	0
	$t_{\text{stab},f}[s]$	1	1	0.8	0.8	1	1	1	2.6	1
$J_2 = 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	-0.472	7.304	0	0	1	314	0.437	4.87	16
	$f(\infty)$	0.313	5.439	0	0	1	314	0.317	3.63	12
	$f_{\max}$	2.9	7.304	0.12	0.05	1.06	315.8	0.437	6	16
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.11	0	0.055	0.08	0.25	0.06	0	0.015	0
	$t_{\text{stab},f}[s]$	3	3	1.8	2	2.6	3	2.6	4	2.6
$J_3 = 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	-0.472	7.304	0	0	1	314	0.437	4.87	16
	$f(\infty)$	0.313	5.439	0	0	1	314	0.317	3.63	12
	$f_{\max}$	1.7	7.304	0.03	0.02	1.065	314.6	0.437	6	16
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.33	0	0.18	0.25	1	0.23	0	0.015	0
	$t_{\text{stab},f}[s]$	8	9	3.3	4	9	4	9	9	9

(6.197)

DESCĂRCARE	$f(t)=$	$I_d$	$I_q$	$I_D$	$I_Q$	$I_E$	$\omega$	$\theta$	$I$	$M_{elmag.}$
<b>BRUSCĂ 100%-50%<math>M_N</math></b>	<i>u. m.</i>	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[rad/s]	[rad]	[A]	[Nm]
$J_1 = 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	-0.472	7.304	0	0	1	314	0.437	4.87	16
	$f(\infty)$	0.868	3.607	0	0	1	314	0.205	2.47	8
	$f_{\max}$	7	7.304	0.76	0.29	1.04	325	0.437	6.2	16
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.035	0	0.02	0.03	0.17	0.022	0	0.025	0
	$t_{\text{stab.}f}[s]$	1.4	1.4	1.2	1.3	1.4	1.4	1.4	0.62	1.4
$J_2 = 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	-0.472	7.304	0	0	1	314	0.437	4.87	16
	$f(\infty)$	0.868	3.607	0	0	1	314	0.205	2.47	8
	$f_{\max}$	5.2	7.304	0.2	0.11	1.15	317.4	0.437	5.9	16
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.11	0	0.05	0.09	0.28	0.07	0	0.005	0
	$t_{\text{stab.}f}[s]$	5	5	3.5	3.5	5	4	5	5	5
$J_3 = 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	-0.472	7.304	0	0	1	314	0.437	4.87	16
	$f(\infty)$	0.868	3.607	0	0	1	314	0.205	2.47	8
	$f_{\max}$	3	7.304	0.06	0.04	1.12	314.7	0.437	5.8	16
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.29	0	0.13	0.27	1	0.27	0	0.012	0
	$t_{\text{stab.}f}[s]$	19	20	8	10	19	13	20	20	20

(6.198)

DESCĂRCARE	$f(t)=$	$I_d$	$I_q$	$I_D$	$I_Q$	$I_E$	$\omega$	$\theta$	$I$	$M_{elmag.}$
<b>BRUSCĂ 100%-25%<math>M_N</math></b>	<i>u. m.</i>	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[rad/s]	[rad]	[A]	[Nm]
$J_1 = 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	-0.472	7.304	0	0	1	314	0.437	4.87	16
	$f(\infty)$	1.23	1.798	0	0	1	314	0.098	1.45	4
	$f_{\max}$	8.7	7.304	1.04	0.5	1.1	331.5	0.437	7.1	16
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.03	0	0.02	0.03	0.19	0.024	0	0.028	0
	$t_{\text{stab.}f}[s]$	2	2	2	2	2	2	2	0.9	2
$J_2 = 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	-0.472	7.304	0	0	1	314	0.437	4.87	16
	$f(\infty)$	1.23	1.798	0	0	1	314	0.098	1.45	4
	$f_{\max}$	6.4	7.304	0.28	0.19	1.23	319	0.437	5.8	16
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.09	0	0.043	0.09	0.29	0.074	0	0.013	0
	$t_{\text{stab.}f}[s]$	11	11	8	8.4	11	10	12	6	12
$J_3 = 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	-0.472	7.304	0	0	1	314	0.437	4.87	16
	$f(\infty)$	1.23	1.798	0	0	1	314	0.098	1.45	4
	$f_{\max}$	3.8	7.304	0.04	0.07	1.17	315.2	0.437	6.1	16
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.24	0	0.13	0.29	1.3	0.24	0	0.034	0
	$t_{\text{stab.}f}[s]$	30	35	11	26	30	30	35	13	35

(6.199)

DESCĂRCARE	$f(t)=$	$I_d$	$I_q$	$I_D$	$I_Q$	$I_E$	$\omega$	$\theta$	$I$	$M_{elmag.}$
<b>BRUSCĂ 100%-0%<math>M_N</math></b>	<i>u. m.</i>	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[rad/s]	[rad]	[A]	[Nm]
$J_1 = 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	-0.472	7.304	0	0	1	314	0.437	4.87	16
	$f(\infty)$	0	0	0	0	1	314	0	0	0
	$f_{\max}$	0.096	7.304	1.25	0.77	1.06	339	0.437	7.5	16
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.03	0	0.02	0.03	0.19	0.03	0	0.028	0
	$t_{\text{stab.}f}[s]$	2.2	2.2	1.8	2.2	2.2	2.2	2.2	1	2.2
$J_2 = 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	-0.472	7.304	0	0	1	314	0.437	4.87	16
	$f(\infty)$	0	0	0	0	1	314	0	0	0
	$f_{\max}$	0.07	7.304	0.35	0.26	1.22	323	0.437	5.8	16
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.07	0	0.04	0.09	0.29	0.08	0	0.015	0
	$t_{\text{stab.}f}[s]$	15	19	8.4	14	15	15	18	7	19
$J_3 = 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	-0.472	7.304	0	0	1	314	0.437	4.87	16
	$f(\infty)$	0	0	0	0	1	314	0	0	0
	$f_{\max}$	0.043	7.304	0.12	0.1	1.17	316	0.437	6	16
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.21	0	0.11	0.29	1.2	0.26	0	0.015	0
	$t_{\text{stab.}f}[s]$	37	40	12	26	35	35	40	18	40

(6.200)

unde

$f(0)$  - valoarea mărimii  $f$  la momentul de timp inițial  $t_0 = 0[s]$ ,  
care constituie de fapt condiția inițială a sistemului de ecuații diferențiale;  
 $f(\infty)$  - valoarea mărimii  $f$  la momentul de timp final  $t_{\text{stab.}f}$  (după amortizare),  
care constituie condiția finală a sistemului de ecuații diferențiale;  
 $f_{\max}$  - valoarea maximă a mărimii  $f$  în perioada procesului tranzitoriu,  
care este din punct de vedere matematic maximul funcției  $f$  în intervalul de timp  $[t_0, t_{\text{stab.}f}]$   
iar din punct de vedere fizic este solicitarea electromagnetică maximă a mărimii respective;  
 $t_{f_{\max}}$  - timpul în care este atinsă valoarea maximă a mărimii  $f$ ,  
iar din punct de vedere fizic este timpul la care apare solicitarea maximă;  
 $t_{\text{stab.}f}$  - timpul în care este atinsă valoarea finală a mărimii  $f$  sau timpul de stabilizare al mărimii  $f$ ,  
iar din punct de vedere fizic este timpul la care procesul tranzitoriu s-a încheiat respectiv  
solicitările de natură electromagnetică au dispărut;  
 $f$  - notație pentru mărimile prezentate în tabele(ca funcții de timp).

(6.201)

Pentru reversarea din gol respectiv din sarcină nominală a motorului sincron, rezultatele desprinse din evoluțiile timp ale mărimilor din mașina model și mașina reală se prezintă în următoarele tabele:



REVERSARE DIN GOL	$f(t)=$ <i>u. m.</i>	$I_d$ [A]	$I_q$ [A]	$I_{dr}$ [A]	$I_{qr}$ [A]	$I_{di}$ [A]	$I_{qi}$ [A]	$s$ [1]	$n$ [rpm]
$J_1 = 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		0	0	0	0	0	0	2	-1500
$J_2 = 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	0	0	0	0	0	0	2	-1500
$J_3 = 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		0	0	0	0	0	0	2	-1500
$J_1 = 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		0	0	0	0	0	0	0.004481	1493.27
$J_2 = 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(\infty)$	0	0	0	0	0	0	0.004481	1493.27
$J_3 = 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		0	0	0	0	0	0	0.004481	1493.27
$J_1 = 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		15	49	17	24	6.6	21	2	1500
$J_2 = 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f_{\max}$	26	42	30	35	7.5	16	2	1500
$J_3 = 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		31	36	38	38	38.2	39	2	1500
$J_1 = 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		0.01	0.01	0.8	0.9	0.9	0.01	0	0
$J_2 = 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$t_{f_{\max}}[s]$	8.3	8.3	8.3	8.3	8.2	8.3	0	0
$J_3 = 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		14	15	19	19	20	20	0	0
$J_1 = 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		3	4	4	3.5	3	3	2.4	2.4
$J_2 = 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$t_{\text{stab},f}[s]$	10	10	10	11	11	11	9.5	9.5
$J_3 = 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		25	25	28	28	28	29	29	29

(6.202)

REVERSARE DIN GOL	$f(t)=$ <i>u. m.</i>	$I_{\text{direct}}$ [A]	$I_{\text{invers}}$ [A]	$I_{\text{rez.}}$ [A]	$M_{\text{direct}}$ [Nm]	$M_{\text{invers}}$ [Nm]	$M_{\text{el mag. rez.}}$ [Nm]
$J_1, J_2, J_3$	$f(0)$	0	0	0	0	0	0
$J_1, J_2, J_3$	$f(\infty)$	0	0	0	0	0	0
$J_1 = 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		28	18	36	25	15	19
$J_2 = 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f_{\max}$	23	12	33	46	33	27
$J_3 = 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		20	10	32	49	38	30
$J_1 = 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		0.01	0.015	0.7	0.9	0.86	0.86
$J_2 = 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$t_{f_{\max}}[s]$	0.82	0.83	0.85	8.3	8.2	8.3
$J_3 = 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		15	15	15.2	15	14.9	15
$J_1 = 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		2.4	2.5	2.5	3	2	2.5
$J_2 = 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$t_{\text{stab},f}[s]$	9.5	9.4	9.5	9.5	9.5	9.6
$J_3 = 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		29	29	30	30	30	30

(6.203)

După reversarea de la regimul de mers în gol( reversare care se face în asincron), motorul rămâne sub turația de sincronism (1493.27[rpm]).Se realizează apoi sincronizarea motorului care presupune atingerea turației de sincronism(1500[rpm]) respectiv trecerea înfășurării de excitație de pe rezistorul de rezistență  $10R_E$  pe sursa de tensiune continuă.În acest moment motorul sincron a fost reversat și adus în sincronism, el funcționând în gol.

Rezultatele studiului procesului tranzitoriu de sincronizare a motorului sunt prezentate în tabelul (6.204).

<b>SINCRONIZARE</b>								
$f(t)=$	$I_d$	$I_q$	$I_D$	$I_Q$	$I_E$	$\omega$	$I$	$M_{elmag.}$
<i>u. m.</i>	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[rad/s]	[A]	[Nm]
$f(0)$	0.97	-15	0	0	1	312.59	0	0
$f(\infty)$	0	0	0	0	1	314	0	0
$f_{max}$	58	13	15	3.5	3.3	335	45	72
$t_{f_{max}}$ [s]	0.02	0.01	0.012	0.01	0.0053	0.0025	0.002	0.005
$t_{stab.f}$ [s]	0.6	0.4	0.1	0.1	0.68	0.8	0.32	0.06

(6.204)

<b>REVERSARE DIN SARCINĂ NOMINALĂ</b>	$f(t)=$	$I_d$	$I_q$	$I_{dr}$	$I_{qr}$	$I_{di}$	$I_{qi}$	$s$	$n$
<i>u. m.</i>	<i>u. m.</i>	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[1]	[rpm]
$J_1= 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		0	0	0	0	0	0	2	-1500
$J_2= 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	0	0	0	0	0	0	2	-1500
$J_3= 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		0	0	0	0	0	0	2	-1500
$J_1= 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		-4.39	-19	7.1	4	-5.9	-3.3	0.021	1467.42
$J_2= 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(\infty)$	-4.39	-19	7.1	4	-5.9	-3.3	0.021	1467.42
$J_3= 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		-4.39	-19	7.1	4	-5.9	-3.3	0.021	1467.42
$J_1= 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		12	38	15	23	8	17	2	1500
$J_2= 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f_{max}$	22	38	25	30	7.5	14.4	2	1500
$J_3= 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		25	50	30	50	10	13.5	2	1500
$J_1= 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		0.01	0.1	0.3	0.2	0.2	0.1	0	0
$J_2= 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$t_{f_{max}}$ [s]	1.1	1.3	1.2	1.2	1.3	1.3	0	0
$J_3= 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		11.6	11.8	11.8	11.8	11.7	11.8	0	0
$J_1= 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		3	2.5	2.5	2.6	2.4	2.2	1	1
$J_2= 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$t_{stab.f}$ [s]	3.7	3.5	3.3	3.5	3.2	3	1.6	1.6
$J_3= 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		14	14	14	14	14	14	14	14

(6.205)

REVERSARE DIN SARCINĂ NOMINALĂ	$f(t)=$ <i>u. m.</i>	$I_{direct}$ [A]	$I_{invers}$ [A]	$I_{rez.}$ [A]	$M_{direct}$ [Nm]	$M_{invers}$ [Nm]	$M_{el\ mag. rez.}$ [Nm]	
$J_1= 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		0	0	0	0	0	0	
$J_2= 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	0	0	0	0	0	0	
$J_3= 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		0	0	0	0	0	0	
$J_1= 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		14	5.5	9	-16	0	-16	
$J_2= 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(\infty)$	14	5.5	9	-16	0	-16	
$J_3= 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		14	5.5	9	-16	0	-16	
$J_1= 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		26	18.2	40	20	12	26	(6.206)
$J_2= 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f_{max}$	34	18	44	40	26	30	
$J_3= 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		39	20	46	44	47	51	
$J_1= 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		0.21	0.01	0.007	0.1	0.2	0.2	
$J_2= 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$t_{f_{max}}[s]$	1.1	0.015	1.1	1.2	1.2	1.4	
$J_3= 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		1.8	2.2	2	11.8	11.8	11.8	
$J_1= 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		1.6	0.6	1.6	3	2.4	2.4	
$J_2= 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$t_{stab,r}[s]$	3.2	2	3.2	3.2	3.2	3.2	
$J_3= 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		4.9	3.4	4.9	14	14	14	

După reversarea de la regimul de mers în sarcină nominală( reversare care se face în asincron), motorul rămâne sub turația de sincronism (1467.42[*rpm*]). Se realizează apoi sincronizarea motorului care presupune atingerea turației de sincronism(1500[*rpm*]) respectiv trecerea înfășurării de excitație de pe rezistorul de rezistență  $10R_E$  pe sursa de tensiune continuă. În acest moment motorul sincron a fost reversat și adus în sincronism, el funcționând în sarcină nominală.

Rezultatele studiului procesului tranzitoriu de sincronizare a motorului sunt prezentate în tabelul (6.207).

SINCRONIZARE									
$f(t)=$ <i>u. m.</i>	$I_d$ [A]	$I_q$ [A]	$I_D$ [A]	$I_Q$ [A]	$I_E$ [A]	$\omega$ [rad/s]	$I$ [A]	$M_{el\ mag.}$ [Nm]	
$f(0)$	-4.39	-19	0	0	1	307.33	9	16	
$f(\infty)$	8	-0.1	0	0	1	314	8.1	16	(6.207)
$f_{max}$	80	18	27	4.2	3.2	335	63	48	
$t_{f_{max}}[s]$	0.02	0.01	0.015	0.01	0.012	0.05	0.02	0.01	
$t_{stab,r}[s]$	0.44	0.4	0.13	0.1	0.5	0.9	0.33	0.44	

$\Psi_s = \text{ct. ÎNCĂRCARE}$	$f(t) =$	$I_d$	$I_q$	$I_D$	$I_Q$	$I_E$	$U_E$	$\omega$	$\Omega$	$\theta$	$I$	$M_{elmag.}$
BRUSCĂ 50%-100% $M_N$	<i>u. m.</i>	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[V]	[rad/s]	[rad/s]	[rad]	[A]	[Nm]
$J_1 = 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	-0.61	3.24	0	0	1.24	51.2	314	157	0.188	1.9	8
	$f(\infty)$	-3.82	5.65	0	0	1.32	54.5	312.83	156.41	0.343	3.94	16
	$f_{\max}$	16.6	6.3	3.2	0.4	2.07	54.5	314	161	0.395	13.7	23
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.01	0.037	0.008	0.02	0.014	0.7	0	0.04	0.03	0.01	0.03
	$t_{\text{stab.}f}[s]$	0.7	0.7	0.5	0.5	0.7	0.7	1	0.7	0.7	0.42	0.72
$J_2 = 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	-0.61	3.24	0	0	1.24	51.2	314	157	0.188	1.9	8
	$f(\infty)$	-3.82	5.65	0	0	1.32	54.5	312.83	156.4	0.343	3.94	16
	$f_{\max}$	13.4	6.4	2.7	0.3	1.86	54.5	314	157.1	0.39	11	20.5
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.01	0.13	0.01	0.001	0.012	0.7	0	0.17	0.12	0.01	0.11
	$t_{\text{stab.}f}[s]$	2	2	1.2	1.6	2	0.7	1	2	2.5	1.9	2.5
$J_3 = 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	-0.61	3.24	0	0	1.24	51.2	314	157	0.188	1.9	8
	$f(\infty)$	-3.82	5.65	0	0	1.32	54.5	312.83	156.4	0.343	3.94	16
	$f_{\max}$	13.2	3.4	2.65	0.3	1.85	54.5	314	157	0.435	10.6	21
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.01	0.015	0.01	0.001	0.012	0.7	0	0	0.56	0.01	0.5
	$t_{\text{stab.}f}[s]$	6.5	7	1.6	3	7	0.7	1	6.5	7	7	7

(6.208), (6.209)

$\Psi_r = \text{ct. ÎNCĂRCARE}$	$f(t) =$	$I_d$	$I_q$	$I_D$	$I_Q$	$U_b$	$\omega$	$\Omega$	$\theta$	$I$	$M_{elmag.}$
BRUSCĂ 50%-100% $M_N$	<i>u. m.</i>	[A]	[A]	[A]	[A]	[V]	[rad/s]	[rad/s]	[rad]	[A]	[Nm]
$J_1 = 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	-1.73	3.69	0	0	380	382.73	191.3	0.271	2.35	8
	$f(\infty)$	-1.73	7.39	0	0	425.25	349	174.5	0.433	4.38	16
	$f_{\max}$	8.2	9.5	0.65	0.28	425.25	382.73	191.3	0.62	8	21
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.02	0.015	0.02	0.015	0.8	0	0	0.04	0.06	0.3
	$t_{\text{stab.}f}[s]$	5	5	4.5	5	0.8	0.8	5	5	5	5
$J_2 = 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	-1.73	3.69	0	0	380	382.73	191.3	0.271	2.35	8
	$f(\infty)$	-1.73	7.39	0	0	425.25	349	174.5	0.433	4.38	16
	$f_{\max}$	5.5	13	0.6	0.3	425.25	382.73	191.3	0.94	12	28
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.35	0.3	0.4	0.2	0.8	0	0	0.6	0.3	0.6
	$t_{\text{stab.}f}[s]$	7	9	6.5	8	0.8	0.8	8	8	7	8
$J_3 = 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	-1.73	3.69	0	0	380	382.73	191.3	0.271	2.35	8
	$f(\infty)$	-1.73	7.39	0	0	425.25	349	174.5	0.433	4.38	16
	$f_{\max}$	29.5	19	2.5	0.85	425.25	382.73	191.3	1.9	24	42
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.28	0.4	0.25	0.4	0.8	0	0	0.61	0.2	0.45
	$t_{\text{stab.}f}[s]$	13	15	9	10	0.8	0.8	14	15	14.5	15

$\Psi_s = \text{ct. ÎNCĂRCARE}$	$f(t) =$	$I_d$	$I_q$	$I_D$	$I_Q$	$I_E$	$U_E$	$\omega$	$\Omega$	$\theta$	$I$	$M_{elmag.}$
BRUSCĂ 50%-100% $M_N$	<i>u. m.</i>	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[V]	[rad/s]	[rad/s]	[rad]	[A]	[Nm]
$T_{i1} = 0.01[s]$	$f(0)$	-0.617	3.24	0	0	1.24	51.228	314	157	0.188	1.9	8
	$f(\infty)$	-3.82	5.65	0	0	1.32	54.516	312.83	156.41	0.343	3.943	16
	$f_{\max}$	16.8	6.15	3.15	0.39	2.13	54.516	314	160	0.384	13.2	22.07
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.1	0	0.08	0.03	0.01	0.03
	$t_{\text{stab},f}[s]$	0.8	0.85	0.5	0.56	0.75	0.1	0.1	0.7	0.75	0.4	0.68
$T_{i2} = 0.1[s]$	$f(0)$	-0.617	3.24	0	0	1.24	51.228	314	157	0.188	1.9	8
	$f(\infty)$	-3.82	5.65	0	0	1.32	54.516	312.83	156.41	0.343	3.943	16
	$f_{\max}$	16.6	6.3	3.2	0.4	1.88	54.516	314	120.7	0.39	13.5	22.08
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.01	0.1	0.01	0.02	0.01	0.7	0	0.08	0.03	0.01	0.03
	$t_{\text{stab},f}[s]$	0.8	0.85	0.5	0.56	0.75	0.7	0.75	0.7	0.75	0.4	0.68
$T_{i3} = 1[s]$	$f(0)$	-0.617	3.24	0	0	1.24	51.228	314	157	0.188	1.9	8
	$f(\infty)$	-3.82	5.65	0	0	1.32	54.516	312.83	156.41	0.343	3.943	16
	$f_{\max}$	12.2	6.35	3.15	0.4	1.64	54.516	314	322	0.394	13.7	23
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.02	0.15	0.01	0.02	0.02	5	0	0.08	0.03	0.01	0.03
	$t_{\text{stab},f}[s]$	4	5	0.5	0.56	5	5	5	4.8	4.4	0.4	0.68

(6.210)

$\Psi_r = \text{ct. ÎNCĂRCARE}$	$f(t) =$	$I_d$	$I_q$	$I_D$	$I_Q$	$U_b$	$\omega$	$\Omega$	$\theta$	$I$	$M_{elmag.}$
BRUSCĂ 50%-100% $M_N$	<i>u. m.</i>	[A]	[A]	[A]	[A]	[V]	[rad/s]	[rad/s]	[rad]	[A]	[Nm]
$T_{i1} = 0.01[s]$	$f(0)$	-1.73	3.69	0	0	380	382.7	191.3	0.271	2.35	8
	$f(\infty)$	-1.73	7.39	0	0	425.2	349	174.5	0.433	4.38	16
	$f_{\max}$	13.5	12.8	1.55	0.68	425.2	382.7	191.3	0.81	10.8	27
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.08	0.08	0.1	0.11	0.03	0	0	0.1	0.09	0.1
	$t_{\text{stab},f}[s]$	5	5.4	5	5	0.08	0.08	5.2	5.1	5.1	5.1
$T_{i2} = 0.1[s]$	$f(0)$	-1.73	3.69	0	0	380	382.7	191.3	0.271	2.35	8
	$f(\infty)$	-1.73	7.39	0	0	425.2	349	174.5	0.433	4.38	16
	$f_{\max}$	11	9.5	0.6	0.28	425.2	382.7	191.3	0.63	8	21
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.06	0.3	0.2	0.1	0.75	0	0	0.05	0.05	0.3
	$t_{\text{stab},f}[s]$	4.9	5.2	5	4.9	0.75	0.75	5	5	5	5
$T_{i3} = 1[s]$	$f(0)$	-1.73	3.69	0	0	380	382.7	191.3	0.271	2.35	8
	$f(\infty)$	-1.73	7.39	0	0	425.2	349	174.5	0.433	4.38	16
	$f_{\max}$	19.5	10.8	1	0.38	425.2	382.7	198	0.88	10.5	22
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.07	0.2	0.1	0.02	5.3	0	0.1	0.04	0.04	0.6
	$t_{\text{stab},f}[s]$	5.8	6	5.5	5.6	5.3	5.1	5.4	5.4	5.5	5.5

(6.211)

Deoarece rezultatele studiului regimurilor tranzitorii prezentate în acest capitol sunt utile din punctul de vedere al solicitărilor electromagnetice care apar în mașina reală, în cele ce urmează se vor trage concluzii și se vor face interpretări pe baza evoluției în timp (dinamicii) numai a mărimilor reale precum: alunecare, turație (sau viteză), curent de excitație, curent real de fază, unghi de sarcină, cuplu electromagnetic, etc.

**În cazul pornirii în asincron a motorului sincron, se constată următoarele:**

-alunecarea scade de la 1 la 0.00002 într-un timp de 1[s] ceea ce implică intrarea în același interval de timp în turația subsincronă de valoare 1499.2[rpm], foarte aproape deci de turația sincronă (vezi figurile 6.2.7, 6.2.8), ceea ce înseamnă un câmp invers slab.

-curentul de fază crește de la 0[A] la 1.2[A] (curentul de gol confirmat de măsurători în laborator) într-un timp de 0.8[s], prezentând un vârf (un maxim) de 2.1[A] (vezi figura 6.2.13). Faptul că curentul de fază se stabilizează mai devreme decât turația (sau alunecarea) cu 0.2[s] arată că constantele de timp electromagnetice sunt mai mici decât cele mecanice (lucru care este cunoscut dar întărit de rezultatele obținute cu modelul matematic prezentat în lucrare).

-cuplul electromagnetic prezintă imediat după conectarea la rețea un vârf de 10[Nm], ceea ce reprezintă o solicitare considerabilă și se stabilizează în circa 1[s] asemeni turației (vezi figura 6.2.14).

-motorul se poate sincroniza doar când tensiunea la borne este cea nominală (egală cu tensiunea nominală a rețelei) respectiv turația rotorului este foarte aproape de turația câmpului învârtitor. Așa cum reiese din figura 6.2.27, mașina intră în sincronism după circa 1[s] de la conectarea excitației la sursa de tensiune continuă.

-curentul de excitație (vezi figura 6.2.32) atinge un maxim de 3.4[A] (de peste 2 ori curentul nominal) solicitând electromagnetic și termic înfășurarea de excitație dar pe o durată scurtă de timp (0.6[s]) care este timpul până la stabilizare.

-curentul real atinge un maxim de 46[A] (de 10 ori curentul nominal, vezi figura 6.2.33) iar cuplul electromagnetic un vârf de 84[Nm] (de 5.3 ori cuplul nominal, vezi figura 6.2.34) ceea ce reprezintă solicitări considerabile pentru mașină.

-înfășurările de amortizare preiau o parte destul de însemnată din solicitările care apar în mașină, așa cum reiese din figurile 6.2.30 respectiv 6.2.31.

**În cazul încărcării bruște a motorului sincron, se constată următoarele:**

-datorită faptului că valorile proprii ale sistemului de ecuații diferențiale care modelează încărcarea bruscă de sarcină a motorului sincron (pe toată plaja de încărcare și pentru toate cele trei valori ale lui  $J$  considerate în acest capitol, a se vedea relația 6.46) au toate partea reală negativă, rezultă că sistemul este stabil (a se vedea tabelele 6.43-6.45).

-curentul de excitație pornește de la valoarea de 1[A] (valoare inițial fixată) și se stabilizează tot la valoarea de 1[A] (valoare finală), după ce prezintă o evoluție oscilatorie interpretată în cele ce urmează:

-la încărcarea cu 25% $M_N$ , curentul de excitație are vârful cel mai pronunțat (1.08[A]) pentru  $J_1 = 0.008663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ , timpul de stabilizare fiind cel mai mic (1.8[s]). La cealaltă extremă (pentru  $J_3 = 0.8663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ ), curentul de excitație prezintă un vârf de 1.04[A] iar timpul de stabilizare este mult mai mare și anume 35[s]. Așa cum se poate observa de pe graficul figurei 6.2.37, cealaltă situație prezentată cu  $J_2 = 0.08663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$  este o situație de mijloc (nici timpi de stabilizare mici cum s-ar dori, dar nici vârfurile de șoc cele mai mari cum se preferă).

-la încărcarea cu 50% $M_N$ , 75% $M_N$ , 100% $M_N$  respectiv limita de stabilitate situația, între cele trei cazuri introduse prin  $J_1, J_2, J_3$ , rămâne aceeași (evident că valorile vârfurilor de șoc cresc semnificativ cu încărcarea pentru aceeași valoare a lui  $J$  și timpii de stabilizare sunt mai mici pentru încărcări din ce în ce mai mari la valori din ce în ce mai mari ale lui  $J$ ) (a se vedea figurile 6.2.37, 6.2.46, 6.2.55, 6.2.64, 6.2.73 respectiv tabelele 6.192-6.196).

-și pentru unghiul de sarcină  $\theta$  sunt valabile aceleași observații de mai sus, în plus adăugându-se faptul că pendulările motorului sincron (așa cum se poate observa și din evoluțiile lui  $\omega$ ) cresc în amplitudine cu încărcarea,  $\theta$  atingând pragul de stabilitate ( $1.36[\text{rad}] < \theta_{\text{lim.teoretic}} = 1.57[\text{rad}]$ ) pentru  $M_{\text{elmag}} = M_{\text{rezistent}} = 31.7[\text{Nm}]$  ceea ce înseamnă de 1.98 $M_N$  (vezi figurile 6.2.40, 6.2.49, 6.2.58, 6.2.67, 6.2.76).

-din evoluțiile curentului de fază real(vezi figurile 6.2.42, 6.2.51, 6.2.60, 6.2.69, 6.2.78), rezultă următoarele:

-la încărcări în plaja  $M_{el\text{mag}} = 0[Nm] \div M_{el\text{mag},N} = 16[Nm]$ , pentru  $J_1$  diferențele între vârfurile de curent care apar(indiferent de încărcare) sunt foarte mici(sub  $1[A]$ ). Aceste diferențe se amplifică cu creșterea încărcării până la limita de stabilitate în situația când  $J$  crește de la  $J_1$  la  $J_3$ .

-odată cu creșterea încărcării, întârzierea în curent(mai ales când este vorba de vârful maxim de șoc) este din ce în ce mai mare, fenomen care este mai amplu cu creșterea lui  $J$ (deci imediat după încărcare, curentul poate prezenta vârfuri mari dar *nu poate varia brusc* mai ales la sarcini și momente de inerție mari).

-la aceeași încărcare, frecvența oscilațiilor este cu atât mai mică cu cât  $J$  este mai mare dar pe de altă parte unor frecvențe de oscilație mici corespund timpi de stabilizare mari.

-cuplul electromagnetic(a cui evoluție se prezintă în figurile 6.2.43, 6.2.52, 6.2.61, 6.2.70, 6.2.79) lasă și el să se desprindă concluzii și interpretări interesante și importante precum următoarele:

-solicitările în cuplu care apar sunt, după cum se desprinde din grafice, foarte mari, mult mai mari decât cuplul nominal, mai ales la sarcini mari. La valori mici ale momentului de inerție axial, înregistrându-se cele mai mari vârfuri de șoc, acestea pot să ducă în definitiv la torsionarea sau chiar ruperea arborelui mașinii, chiar dacă durata acestora este scurtă(de ordinul milisecundelor). La valori mari ale momentului de inerție axial, chiar dacă solicitările electromagnetice și mecanice sunt puțin mai mici ca amplitudine, acestea având o durată de acțiune mult mai mare și corelate cu fenomenele de rezonanță mecanică care apar pot să ducă la distrugerea mașinii.

-atât solicitările de scurtă durată dar de mare amplitudine și frecvență, cazul încărcărilor bruște mari de sarcină cu momente de inerție de valoare mică, cât și solicitările de amplitudine mai mică dar de durată mai mare, chiar dacă frecvența acestora este și ea mai mică, cazul încărcărilor bruște mici și medii de sarcină cu momente de inerție de valoare mare nu sunt de dorit în funcționarea sistemelor de acționare electrică în regimuri tranzitorii(dinamice) deoarece pot să ducă la distrugerea: electromagnetică prin apariția de forțe care prin mișcarea de rotație a rotorului se manifestă ca și forțe centrifuge care smulg înfășurările din crestături, termică, prin efect Joule-Lenz(prin încălzirea înfășurărilor și a mașinii în general) și mecanică(solicitări mecanice în arborele mașinii, în lagăre precum și eventuale fricțiuni la nivelul întrefierului).

-înfășurările de amortizare preiau o parte însemnată dar nu suficientă în raport cu solicitările care apar în mașină.

#### **În cazul descărcării bruște a motorului sincron, se constată următoarele:**

-datorită faptului că valorile proprii ale sistemului de ecuații diferențiale care modelează descărcarea bruscă de sarcină a motorului sincron(pe toată plaja de descărcare și pentru toate cele trei valori ale lui  $J$  considerate în acest capitol, a se vedea relația 6.46) au toate partea reală negativă, rezultă că sistemul este stabil(a se vedea tabelele 6.43-6.45).

-curentul de excitație pornește de la valoarea de  $1[A]$ (valoare inițial fixată) și se stabilizează tot la valoarea de  $1[A]$ (valoare finală), după ce prezintă o evoluție oscilatorie interpretată în cele ce urmează:

-la descărcarea de la  $100\%M_N$  la  $0\%M_N$ , curentul de excitație are vârful cel mai pronunțat( $1.22[A]$ ) pentru  $J_2$ , timpul de stabilizare fiind cel mai mare( $15[s]$ ). La cealaltă extremă(pentru  $J_1$ ), curentul de excitație prezintă un vârf de  $1.06[A]$  iar timpul de stabilizare este mult mai mic și anume  $2.2[s]$ . Așa cum se poate observa de pe graficul figurei 6.2.118, cealaltă situație prezentată cu  $J_3$  este o situație extremă nedorită(timpi de stabilizare mari iar vârfurile de șoc sunt mari sunt destul de mari și ele).

-la descărcarea de la  $100\%M_N$  la  $75\%M_N$ ,  $50\%M_N$ , respectiv  $0\%M_N$ , situația, între cele trei cazuri introduse prin  $J_1, J_2, J_3$ , rămâne aceeași(evident ca valorile vârfurilor de șoc cresc semnificativ cu descărcarea pentru aceeași valoare a lui  $J$  și timpii de stabilizare sunt mai mari pentru descărcări din ce în ce mai mari la valori din ce în ce mai mari ale lui  $J$ )(a se vedea figurile 6.2.91, 6.2.100, 6.2.109, 6.2.118, respectiv tabelele 6.197-6.200).

-și pentru unghiul de sarcină  $\theta$  sunt valabile aceleași observații de mai sus, în plus adăugându-se faptul că pendulările motorului sincron(așa cum se poate observa și din evoluțiile lui  $\omega$ ) cresc foarte puțin în amplitudine dar semnificativ în durată cu descărcarea(vezi figurile 6.2.94, 6.2.103, 6.2.112, 6.2.121).

-din evoluțiile curentului de fază real(vezi figurile 6.2.96, 6.2.105, 6.2.114, 6.2.123), rezultă următoarele:

-la descărcări în plaja  $M_{elmag} = M_{elmag.N} = 16[Nm] \div M_{elmag} = 0$  pentru  $J_1$  diferențele între vârfurile de curent care apar(indiferent de descărcare) sunt semnificative(de  $2[A]$ ).

-odată cu creșterea gradului de descărcare, întârzierea în curent, mai ales când este vorba de valori mari ale lui  $J$ , este din ce în ce mai mare, deci imediat după încărcare, curentul poate prezenta vârfuri mari dar *nu poate varia brusc* mai ales la salturi mari ale sarcinii(a se vedea figurile 6.2.96', 6.2.105', 6.2.114', 6.2.123').

-la aceeași încărcare, frecvența oscilațiilor este cu atât mai mică cu cât  $J$  este mai mare dar pe de altă parte unor frecvențe de oscilație mici corespund timpi de stabilizare mari.

-cuplul electromagnetic(a cui evoluție se prezintă în figurile 6.2.97, 6.2.106, 6.2.115, 6.2.124) lasă și el să se desprindă concluzii și interpretări următoare:

-solicitările în cuplu care apar sunt, după cum se desprinde din grafice, nu foarte mari ele nedepășind cuplul nominal al mașinii. Atât la valori mari cât și la valori mici ale momentului de inerție axial, solicitările electromagnetice și mecanice sunt mici ca amplitudine, deci acestea nu pot să producă deteriorări ale mașinii dar având o durată de acțiune destul de mare(de ordinul zecilor de secunde la valori mari ale lui  $J$  și la descărcări bruște de valori mari) și corelate cu fenomenele de rezonanță mecanică care apar, care pot să ducă la amplificarea oscilațiilor și a timpilor de stabilizare, în timp se poate ajunge la distrugerea mașinii.

- se poate concluziona că descărcările bruște de sarcină nu sunt la fel de periculoase ca încărcările bruște de sarcină, dar trebuie luate în considerare sub aspectul solicitărilor care pot să apară în timp(ca durată de regim tranzitoriu) dar și pe întreaga durată de exploatare(care este de ordinul anilor sau chiar zecilor de ani).

-înfășurările de amortizare preiau o parte destul de redusă în raport cu solicitările care apar în mașină, lucru care se explică prin faptul că la mașina sincronă de față, colivia de amortizare este destul de "slabă".

#### **În cazul reversării motorului sincron, se constată următoarele:**

-la reversarea din gol, turația(vezi figura 6.2.132)(după cum rezultă și din alunecare, figura 6.2.131) pornește de la 1500[rpm] și schimbă de semn după 0.7[s]( $J_1$ ); 6.7[s]( $J_2$ ); 23[s]( $J_3$ ) după care crește, prezentând mici oscilații, până la turația subsincronă(1493.27[rpm]), moment după care mașina sincronă intră în sincronism(a se vedea figura 6.2.144). La reversarea din sarcină nominală, turația(vezi figura 6.2.154) prezintă oscilații ceva mai mari(în special pentru valori mici ale lui  $J$ ) dar schimbă de semn și ajunge la turația subsincronă(1467.42[rpm]) mult mai repede, acest lucru fiind valabil și pentru celelalte mărimi care caracterizează dinamica mașinii reale. Acest lucru se explică prin faptul că înainte de reversare exista un cuplu rezistent de semn opus cuplului electromagnetic iar imediat după momentul reversării cuplul electromagnetic schimbă de semn(având același semn cu cuplul rezistent) și în acest fel cuplul rezistent contribuie alături de cel electromagnetic la accelerarea rotorului până la intrarea în turație. Cu cât sarcina(cuplul rezistent activ) este mai mare respectiv  $J$  este de asemenea mai mare, cu atât reversarea se face mai rapid dar oscilațiile în turație și în curenți sunt mai mari respectiv vârfurile de curent sunt foarte mari(de 10 – 15 ori curentul nominal, vezi figura 6.2.159) și de asemenea vârfurile de cuplu sunt mari(de 4 – 5 ori cuplul nominal, vezi figura 6.2.160).

-la sincronizarea motorului sincron în cazul reversării din sarcină nominală maximul curentului de fază real(a se vedea figurile 6.2.167, 6.2.145) atinge valoarea de 63[A] pe când în cazul reversării din gol acesta este de 45[A], timpii de stabilizare fiind comparativi(de ordinul 0.4[s]). După cum se observă, se pot atinge deci valori extrem de mari ale curentului de fază de până la 15 ori curentul nominal, valori foarte periculoase pentru mașină, toate acestea în condițiile în care procesul sincronizării începe după ce regimul tranzitoriu de reversare s-a stabilizat, după circa 3[s], caz favorabil față de situația în care procesul sincronizării ar începe înainte ca procesul tranzitoriu de reversare să fie încetat, când cu siguranță solicitările ar fi mult mai mari.

-tot la sincronizarea motorului sincron în cazul reversării din sarcină nominală maximul cuplului electromagnetic(a se vedea figurile 6.2.168, 6.2.146) atinge valoarea de 48[Nm] pe când în cazul reversării din gol acesta este mult mai mare și anume de 73[Nm]. Timpii de stabilizare a cuplului



electromagnetic sunt mult diferiți și anume de ordinul 0.8[s] la reversarea din sarcină nominală și de circa 0.08[s](deci de 10 ori mai puțin) la reversarea din gol. După cum se observă, se pot atinge deci valori extrem de mari ale cuplului electromagnetic de până la 5 ori cuplul nominal al mașinii, valori foarte periculoase pentru mașină.

-atât la reversarea din gol cât și reversarea din sarcină nominală apar deci solicitări în curent și în cuplu foarte mari (de mare amplitudine și de durată) care pot să pună în pericol buna funcționare a sistemelor de acționare electrică, de aceea cunoașterea acestor solicitări impune o dimensionare corespunzătoare precum și trasarea condițiilor cadru (a limitărilor solicitărilor) de lucru încă din faza de proiectare.

**În cazul funcționării la frecvență și tensiune variabile a motorului sincron, se constată următoarele:**

-în urma studiului regimului tranzitoriu de încărcare bruscă de sarcină în cazul funcționării la flux statoric controlat se desprind următoarele concluzii:

-în situația saltului de sarcină prescris (de la  $50\%M_N$  la  $100\%M_N$ ), regulatorul PI (vezi figura 6.3.3- regulatorul RUE) impune o creștere a tensiunii pe excitație ca în figura 6.3.6, timp care este mai mare sau mai mic în funcție de constanta de timp a regulatorului și în care curentul de excitație (vezi figura 6.3.7) atinge valoarea cea mai mare de  $2.12[A]$  pentru  $J_1$ , iar timpul de stabilizare cel mai mare (circa 7[s]) corespunde lui  $J_3$ .

-așa cum se observă în figurile 6.3.8, 6.3.9, colivia de amortizare preia o bună parte din solicitări (ceea ce este bine) mai ales la valori mici ale lui  $J$ .

-la o descreștere de frecvență impusă de regulatul PI (vezi figura 6.3.3- regulatorul R), cele mai ample pulsații în viteză (vezi figura 6.3.11) apar pentru  $J_1$  iar cele mai mari vârfuri de șoc pentru unghiul intern (pendulări, vezi figura 6.3.12) apar pe toată plaja lui  $J(J_1 \div J_3)$ .

-atât curentul de fază cât și cuplul electromagnetic prezintă oscilații mai mari (dar nu periculoase) pentru valori mai mici ale lui  $J$  și mai mici dar de durată (de ordinul secundelor) pentru valori mai mari ale lui  $J$ .

-la modificări ale constantei de timp ale reguletoarelor PI (de pe excitație și de pe frecvența tensiunii statorice) nu se produc diferențe substanțiale asupra evoluției în timp a mărimilor ce caracterizează regimul tranzitoriu (vezi paginile 121-123).

-în urma studiului regimului tranzitoriu de încărcare bruscă de sarcină în cazul funcționării la flux rotor controlat se desprind următoarele concluzii:

-în contrast cu funcționarea la flux statoric controlat, la flux rotor controlat (vezi paginile 119-120) vârfurile de șoc precum și oscilațiile care apar, ca durată, sunt mult mai mari, în special la valori mari ale lui  $J$ .

-și la modificarea constantei de timp a reguletoarelor (vezi figura 6.3.17), de această dată se constată diferențe substanțiale (vezi paginile 124-125) în sensul că pentru  $T_{11} = 0.01[s]$  (reprezentare cu albastru pe grafice) și  $T_{13} = 1[s]$  (reprezentare cu galben pe grafice) (dar mai ales pentru  $T_{13}$ ) se înregistrează oscilații puternice (atât ca amplitudine cât și ca durată în toate mărimile) iar pentru  $T_{12} = 0.1[s]$  (reprezentare cu portocaliu pe grafice) oscilațiile sunt incomparabil mai mici (atât ca amplitudine cât și ca durată).

-în concluzie pentru cazul de față (flux rotor controlat), soluția aleasă pentru comanda și controlul sistemului de acționare electrică cu mașină sincronă este evidentă și anume cea care presupune solicitările cele mai mici cu puțință, condiție îndeplinită de varianta cu  $T_{12} = 0.1[s]$ . Această valoare a constantei de timp asigură reguletoarelor PI o acordare corespunzătoare din punctul de vedere al solicitărilor care apar în timpul procesului tranzitoriu.

## Cap7.MODELAREA ȘI SIMULAREA FUNCȚIONĂRII MAȘINILOR ASINCRONE ÎN REGIM TRANZITORIU UTILIZÂND MODELUL ORTOGONAL

### 7.1.Introducere

În acest capitol se prezintă modelarea și simularea funcționării mașinii asincrone considerate în lucrare (pentru comportării acesteia din punctul de vedere al solicitărilor electromecanice care apar. Interesează atât funcționarea regimul de motor) în diverse regimuri tranzitorii (dinamice) întâlnite în exploatare, în vederea cunoașterii motorului asincron la tensiune și frecvență constante, în procese dinamice precum: pornirea, încărcarea, descărcarea, reversarea, etc, cât și funcționarea acestuia la tensiune și frecvență variabile.

Pentru regimurile de funcționare enumerate mai sus, se studiază și influența modificării momentului de inerție axial al acționării electrice considerate (motor asincron cuplat mecanic cu o mașină de curent continuu) asupra dinamicii proceselor tranzitorii (ca durată și amplitudine), în condițiile modificării cuplului rezistent.

În cazul funcționării la tensiune și frecvență variabile se studiază, pe lângă influența modificării momentului de inerție axial, și influența modificării (valorii) constantelor de timp ale reguletoarelor, asupra proceselor tranzitorii.

### 7.2.Funcționarea mașinii asincrone la tensiune și frecvență constante

În situația alimentării motorului asincron cu tensiune constantă (tensiunea rețelei), respectiv frecvență constantă (frecvența industrială), după pornire, motorul asincron își modifică turația cu sarcina iar peste sarcina nominală, prin încărcare suplimentară, se ajunge la limita de stabilitate la încărcare, când motorul asincron este la limita stabilității în funcționare. După această limită apare regimul de scurtcircuit al motorului asincron.

#### 7.2.1. Modelarea și simularea pornirii motorului asincron

În vederea simplificării scrierii, se fac următoarele notații:

<u>Mărimă</u>	<u>Notăție</u>	<u>Semnificație</u>	(7.1)
$I_d(t)$	= $X(t)$	-curentul statoric din axa d,	
$I_q(t)$	= $Y(t)$	-curentul statoric din axa q,	
$I_{dr}(t)$	= $Z(t)$	-curent rotoric din axa d,	
$I_{qr}(t)$	= $U(t)$	-curent rotoric din axa q,	
$s(t)$	= $s(t)$	-alunecarea,	
$n(t)$	= $n(t)$	-turația,	
$I(t)$	= $I(t)$	-curentul statoric în mașina reală,	
$J(t)$	= $J(t)$	-curentul rotoric în mașina reală,	
$M_{elmag}(t)$	= $M(t)$	-cuplul electromagnetic,	
$M_{rezistent}(t)$	= $T(t)$	-cuplul rezistent,	
$\theta$	= $\theta$	-unghiul de poziție.	

Pe baza parametrilor mașinii asincrone considerate în această lucrare, determinați în capitolul 5, respectiv pe baza ecuațiilor mașinii asincrone prezentate în capitolul 3:(3.12, 3.13, 3.17, 3.18, 3.19), în care se introduc valorile parametrilor determinați anterior, conform cu notațiile(7.1), rezultă următorul sistem de ecuații diferențiale care modelează procesul de pornire al mașinii asincrone:

$$\left. \begin{aligned}
 1.9X + 0.25 \frac{dX}{dt} - 78.5Y + 0.373 \frac{dZ}{dt} - 117.122U &= 380 \\
 78.5X + 1.9Y + 0.25 \frac{dY}{dt} + 117.122Z + 0.373 \frac{dU}{dt} &= 0 \\
 0.373 \frac{dX}{dt} - 117.122sY + 0.928Z + 0.597 \frac{dZ}{dt} - 187.458sU &= 0 \\
 117.122sX + 0.373 \frac{dY}{dt} + 187.458sZ + 0.928U + 0.597 \frac{dU}{dt} &= 0 \\
 2 \cdot 0.373(YZ - XU) - 0 + 0.017663 \cdot 157 \frac{ds}{dt} &= 0 \\
 X(0) &= 0 \\
 Y(0) &= 0 \\
 Z(0) &= 0 \\
 U(0) &= 0 \\
 s(0) &= 1
 \end{aligned} \right\} \quad (7.2)$$

cu următoarea soluție grafică:

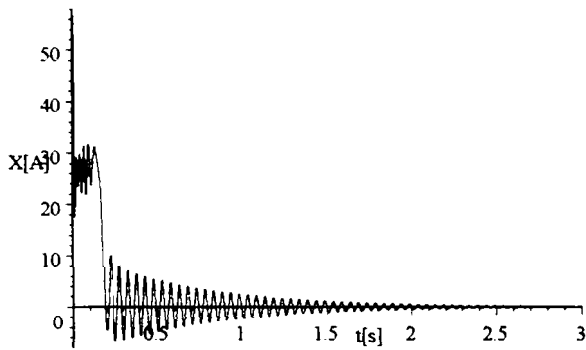


Fig.7.2.1. Variația în timp a lui  $I_d$ .

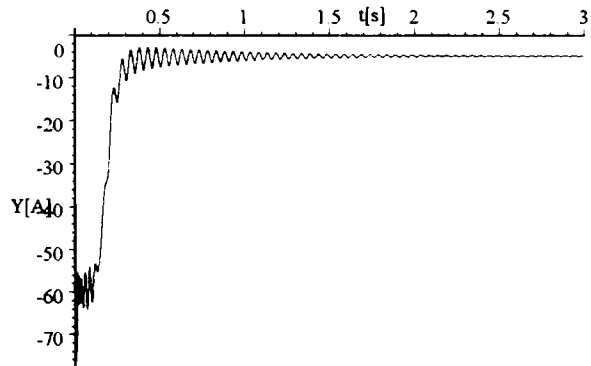


Fig.7.2.2. Variația în timp a lui  $I_q$ .

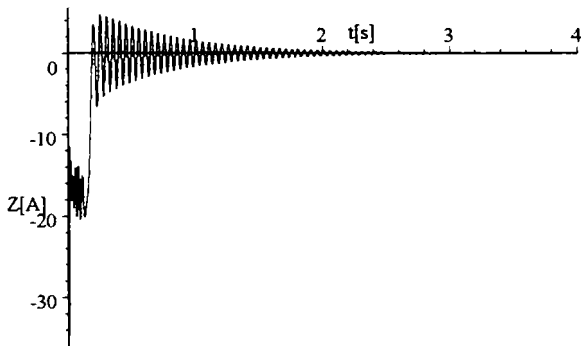


Fig.7.2.3. Variația în timp a lui  $I_{dr}$ .

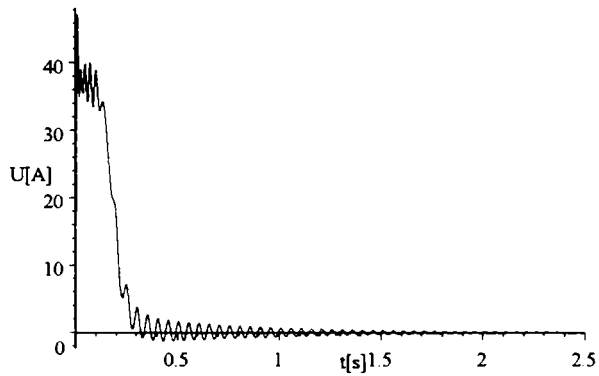


Fig.7.2.4. Variația în timp a lui  $I_{qr}$ .

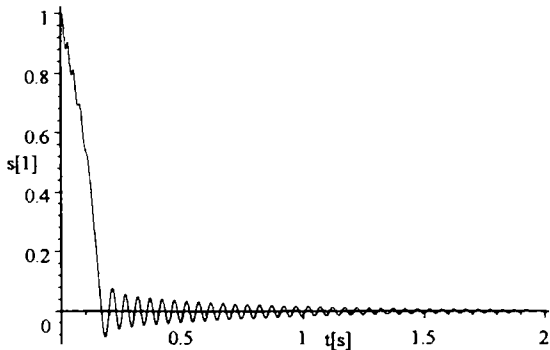


Fig.7.2.5. Variația în timp a lui  $s$ .

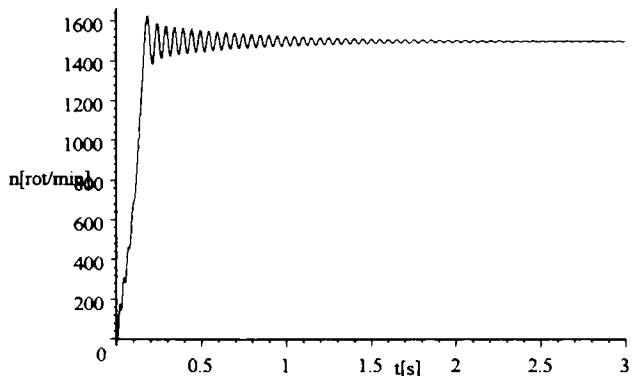


Fig.7.2.6. Variația lui  $n(t) = 1500(1 - s(t))$ .

Variațiile în timp, a curentului statoric respectiv a cuplul electromagnetic în mașina reală, sunt:

$$I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos 314t - Y(t) \sin 314t) \quad (7.3)$$

$$M_{elmag}(t) = M(t) = 2 \cdot 0.373(Y(t)Z(t) - X(t)U(t)) \quad (7.4)$$

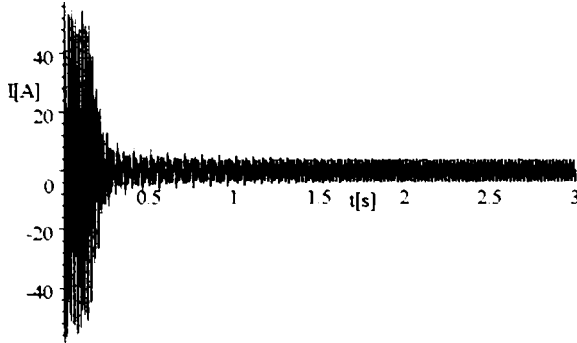


Fig.7.2.7.Variația în timp a lui  $I$ .

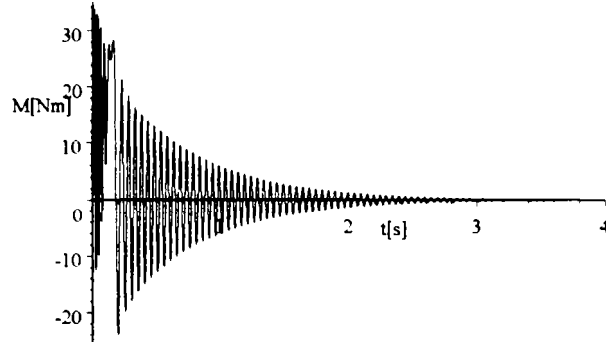


Fig.7.2.8.Variația în timp a lui  $M_{elmag}$ .

Din dorința de a sintetiza toate rezultatele studiului regimurilor tranzitorii prezentate în capitolul 7, și pentru a trage concluzii comparative și cât mai generale, rezultatele și interpretările fenomenologice desprinse din evoluțiile în timp ale mărimilor ce caracterizează procesul tranzitoiu studiat în acest subparagraf sunt prezentate în paragraful 7.4(la sfârșitul capitolului 7).

### 7.2.2.Modelarea și simularea încărcării bruște a motorului asincron

În acest paragraf se prezintă modelarea și simularea încărcării bruște de sarcină a motorului asincron, studiindu-se comportarea dinamică a acestuia în condițiile modificării momentului de inerție axial  $J$ .

Pe baza parametrilor mașinii asincrone, determinați în capitolul 5, respectiv pe baza modelului teoretic al acesteia prezentat în capitolul 3, rezultă următorul model matematic(7.5) care descrie dinamica motorului asincron la o încărcare/descărcare bruscă în condițiile prezentate mai sus și cu notațiile(7.1):

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.9X + 0.25 \frac{dX}{dt} - 78.5Y + 0.373 \frac{dZ}{dt} - 117.122U = -220\sqrt{3} \sin \theta \\ 78.5X + 1.9Y + 0.25 \frac{dY}{dt} + 117.122Z + 0.373 \frac{dU}{dt} = 220\sqrt{3} \cos \theta \\ 0.373 \frac{dX}{dt} - 117.122sY + 0.928Z + 0.597 \frac{dZ}{dt} - 187.458sU = 0 \\ 117.122sX + 0.373 \frac{dY}{dt} + 187.458sZ + 0.928U + 0.597 \frac{dU}{dt} = 0 \\ 2 \cdot 0.373(YZ - XU) - T + J \cdot 157 \frac{ds}{dt} = 0 \\ X(0) = 0 \\ Y(0) = 0 \\ Z(0) = 0 \\ U(0) = 0 \\ s(0) = 0 \end{array} \right. \quad (7.5)$$

Se prezintă(pe baza celor afirmate în capitolul 3) un studiu asupra stabilității(covergenței spre punctul de echilibru final) sistemului de ecuații diferențiale și asupra existenței soluției(punctelor stabile de echilibru).

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.9X + 0.25 \frac{dX}{dt} - 78.5Y + 0.373 \frac{dZ}{dt} - 117.122U = -220\sqrt{3} \sin \theta \\ 78.5X + 1.9Y + 0.25 \frac{dY}{dt} + 117.122Z + 0.373 \frac{dU}{dt} = 220\sqrt{3} \cos \theta \\ 0.373 \frac{dX}{dt} - 117.122sY + 0.928Z + 0.597 \frac{dZ}{dt} - 187.458sU = 0 \\ 117.122sX + 0.373 \frac{dY}{dt} + 187.458sZ + 0.928U + 0.597 \frac{dU}{dt} = 0 \\ 2 \cdot 0.373(YZ - XU) - T + J \cdot 157 \frac{ds}{dt} = 0 \end{array} \right. \quad (7.6)$$

Ecuțiile motorului asincron considerat în lucrare, în regim permanent sunt:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.9X - 78.5Y - 117.122U = -220\sqrt{3} \sin \theta \\ 78.5X + 1.9Y + 117.122Z = 220\sqrt{3} \cos \theta \\ -117.122sY + 0.928Z - 187.458sU = 0 \\ 117.122sX + 187.458sZ + 0.928U = 0 \\ I = \sqrt{X^2 + Y^2} \\ J = \sqrt{Z^2 + U^2} \\ 2 \cdot 0.373(YZ - XU) = M \end{array} \right. \quad (7.7)$$

cu soluția:

$$\left\{ \begin{array}{l} X(s, \theta) = -190525.6 \frac{-2.338281 \times 10^{13} s^2 \cos \theta + 8.345869 \times 10^{12} (\sin \theta) s^2 + 1.591237 \times 10^{12} (\sin \theta) s + 2.045312 \times 10^8 \sin \theta - 8.450368 \times 10^9 \cos \theta}{3.023351 \times 10^{15} s + 3.318712 \times 10^{14} + 7.016512 \times 10^{16} s^2} \\ Y(s, \theta) = 190525.6 \frac{8.345869 \times 10^{12} s^2 \cos \theta + 2.338281 \times 10^{13} (\sin \theta) s^2 + 8.450368 \times 10^9 \sin \theta + 2.045312 \times 10^8 \cos \theta + 1.591237 \times 10^{12} s \cos \theta}{3.023351 \times 10^{15} s + 3.318712 \times 10^{14} + 7.016512 \times 10^{16} s^2} \\ Z(s, \theta) = 1.115737 \times 10^{10} s \frac{4.408 \times 10^5 \cos \theta - 2.494725 \times 10^8 s \cos \theta + 1.8212 \times 10^7 \sin \theta + 8.904255 \times 10^7 (\sin \theta) s}{3.023351 \times 10^{15} s + 3.318712 \times 10^{14} + 7.016512 \times 10^{16} s^2} \\ U(s, \theta) = -1.115737 \times 10^{10} s \frac{2.494725 \times 10^8 (\sin \theta) s - 4.408 \times 10^5 \sin \theta + 1.8212 \times 10^7 \cos \theta + 8.904255 \times 10^7 s \cos \theta}{3.023351 \times 10^{15} s + 3.318712 \times 10^{14} + 7.016512 \times 10^{16} s^2} \\ I(s, \theta) = 1.905256 \times 10^5 \sqrt{\frac{8.785125 \times 10^9 (\sin^2 \theta) s^2 + 8.785125 \times 10^9 s^2 \cos^2 \theta + 2.15296 \times 10^5 \sin^2 \theta + 2.15296 \times 10^5 \cos^2 \theta}{3.023351 \times 10^{15} s + 3.318712 \times 10^{14} + 7.016512 \times 10^{16} s^2}} \\ J(s, \theta) = 1.115737 \times 10^{10} \sqrt{s^2 \frac{\sin^2 \theta + \cos^2 \theta}{3.023351 \times 10^{15} s + 3.318712 \times 10^{14} + 7.016512 \times 10^{16} s^2}} \\ M(s, \theta) = 7.358206 \times 10^{17} s \frac{\sin^2 \theta + \cos^2 \theta}{3.023351 \times 10^{15} s + 3.318712 \times 10^{14} + 7.016512 \times 10^{16} s^2} \end{array} \right. \quad (7.8)$$

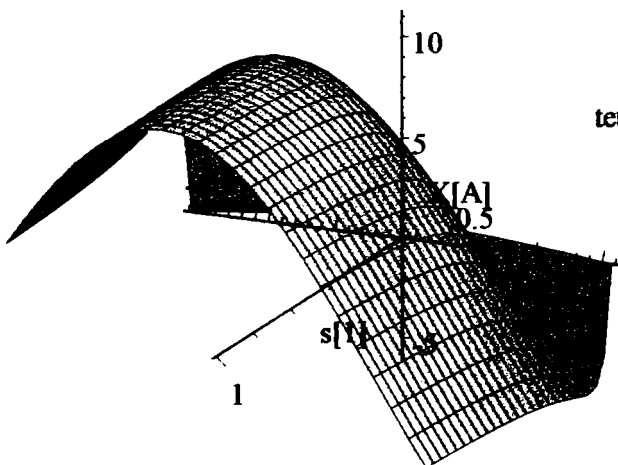


Fig.7.2.9. Variația lui  $I_d(s, \theta)$ .

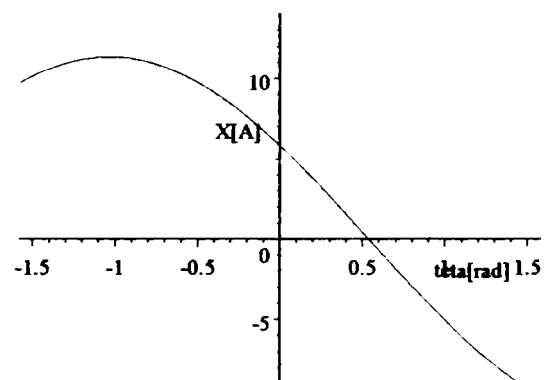


Fig.7.2.10. Variația lui  $I_d(\theta)$  la  $s_N = 0.028$

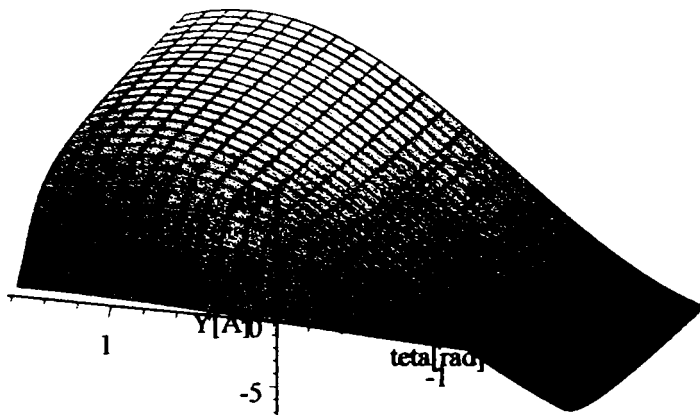


Fig.7.2.11.Variația lui  $I_q(s, \theta)$ .

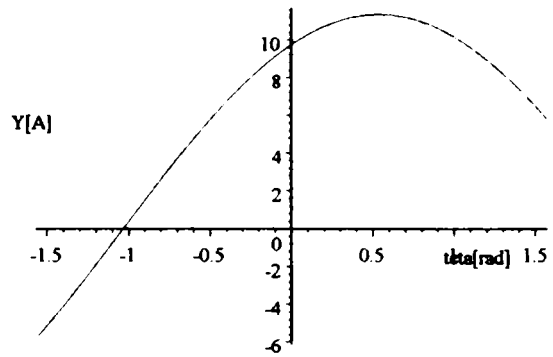


Fig.7.2.12.Variația lui  $I_q(\theta)$  la  $s_N = 0.028$ .

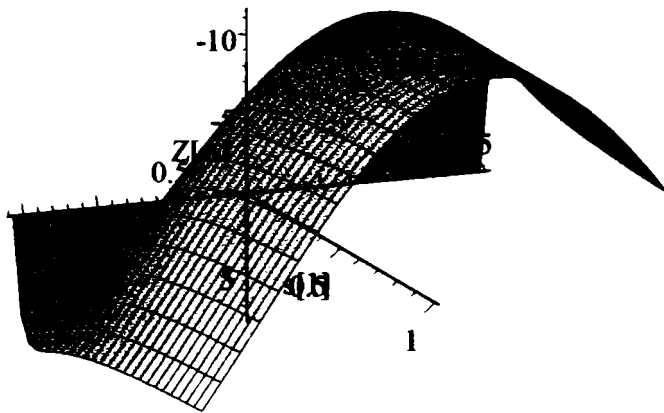


Fig.7.2.13.Variația lui  $I_d(s, \theta)$ .

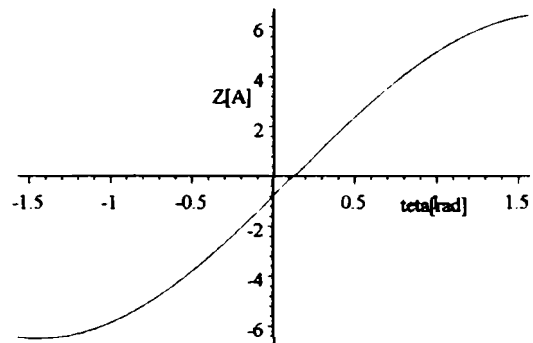


Fig.7.2.14.Variația lui  $I_d(\theta)$  la  $s_N = 0.028$ .

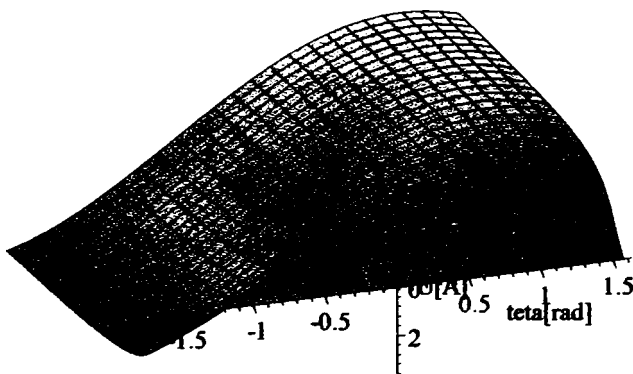


Fig.7.2.15.Variația lui  $I_{qr}(s, \theta)$ .

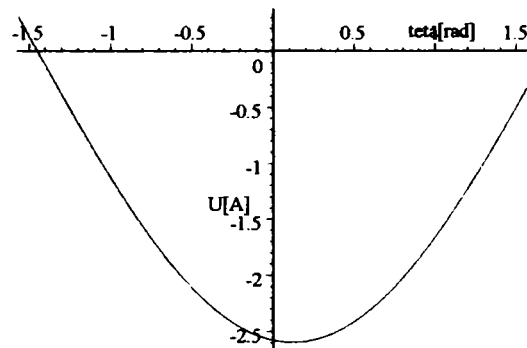


Fig.7.2.16.Variația lui  $I_{qr}(\theta)$  la  $s_N = 0.028$

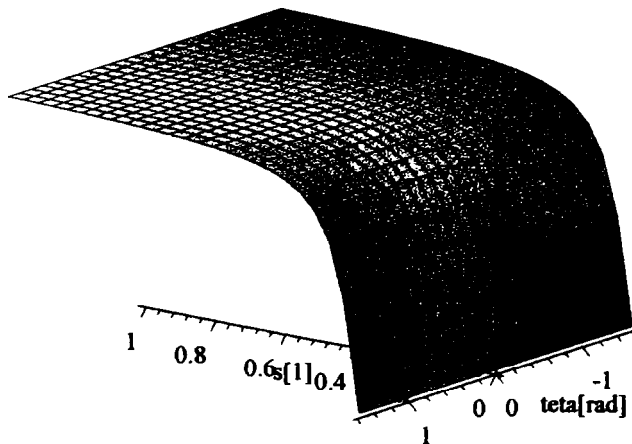


Fig.7.2.17.Variația lui  $I(s, \theta)$ .

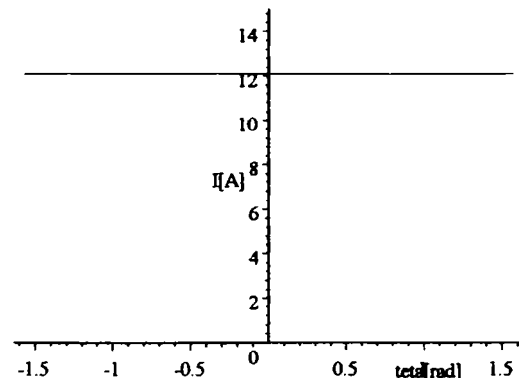


Fig.7.2.18.Variația lui  $I(\theta)$  la  $s_N = 0.028$ .

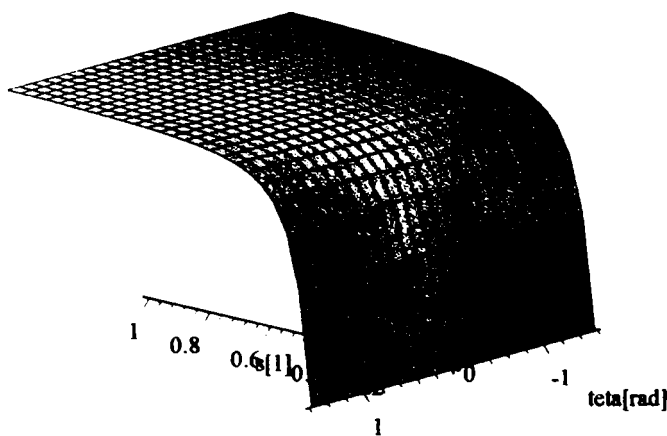


Fig.7.2.19. Variația lui  $J(s, \theta)$ .

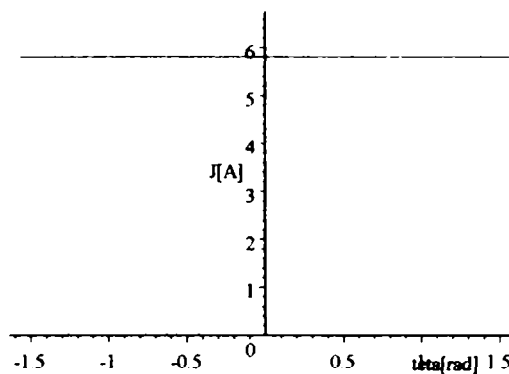


Fig.7.2.20. Variația lui  $J(\theta)$  la  $s_N = 0.028$ .

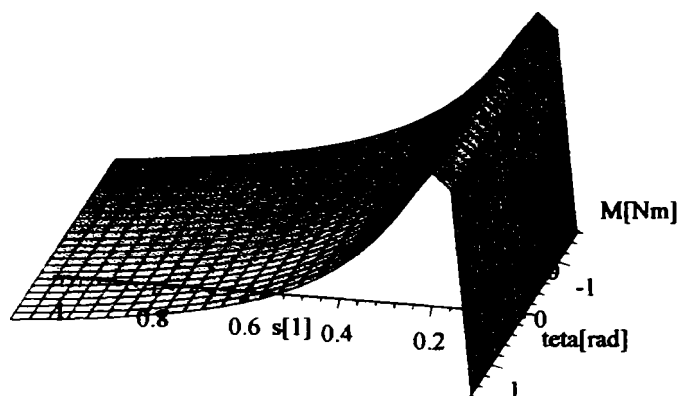


Fig.7.2.21. Variația lui  $M_{el\text{mag.}}(s, \theta)$ .

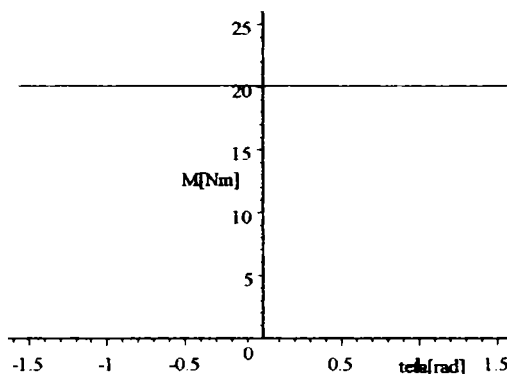


Fig.7.2.22. Variația lui  $M_{el\text{mag.}}(\theta)$  la  $s_N = 0.028$ .

Din reprezentările grafice de mai sus se poate observa că componentele după cele două axe ale modelului ortogonal ale curentului statoric respectiv curentului rotoric ( $I_d, I_q, I_{dr}, I_{qr}$ ) depind atât de alunecarea  $s$  cât și de unghiul  $\theta$ , pe când curentul statoric, curentul rotoric respectiv cuplul electromagnetic în mașina reală *nu depind de unghiul  $\theta$* , ci numai de alunecarea  $s$ . În consecință, oricare ar fi  $\theta \in (-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$ , acesta nu influențează valorile curenților respectiv cuplului electromagnetic în mașina reală. Matricea  $A$  formată din coeficienții derivatelor din sistemul de ecuații diferențiale(7.6) are un determinant foarte mic(care tinde spre zero) ceea ce impune o computație cu un număr de zecimale foarte mare pentru a evita nedeterminările care apar (împărțiri cu zero).

$$A = \begin{pmatrix} 0.25 & 0 & 0.373 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0 & 0.373 \\ 0.373 & 0 & 0.597 & 0 \\ 0 & 0.373 & 0 & 0.597 \end{pmatrix}, \text{determinant } 0.0001024346 \neq 0 \quad (7.9)$$

După separarea derivatelor în membrul stâng, sistemul de ecuații diferențiale(pentru  $\theta = -\pi/2$ )devine:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dX}{dt} = -112.07X + 4630.42Y + 6908.58U + 22476.79 - 4316.42sY + 34.2Z - 6908.58sU \\ \frac{dY}{dt} = -4630.42X - 112Y - 6908.58Z + 4316.42sX + 6908.58sZ + 34.2U \\ \frac{dZ}{dt} = 70.02X - 2893Y - 4316.42U - 14043.29 + 2893sY - 22.92Z + 4630.42sU \\ \frac{dU}{dt} = -2893sX + 2893X + 70.02Y + 4316.42Z - 4630.42sZ - 22.92U \\ \frac{ds}{dt} = 1.27 \times 10^{-5} \frac{-373YZ + 373XU + 500T}{J} \end{array} \right. \quad (7.10)$$

În sistemul de ecuații de mai sus(7.10), se observă că termenii care conțin pe  $T$  (cuplul rezistent) sunt constanți pentru orice valori ale lui  $T \in (0 \div T_N \approx 20.1)[Nm]$ , ca atare ei sunt termeni liberi în ecuațiile sistemului, deci nu influențează stabilitatea sistemului de ecuații decisă de valorile proprii ale matricii  $G$ .

Matricea  $G$  se formează din coeficienții funcțiilor(din membrul drept) ale sistemului de ecuații(7.10), obținându-se următoarea formă:

$$G = \begin{pmatrix} -112.07 & 4630.42 - 4316.42s & 34.2 & 6908.58 - 6908.58s & 0 \\ -4630.42 + 4316.42s & -112 & -6908.58 + 6908.58s & 34.2 & 0 \\ 70.02 & -2893 + 2893s & -22.92 & -4316.42 + 4630.42s & 0 \\ -2893s + 2893 & 70.02 & 4316.42 - 4630.42s & -22.92 & 0 \\ 1.27 \times 10^{-5} \frac{373U}{J} & 1.27 \times 10^{-5} \frac{-373Z}{J} & 1.27 \times 10^{-5} \frac{-373Y}{J} & 1.27 \times 10^{-5} \frac{373X}{J} & 0 \end{pmatrix} \quad (7.11)$$

Se observă că stabilitatea sistemului depinde de punctul de funcționare al mașinii asincrone(definit de valorile funcțiilor  $X, Y, Z, U, s$  în punctul respectiv, care sunt de altfel condițiile inițiale și finale ale sistemului de ecuații diferențiale).Se observă că stabilitatea sistemului nu depinde de valoarea momentului de inerție axial  $J$ , acesta influențând doar partea imaginară a valorilor proprii.

În tabelul următor se dau valorile proprii în 5 puncte de funcționare(din domeniul de interes:  $0\%M_N \div 100\%M_N$ ) pentru 3 valori (cele mai semnificative) ale momentului de inerție axial  $J$ .

$J$ [kg · m <sup>2</sup> ]	punctul de funcționare	$X$ [A]	$Y$ [A]	$Z$ [A]	$U$ [A]	$s$ [A]	valorile proprii
$J_1 = 0.017663$ $J_2 = 0.17663$ $J_3 = 1.7663$	$0\%M_N$	0	0	0	0	0	$\left\{ \begin{array}{l} -114.2 + 306.8j \\ -114.2 - 306.8j \\ -20.7 + 7.1j \\ -20.7 - 7.1j \\ -47.7 \end{array} \right.$
$J_1 = 0.017663$ $J_2 = 0.17663$ $J_3 = 1.7663$	$25\%M_N$	2.210	-4.816	-1.403	0.01	0.002	$\left\{ \begin{array}{l} -114.2 + 306.8j \\ -114.2 - 306.8j \\ -20.7 + 7.8j \\ -20.7 - 7.8j \\ -47.7 \end{array} \right.$
$J_1 = 0.017663$ $J_2 = 0.17663$ $J_3 = 1.7663$	$50\%M_N$	4.355	-4.917	-2.839	0.11	0.004	$\left\{ \begin{array}{l} -114.2 + 306.8j \\ -114.2 - 306.8j \\ -20.7 + 8.6j \\ -20.7 - 8.6j \\ -47.7 \end{array} \right.$



$J$ [kg · m <sup>2</sup> ]	punctul de funcționare	$X$ [A]	$Y$ [A]	$Z$ [A]	$U$ [A]	$s$ [A]	valorile proprii
$J_1 = 0.017663$	75% $M_N$	6.558	-5.168	-4.312	0.317	0.007	$\left\{ \begin{array}{l} -114.2 + 306.7j \\ -114.2 - 306.7j \\ -20.7 + 9.5j \\ -20.7 - 9.5j \\ -47.7 \end{array} \right.$
$J_2 = 0.17663$							
$J_3 = 1.7663$							
$J_1 = 0.017663$	100% $M_N$	8.825	-5.585	-5.824	0.633	0.028	$\left\{ \begin{array}{l} -114.2 + 306.7j \\ -114.2 - 306.7j \\ -20.7 + 10.3j \\ -20.7 - 10.3j \\ -47.7 \end{array} \right.$
$J_2 = 0.17663$							
$J_3 = 1.7663$							

(7.12)

Din tabelul de mai sus se poate observa că toate valorile proprii în cele 5 puncte de echilibru (pentru toate cele 3 valori ale lui  $J$ ) au partea reală negativă, de unde se poate trage concluzia că cele 5 puncte de funcționare sunt puncte de echilibru (funcționare) stabile, respectiv sistemul de ecuații diferențiale analizat(a se vedea relația 7.5), din punctul de vedere al stabilității este stabil. Plecând de la cele afirmate mai sus, se poate trage o concluzie cu caracter mai general și anume că sistemul de ecuații diferențiale analizat este stabil pe toată plaja determinată de cele 5 puncte de funcționare(de la mersul în gol până la încărcare nominală), respectiv cele 3 valori ale lui  $J$ (pe toată această plajă, valorile proprii au partea reală negativă):

( $J_1 = J_{motor} = 0.017663[\text{kg} \cdot \text{m}^2] \div J_3 = 100 \cdot J_1 = 1.7663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ ) care au fost alese.

Problema stabilității fiind rezolvată se trece la soluționarea sistemului de ecuații diferențiale.

După cum se poate observa din sistemul de ecuații (7.5), pentru un anume cuplu rezistent la arbore( $T$  dat), mărimile din model sunt funcții de două variabile: de timp și de  $J$ . Pe baza acestei constatări, se poate afirma că influența modificării momentului de inerție axial asupra dinamicii funcționării motorului asincron în diverse regimuri tranzitorii (în cazul de față încărcare bruscă) se rezumă la o reprezentare spațială (3D) a mărimilor care interesează.

Datorită faptului că aceste reprezentări amintite mai sus se constituie în fond în suprafețe oscilante (cu o frecvență foarte mare) în spațiu, a cărei evoluție este foarte dificil de reprezentat dar și de urmărit, se consideră pentru  $J$  doar trei valori care sunt cele mai semnificative în intervalul de variație al acestuia și anume:  $J_1 = 0.017663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ ;  $J_2 = 0.17663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ ;  $J_3 = 1.7663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ .

Variațiile în timp ale mărimilor în procesele tranzitorii se vor reprezenta pe grafice ca fiind diferențiate prin culoare, după cum rezultă din legenda care urmează:

pentru	corespunde	culoarea
$J = J_1 = 0.017663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	→	negru
$J = J_2 = 0.17663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	→	roșu
$J = J_3 = 1.7663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	→	verde

(7.13)

Pentru cele cinci puncte de funcționare stabilă(la 0%,25%,50%,75% și 100% din  $M_N$ ) a motorului asincron, se determină mărimile de regim staționar care nu sunt altceva decât condiții inițiale sau finale pentru sistemul de ecuații diferențiale. Acest lucru se realizează prin anularea derivatelor sistemului de ecuații diferențiale, rezultând următorul sistem algebric (pentru  $\theta = -\pi/2$ ):

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.9X - 78.5Y - 117.122U = 220\sqrt{3} \\ 78.5X + 1.9Y + 117.122Z = 0 \\ -117.122sY + 0.928Z - 187.458sU = 0 \\ 117.122sX + 187.458sZ + 0.928U = 0 \\ 2 \cdot 0.373(YZ - XU) - T = 0 \\ \sqrt{X^2 + Y^2} = I \\ 2 \cdot 0.373(YZ - XU) = M \\ 1500(1 - s) = n \end{array} \right. \quad (7.14)$$

de unde rezultă:

T[Nm]	X[A]	Y[A]	Z[A]	U[A]
= 0% $M_N = 0[Nm]$	0	0	0	0
= 25% $M_N = 5.025[Nm]$	2.210415	-4.816249	-1.40338	0.0104521
= 50% $M_N = 10.05[Nm]$	4.355992	-4.917960	-2.839785	0.1134292
= 75% $M_N = 15.075[Nm]$	6.558887	-5.168762	-4.312187	0.3172633
= 100% $M_N = 20.1[Nm]$	8.825481	-5.585252	-5.824595	0.6331819
limita de stabilitate				
la încărcare bruscă	21.03265	-11.03745	-13.91790	4.485501
$T_{lim} = 44.22[Nm]$				

respectiv

T[Nm]	s[1]	n[rot/min]	I[A]	M[Nm]
= 0% $M_N = 0[Nm]$	0	1500	0	0
= 25% $M_N = 5.025[Nm]$	0.002316792	1496.525	5.299263	5.025
= 50% $M_N = 10.05[Nm]$	0.004750566	1492.874	6.569703	10.05
= 75% $M_N = 15.075[Nm]$	0.007330452	1489.004	8.350755	15.075
= 100% $M_N = 20.1[Nm]$	0.02858204	1457.127	10.44434	20.1
limita de stabilitate				
la încărcare bruscă	0.04865323	1427.02	23.75285	44.22
$T_{lim} = 44.22[Nm]$				

7.2.2.1. Încărcare bruscă de la 0% la 25% din  $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial  
Sistemul de ecuații diferențiale care modelează acest proces tranzitoriu este următorul:

$$\left. \begin{aligned}
 1.9X + 0.25 \frac{dX}{dt} - 78.5Y + 0.373 \frac{dZ}{dt} - 117.122U &= 220\sqrt{3} \\
 78.5X + 1.9Y + 0.25 \frac{dY}{dt} + 117.122Z + 0.373 \frac{dU}{dt} &= 0 \\
 0.373 \frac{dX}{dt} - 117.122sY + 0.928Z + 0.597 \frac{dZ}{dt} - 187.458sU &= 0 \\
 117.122sX + 0.373 \frac{dY}{dt} + 187.458sZ + 0.928U + 0.597 \frac{dU}{dt} &= 0 \\
 2 \cdot 0.373(YZ - XU) - 5.025 + \boxed{J} \cdot 157 \frac{ds}{dt} &= 0 \\
 X(0) &= 0 \\
 Y(0) &= 0 \\
 Z(0) &= 0 \\
 U(0) &= 0 \\
 s(0) &= 0
 \end{aligned} \right\} \quad (7.17)$$

În urma soluționării sistemului de mai sus, se obțin următoarele evoluții în timp ale mărimilor:

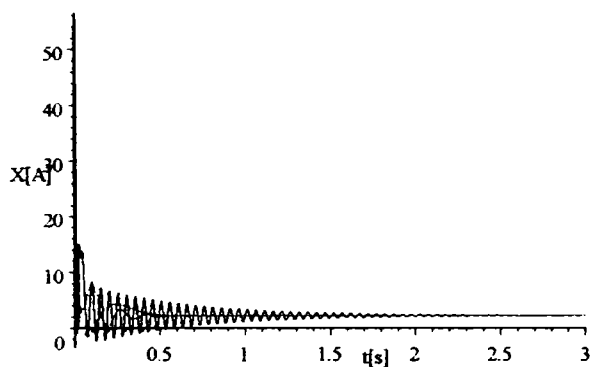


Fig. 7.2.23. Variația în timp a lui  $I_d$ .

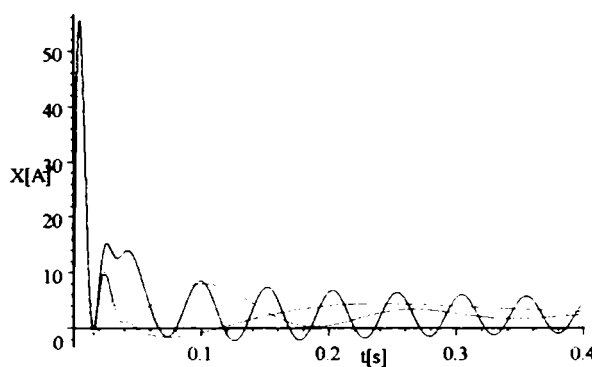


Fig. 7.2.23'. Variația în timp a lui  $I_d$  (detaliu).

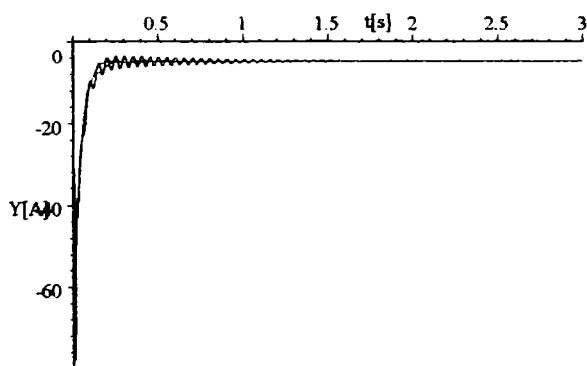


Fig. 7.2.24. Variația în timp a lui  $I_q$ .

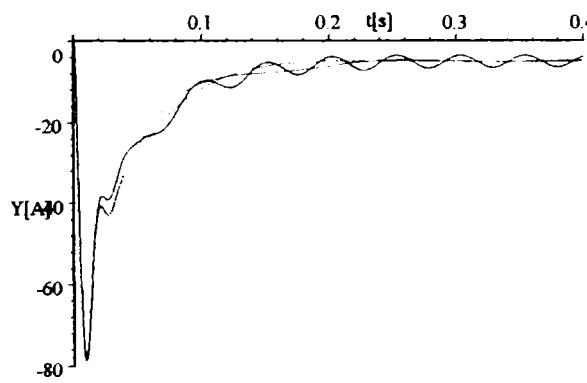


Fig. 7.2.24'. Variația în timp a lui  $I_q$  (detaliu).

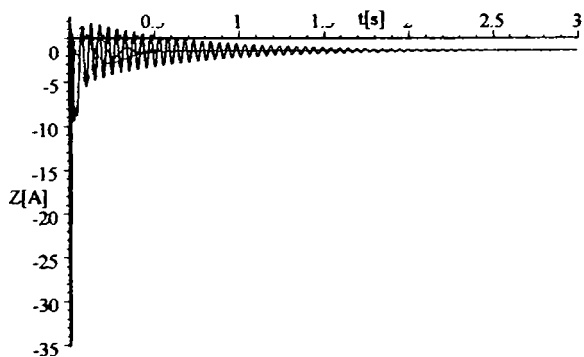


Fig. 7.2.25. Variația în timp a lui  $I_{dr}$ .

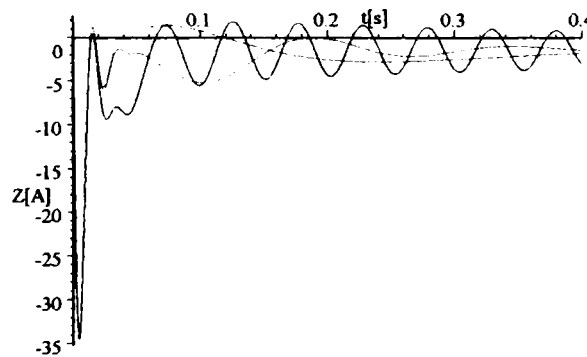


Fig. 7.2.25'. Variația în timp a lui  $I_{dr}$  (detaliu).

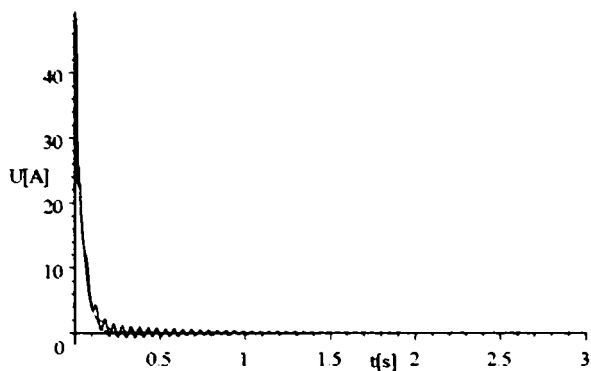


Fig.7.2.26. Variația în timp a lui  $I_{qr}$ .

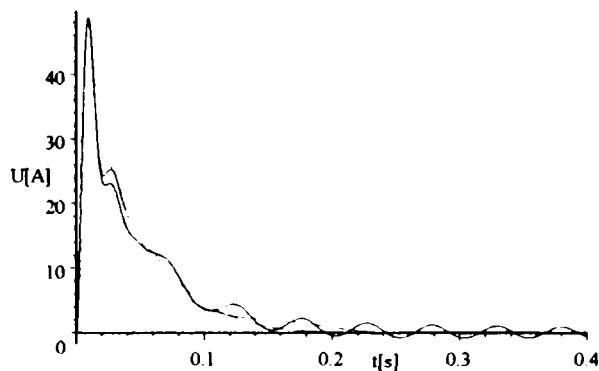


Fig.7.2.26'. Variația în timp a lui  $I_{qr}$ (detaliu).

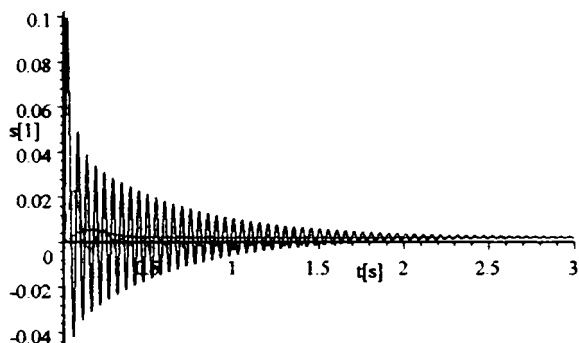


Fig.7.2.27. Variația în timp a lui  $s$ .

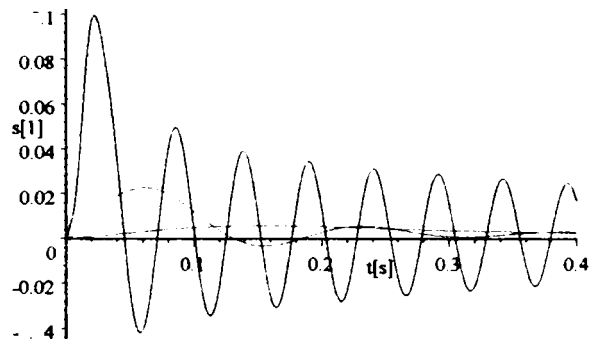


Fig.7.2.27'. Variația în timp a lui  $s$ (detaliu).

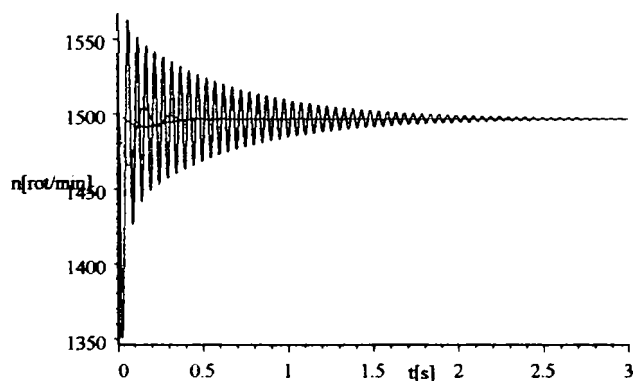


Fig.7.2.28. Variația lui  $n(t) = 1500(1 - s(t))$ .

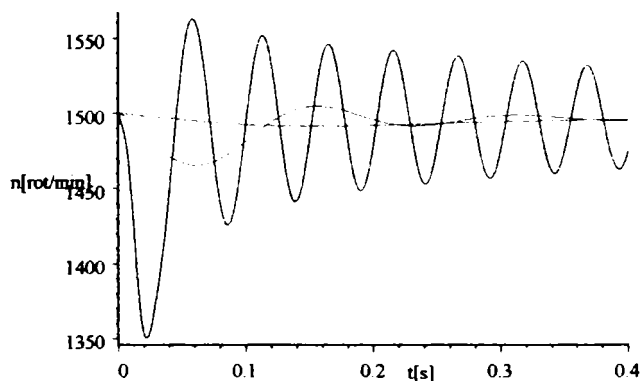


Fig.7.2.28'. Variația lui  $n(t) = 1500(1 - s(t))$ (detaliu).

Curentul statoric respectiv cuplul electromagnetic în mașina reală sunt:

$$I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos(314 \cdot t) - Y(t) \sin(314 \cdot t)) \quad (7.18)$$

$$M_{el\text{mag}}(t) = M(t) = 2 \cdot 0.373(Y(t)Z(t) - X(t)U(t)) \quad (7.19)$$



Fig.7.2.29. Variația în timp a lui  $I$ .

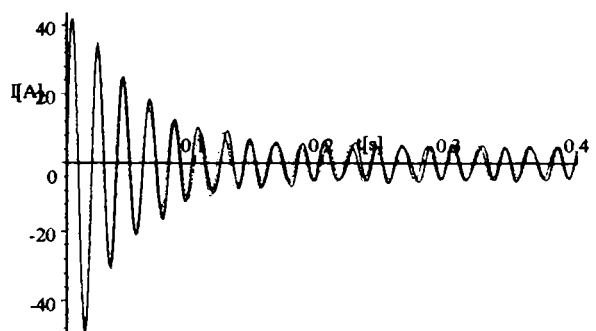


Fig.7.2.29'. Variația în timp a lui  $I$ (detaliu).

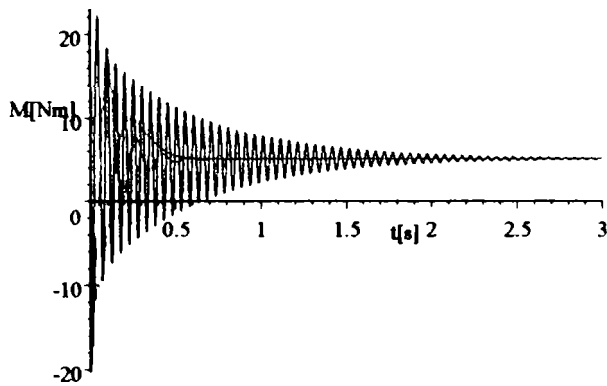


Fig. 7.2.30. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$ .

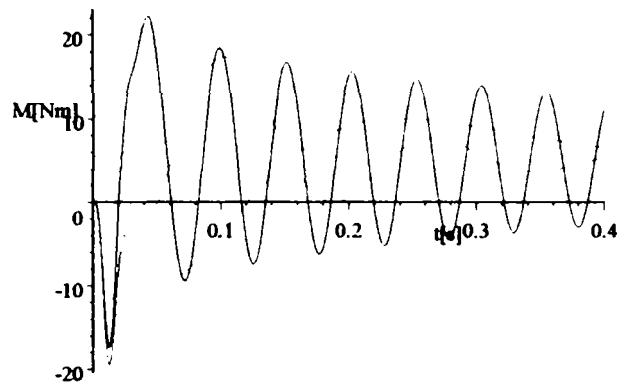


Fig. 7.2.30'. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$  (detaliu).

Rezultatele studiului regimului tranzitoriu studiat în acest subparagraf sunt date în paragraful 7.4.

7.2.2.2. Încărcare bruscă de la 0% la 50% din  $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial  
Sistemul de ecuații diferențiale care modelează acest proces tranzitoriu este următorul:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 1.9X + 0.25 \frac{dX}{dt} - 78.5Y + 0.373 \frac{dZ}{dt} - 117.122U = 220\sqrt{3} \\
 78.5X + 1.9Y + 0.25 \frac{dY}{dt} + 117.122Z + 0.373 \frac{dU}{dt} = 0 \\
 0.373 \frac{dX}{dt} - 117.122sY + 0.928Z + 0.597 \frac{dZ}{dt} - 187.458sU = 0 \\
 117.122sX + 0.373 \frac{dY}{dt} + 187.458sZ + 0.928U + 0.597 \frac{dU}{dt} = 0 \\
 2 \cdot 0.373(YZ - XU) - 10.05 + \boxed{J} \cdot 157 \frac{ds}{dt} = 0 \\
 X(0) = 0 \\
 Y(0) = 0 \\
 Z(0) = 0 \\
 U(0) = 0 \\
 s(0) = 0
 \end{array} \right. \quad (7.20)$$

În urma soluționării sistemului de mai sus, se obțin următoarele evoluții în timp ale mărimilor:

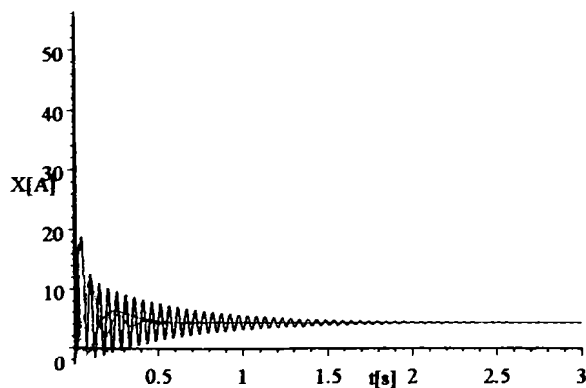


Fig. 7.2.31. Variația în timp a lui  $I_d$ .

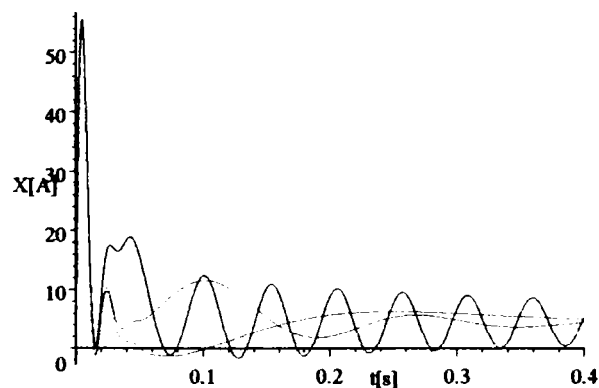


Fig. 7.2.31'. Variația în timp a lui  $I_d$  (detaliu).

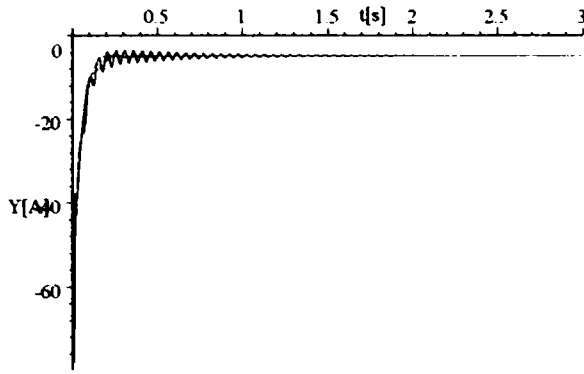


Fig.7.2.32. Variația în timp a lui  $I_q$ .

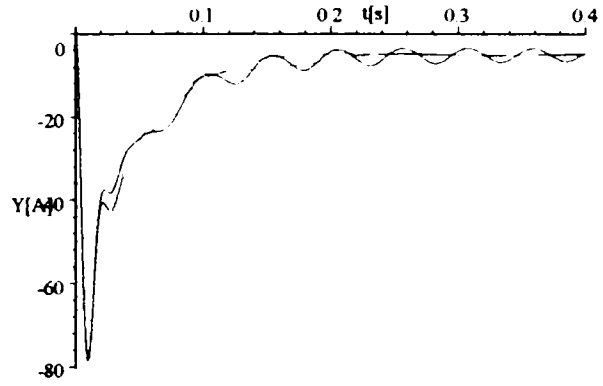


Fig.7.2.32'. Variația în timp a lui  $I_q$ (detaliu).

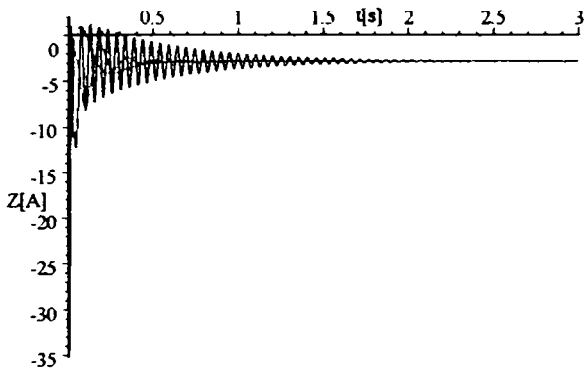


Fig.7.2.33. Variația în timp a lui  $I_{dr}$ .

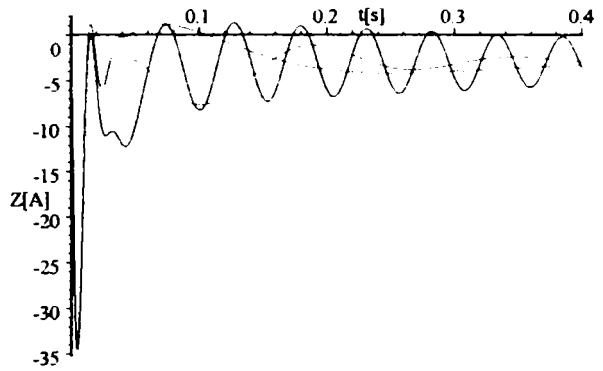


Fig.7.2.33'. Variația în timp a lui  $I_{dr}$ (detaliu).

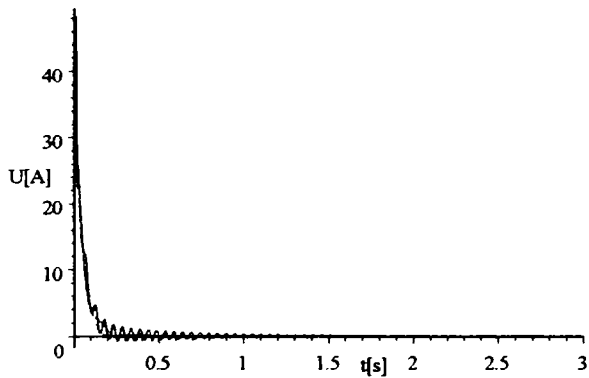


Fig.7.2.34. Variația în timp a lui  $I_{qr}$ .

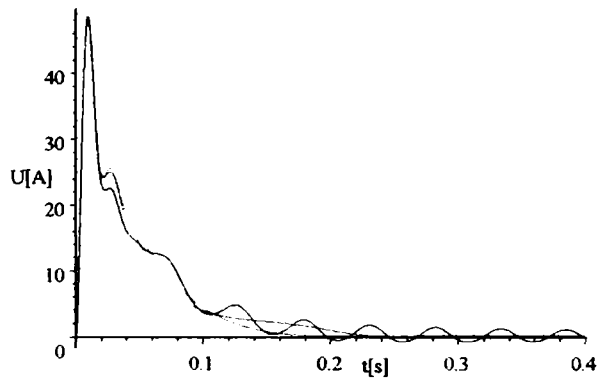


Fig.7.2.34'. Variația în timp a lui  $I_{qr}$ (detaliu).

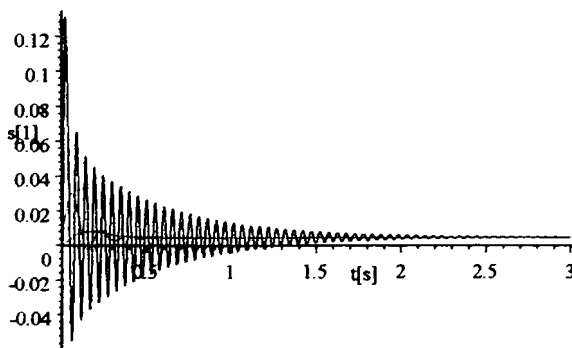


Fig.7.2.35. Variația în timp a lui  $s$ .

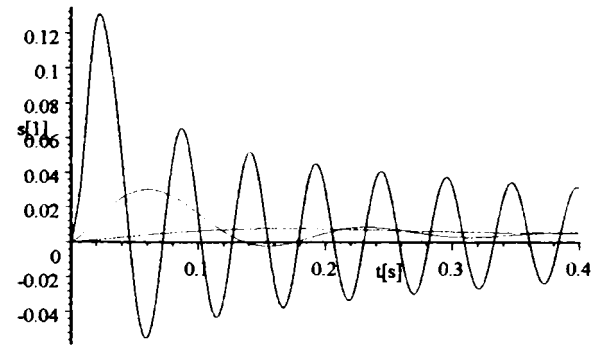


Fig.7.2.35'. Variația în timp a lui  $s$ (detaliu).

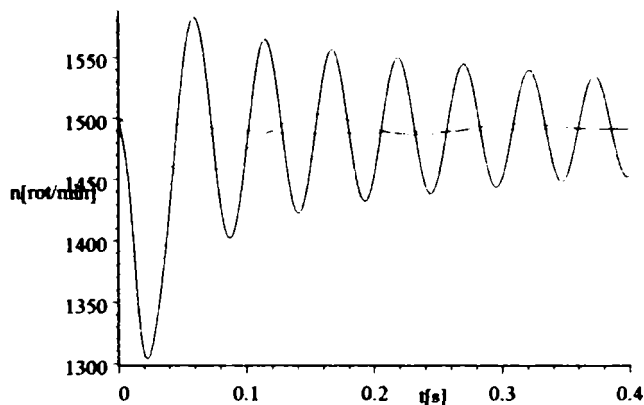
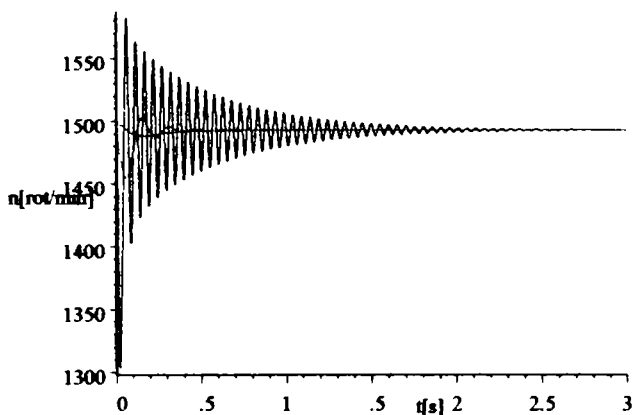


Fig.7.2.36. Variatia lui  $n(t) = 1500(1 - s(t))$ . Fig.7.2.36'. Variatia lui  $n(t) = 1500(1 - s(t))$ (detaliu).

Curentul statoric respectiv cuplul electromagnetic în mașina reală sunt:

$$I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos(314 \cdot t) - Y(t) \sin(314 \cdot t)) \quad (7.21)$$

$$M_{el\text{mag}}(t) = M(t) = 2 \cdot 0.373(Y(t)Z(t) - X(t)U(t)) \quad (7.22)$$

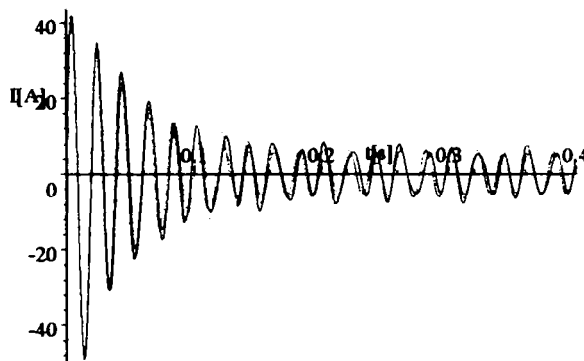


Fig.7.2.37. Variatia în timp a lui  $I$ .

Fig.7.2.37'. Variatia în timp a lui  $I$ (detaliu).

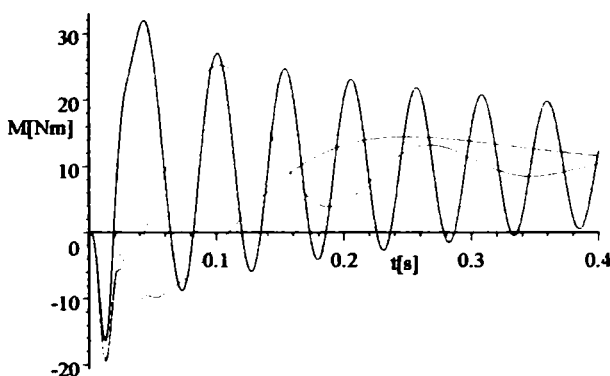
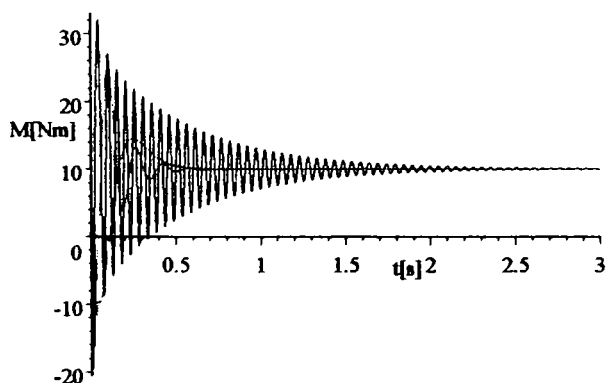


Fig.7.2.38. Variatia în timp a lui  $M_{el\text{mag}}$ .

Fig.7.2.38'. Variatia în timp a lui  $M_{el\text{mag}}$ (detaliu).

Rezultatele studiului regimului tranzitoriu studiat în acest subparagraf sunt date în paragraful 7.4.

7.2.2.3. Încărcare bruscă de la 0% la 75% din  $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial

Sistemul de ecuații diferențiale care modelează acest proces tranzitoriu este următorul(a se vedea relația 7.5):

$$\left. \begin{aligned}
 1.9X + 0.25 \frac{dX}{dt} - 78.5Y + 0.373 \frac{dZ}{dt} - 117.122U &= 220\sqrt{3} \\
 78.5X + 1.9Y + 0.25 \frac{dY}{dt} + 117.122Z + 0.373 \frac{dU}{dt} &= 0 \\
 0.373 \frac{dX}{dt} - 117.122sY + 0.928Z + 0.597 \frac{dZ}{dt} - 187.458sU &= 0 \\
 117.122sX + 0.373 \frac{dY}{dt} + 187.458sZ + 0.928U + 0.597 \frac{dU}{dt} &= 0 \\
 2 \cdot 0.373(YZ - XU) - 15.075 + \boxed{J} \cdot 157 \frac{ds}{dt} &= 0 \\
 X(0) &= 0 \\
 Y(0) &= 0 \\
 Z(0) &= 0 \\
 U(0) &= 0 \\
 s(0) &= 0
 \end{aligned} \right\} \quad (7.23)$$

În urma soluționării sistemului de mai sus, se obțin următoarele evoluții în timp ale mărimilor:

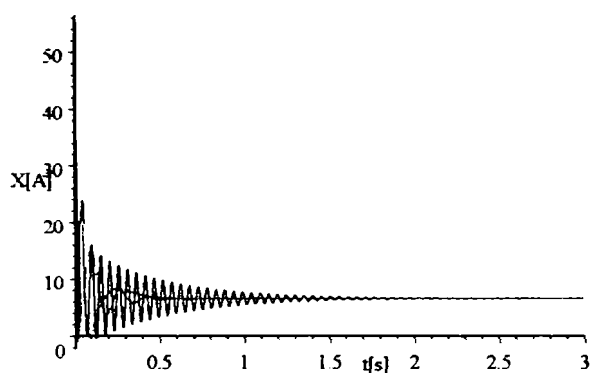


Fig. 7.2.39. Variația în timp a lui  $I_d$ .

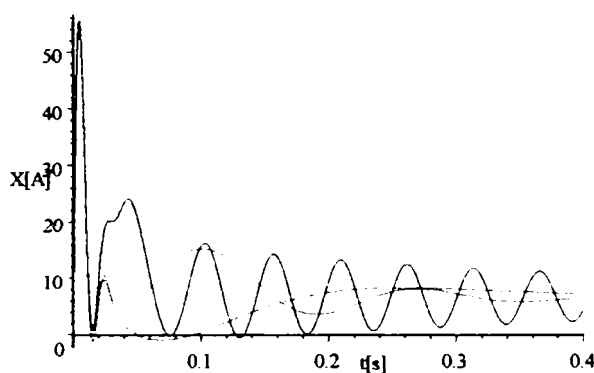


Fig. 7.2.39'. Variația în timp a lui  $I_d$  (detaliu).

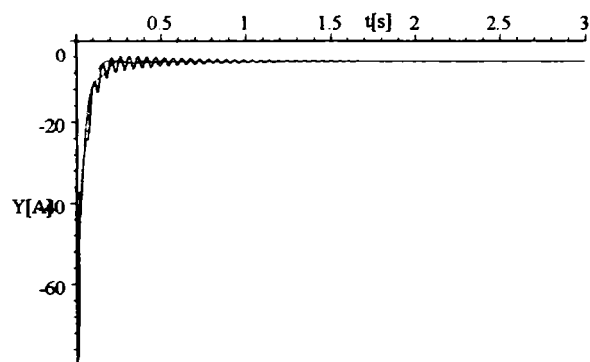


Fig. 7.2.40. Variația în timp a lui  $I_q$ .

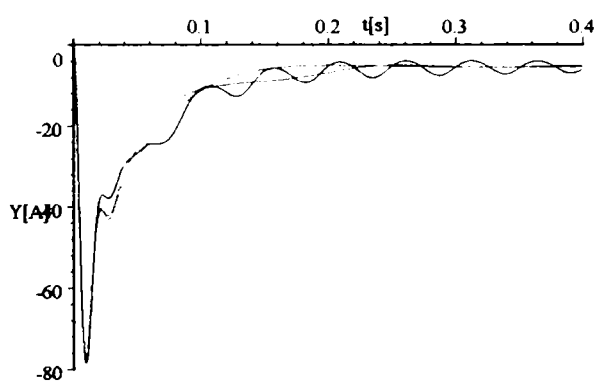


Fig. 7.2.40'. Variația în timp a lui  $I_q$  (detaliu).

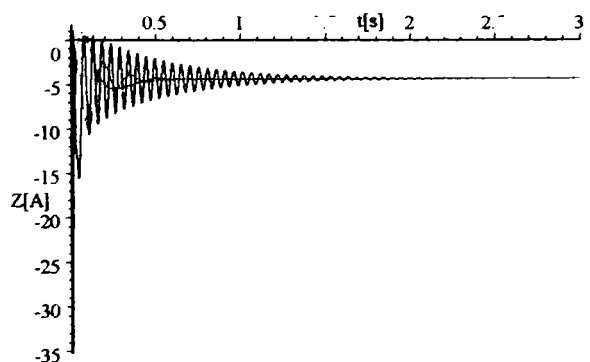


Fig. 7.2.41. Variația în timp a lui  $I_{dr}$ .

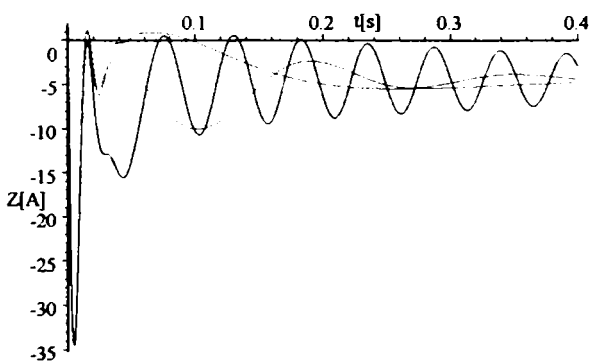


Fig. 7.2.41'. Variația în timp a lui  $I_{dr}$  (detaliu).



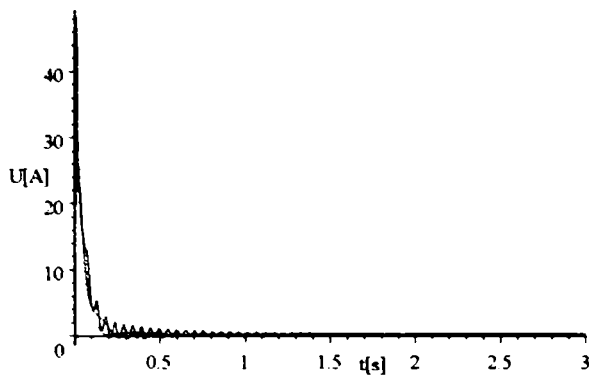


Fig.7.2.42. Variația în timp a lui  $I_{qr}$ .

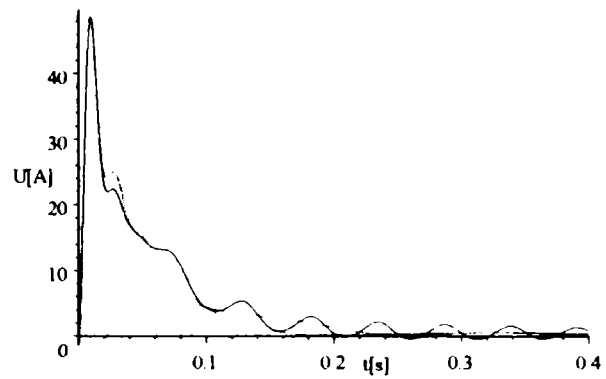


Fig.7.2.42'. Variația în timp a lui  $I_{qr}$ (detaliu).

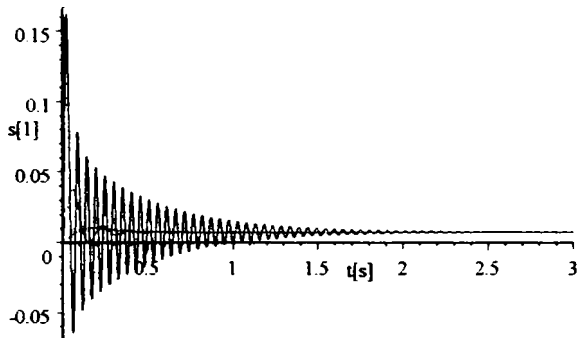


Fig.7.2.43. Variația în timp a lui  $s$ .

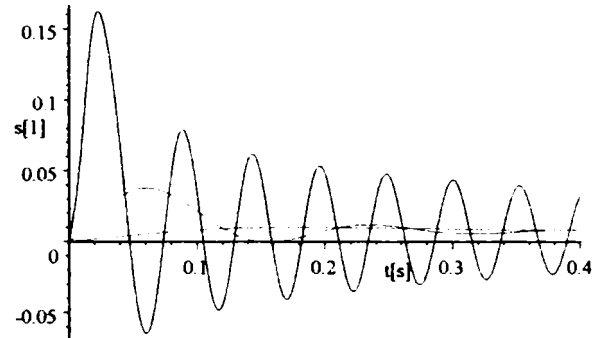


Fig.7.2.43'. Variația în timp a lui  $s$ (detaliu).

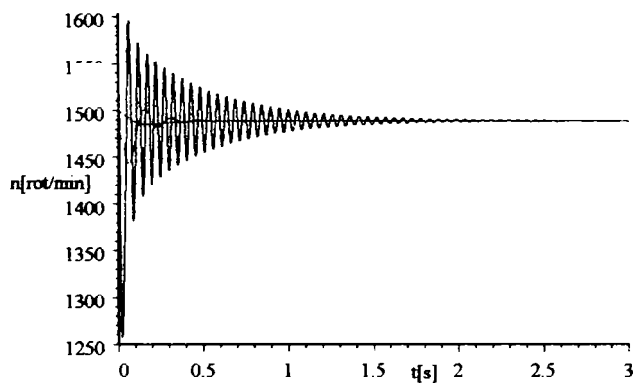


Fig.7.2.44. Variația lui  $n(t) = 1500(1 - s(t))$ .

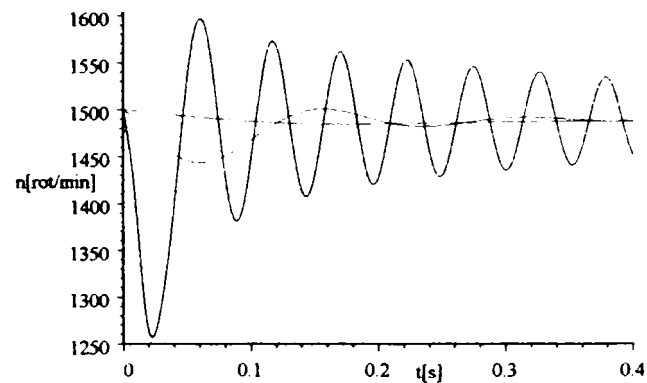


Fig.7.2.44'. Variația lui  $n(t) = 1500(1 - s(t))$ (detaliu).

Curentul statoric respectiv cuplul electromagnetic în mașina reală sunt:

$$I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos(314 \cdot t) - Y(t) \sin(314 \cdot t)) \quad (7.24)$$

$$M_{elmag}(t) = M(t) = 2 \cdot 0.373(Y(t)Z(t) - X(t)U(t)) \quad (7.25)$$



Fig.7.2.45. Variația în timp a lui  $I$ .

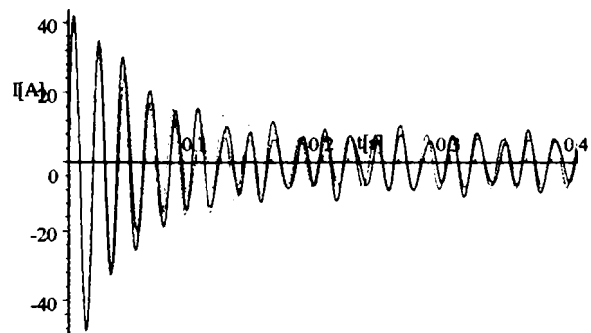


Fig.7.2.45'. Variația în timp a lui  $I$ (detaliu).

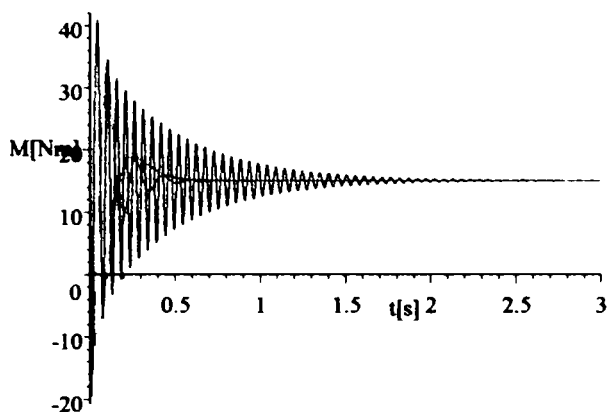


Fig. 7.2.46. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$ .

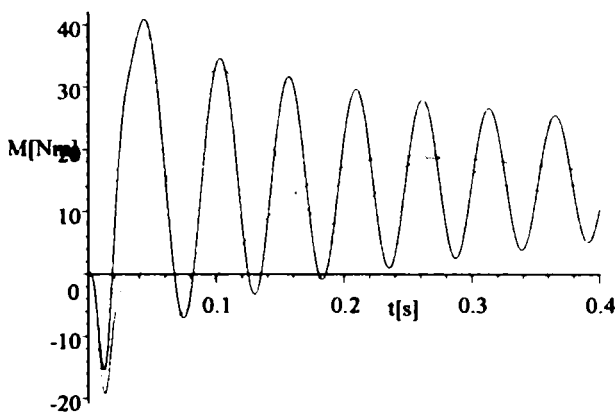


Fig. 7.2.46'. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$  (detaliu).

Rezultatele studiului regimului tranzitoriu studiat în acest subparagraf sunt date în paragraful 7.4.

7.2.2.4. Încărcare bruscă de la 0% la 100% din  $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial  
Sistemul de ecuații diferențiale care modelează acest proces tranzitoriu este următorul:

$$\begin{cases}
 1.9X + 0.25 \frac{dX}{dt} - 78.5Y + 0.373 \frac{dZ}{dt} - 117.122U = 220\sqrt{3} \\
 78.5X + 1.9Y + 0.25 \frac{dY}{dt} + 117.122Z + 0.373 \frac{dU}{dt} = 0 \\
 0.373 \frac{dX}{dt} - 117.122sY + 0.928Z + 0.597 \frac{dZ}{dt} - 187.458sU = 0 \\
 117.122sX + 0.373 \frac{dY}{dt} + 187.458sZ + 0.928U + 0.597 \frac{dU}{dt} = 0 \\
 2 \cdot 0.373(YZ - XU) - 20.1 + \boxed{J} \cdot 157 \frac{ds}{dt} = 0 \\
 X(0) = 0 \\
 Y(0) = 0 \\
 Z(0) = 0 \\
 U(0) = 0 \\
 s(0) = 0
 \end{cases} \quad (7.26)$$

În urma soluționării sistemului de mai sus, se obțin următoarele evoluții în timp ale mărimilor:

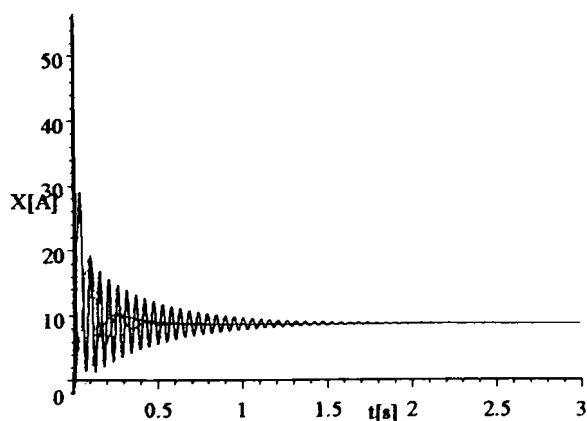


Fig. 7.2.47. Variația în timp a lui  $I_d$ .

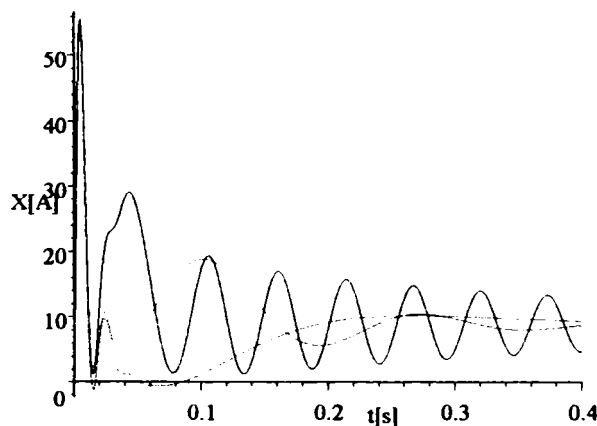


Fig. 7.2.47'. Variația în timp a lui  $I_d$  (detaliu).

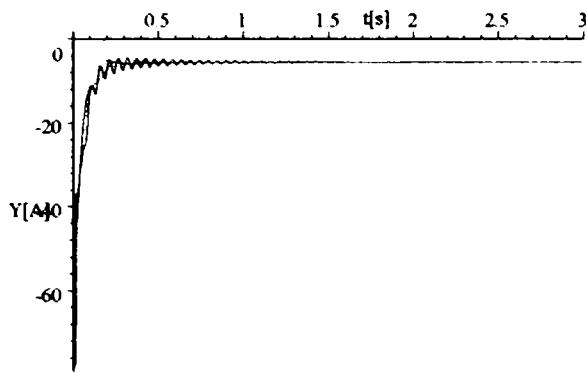


Fig.7.2.48. Variația în timp a lui  $I_q$ .

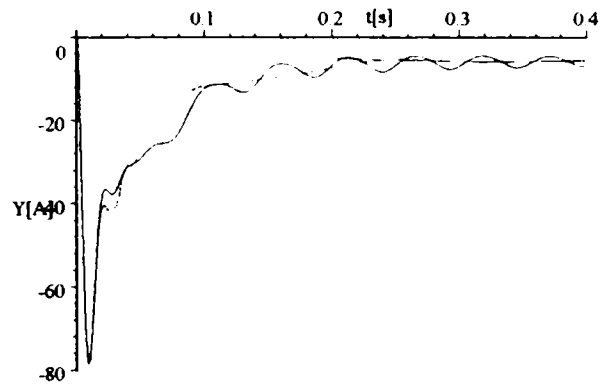


Fig.7.2.48'. Variația în timp a lui  $I_q$ (detaliu).

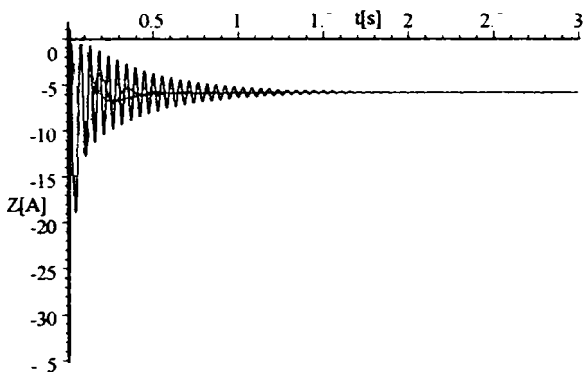


Fig.7.2.49. Variația în timp a lui  $I_{dr}$ .

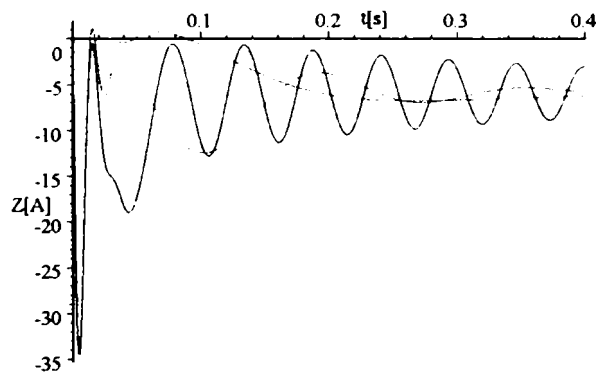


Fig.7.2.49'. Variația în timp a lui  $I_{dr}$ (detaliu).

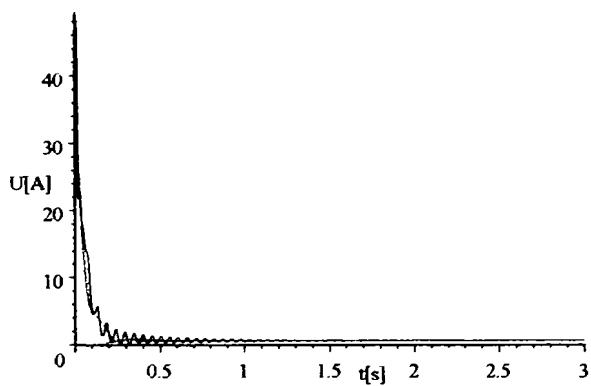


Fig.7.2.50. Variația în timp a lui  $I_{qr}$ .

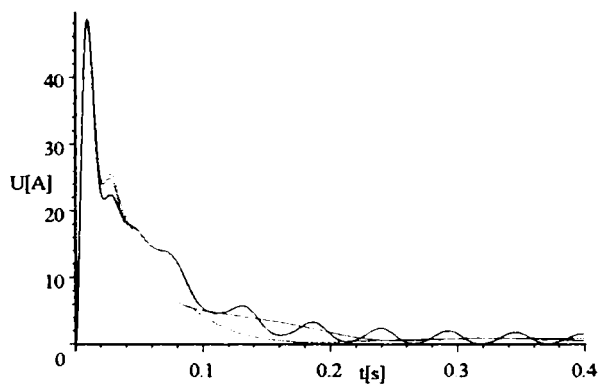


Fig.7.2.50'. Variația în timp a lui  $I_{qr}$ (detaliu).

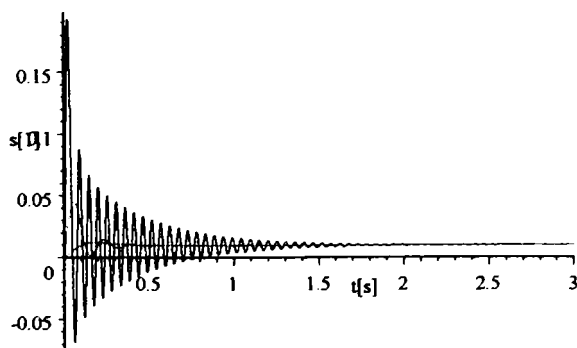


Fig.7.2.51. Variația în timp a lui  $s$ .

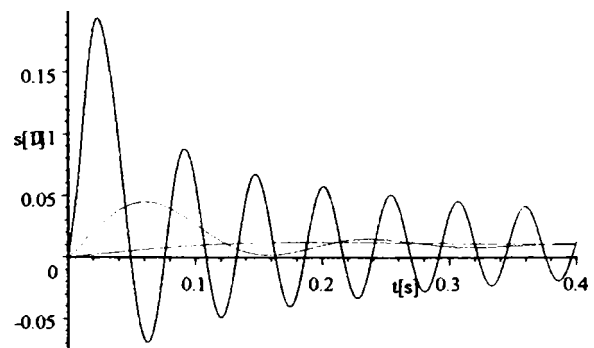


Fig.7.2.51'. Variația în timp a lui  $s$ (detaliu).

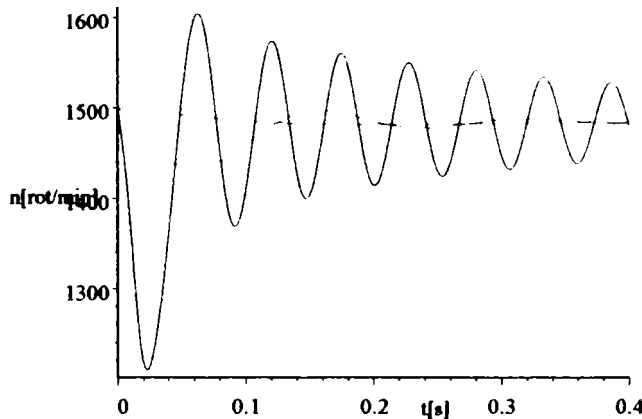
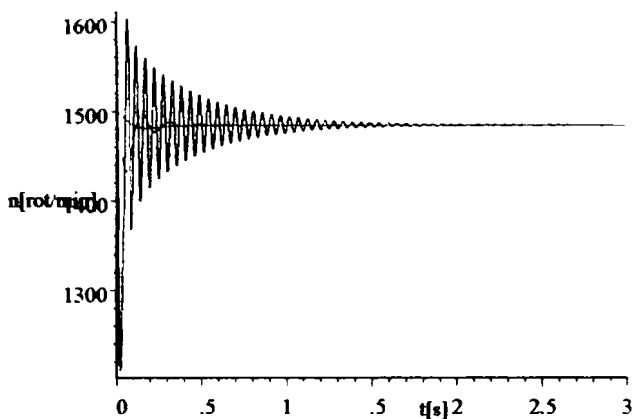


Fig.7.2.52. Variatia lui  $n(t) = 1500(1 - s(t))$ . Fig.7.2.52'. Variatia lui  $n(t) = 1500(1 - s(t))$ (detaliu).

Curentul statoric respectiv cuplul electromagnetic în mașina reală sunt:

$$I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos(314 \cdot t) - Y(t) \sin(314 \cdot t)) \quad (7.27)$$

$$M_{el\text{mag}}(t) = M(t) = 2 \cdot 0.373(Y(t)Z(t) - X(t)U(t)) \quad (7.28)$$

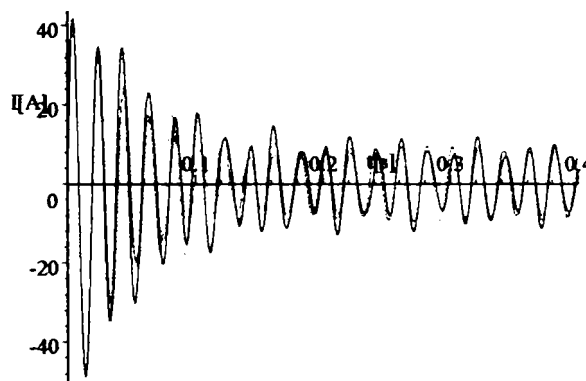


Fig. 7.2.53. Variatia în timp a lui  $I$ .

Fig. 7.2.53'. Variatia în timp a lui  $I$ (detaliu).

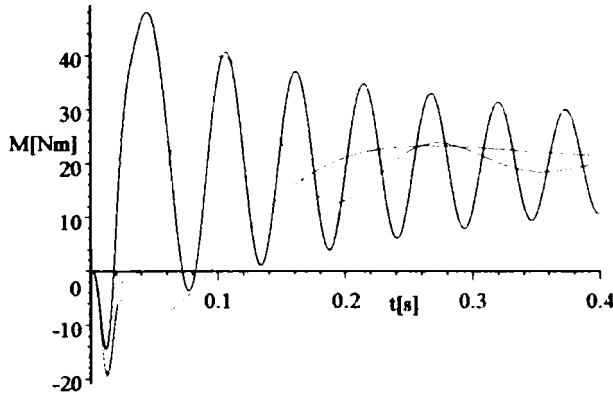
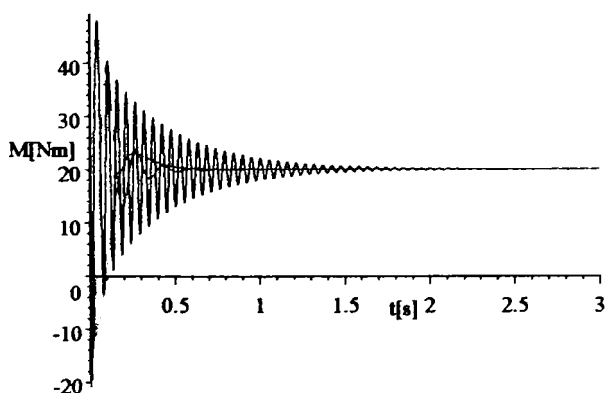


Fig. 7.2.54. Variatia în timp a lui  $M_{el\text{mag}}$ .

Fig. 7.2.54'. Variatia în timp a lui  $M_{el\text{mag}}$ (detaliu).

Rezultatele studiului regimului tranzitoriu studiat în acest subparagraf sunt date în paragraful 7.4.

7.2.2.5.Limita de stabilitate la încărcare bruscă, cu modificarea momentului de inerție axial

Sistemul de ecuații diferențiale care modelează acest proces tranzitoriu este următorul(vezi relația 7.5):

$$\left\{ \begin{array}{l}
 1.9X + 0.25 \frac{dX}{dt} - 78.5Y + 0.373 \frac{dZ}{dt} - 117.122U = 220\sqrt{3} \\
 78.5X + 1.9Y + 0.25 \frac{dY}{dt} + 117.122Z + 0.373 \frac{dU}{dt} = 0 \\
 0.373 \frac{dX}{dt} - 117.122sY + 0.928Z + 0.597 \frac{dZ}{dt} - 187.458sU = 0 \\
 117.122sX + 0.373 \frac{dY}{dt} + 187.458sZ + 0.928U + 0.597 \frac{dU}{dt} = 0 \\
 2 \cdot 0.373(YZ - XU) - T + \boxed{J} \cdot 157 \frac{ds}{dt} = 0 \\
 X(0) = 0 \\
 Y(0) = 0 \\
 Z(0) = 0 \\
 U(0) = 0 \\
 s(0) = 0
 \end{array} \right. \quad (7.29)$$

$T$  fiind valoarea limită de încărcare a cuplului rezistent la care motorul asincron își pierde stabilitatea în funcționare.

Pentru  $T = 44.22[Nm]$ , motorul asincron încă nu-și pierde stabilitatea în funcționare, observație care se poate constata din evoluția stabilizată în timp a mărimilor care intervin în procesul tranzitoriu datorat încărcării bruște de sarcină. În urma soluționării sistemului de mai sus, se obțin următoarele evoluții în timp ale mărimilor:

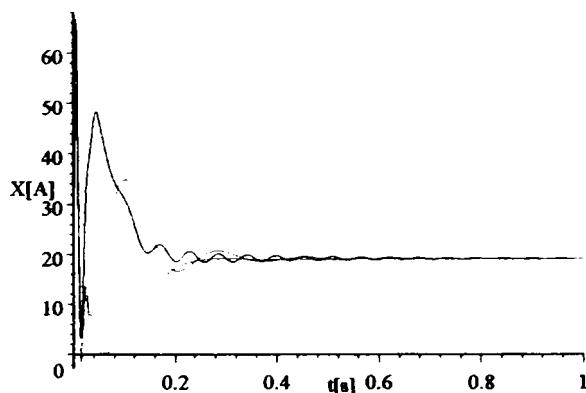


Fig.7.2.55. Variația în timp a lui  $I_d$ .

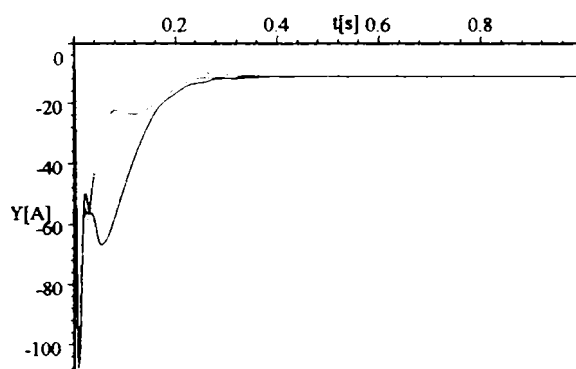


Fig.7.2.56. Variația în timp a lui  $I_q$ .

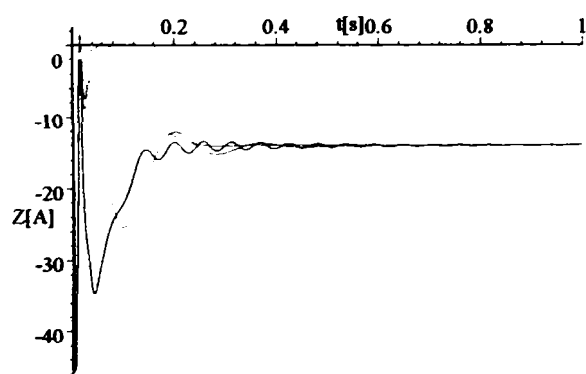


Fig.7.2.57. Variația în timp a lui  $I_{dr}$ .

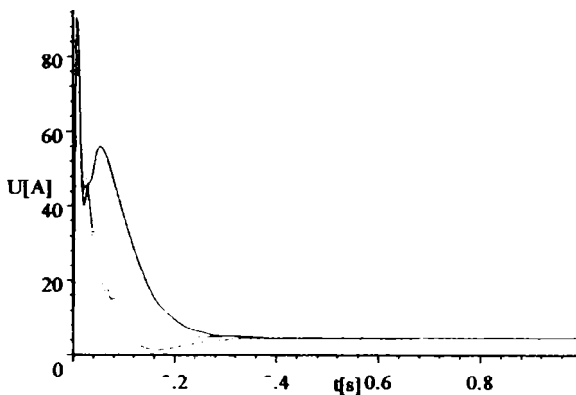


Fig.7.2.58. Variația în timp a lui  $I_{qr}$ .

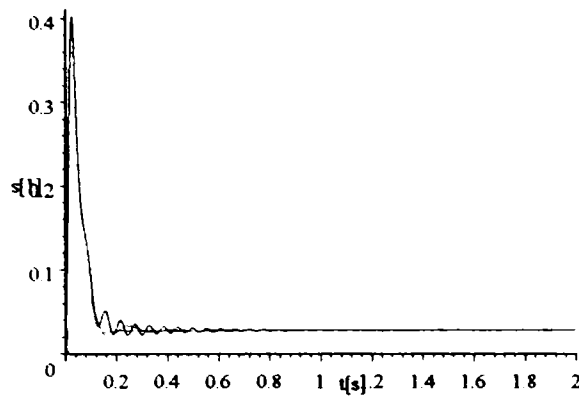


Fig. 7.2.59. Variația în timp a lui  $s$ .

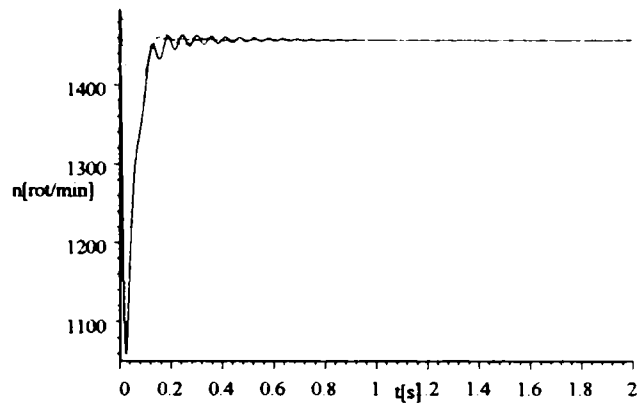


Fig. 7.2.60. Variația lui  $n(t) = 1500(1 - s(t))$ .

Curentul statoric respectiv cuplul electromagnetic în mașina reală sunt:

$$I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos(314 \cdot t) - Y(t) \sin(314 \cdot t)) \tag{7.30}$$

$$M_{elmag}(t) = M(t) = 2 \cdot 0.373(Y(t)Z(t) - X(t)U(t)) \tag{7.31}$$

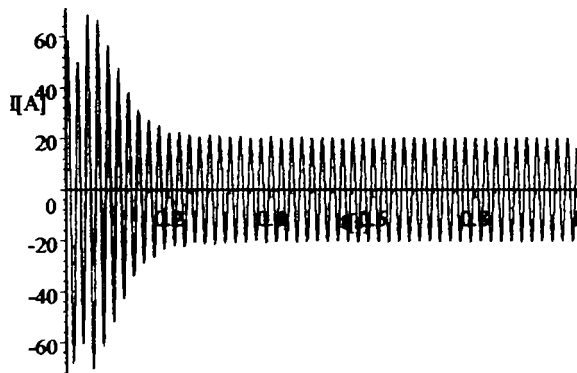


Fig. 7.2.61. Variația în timp a lui  $I$ .

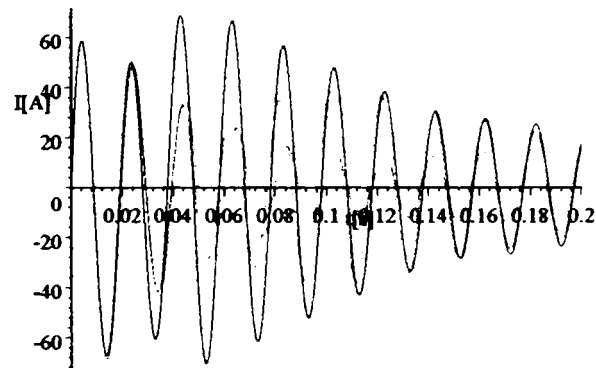


Fig. 7.2.61'. Variația în timp a lui  $I$  (detaliu).

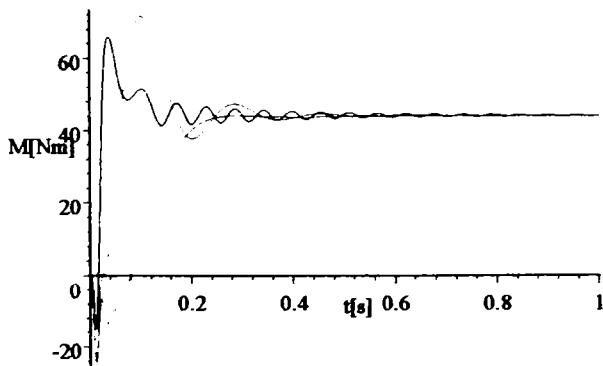


Fig. 7.2.62. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$ .

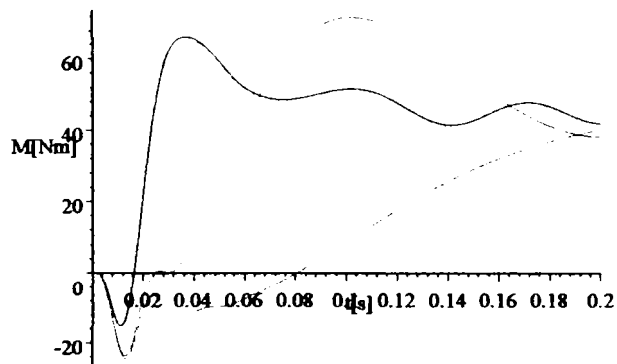


Fig. 7.2.62'. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$  (detaliu).

Pentru  $T > 44.22[Nm]$ , motorul asincron își pierde stabilitatea în funcționare.

Rezultatele studiului regimului tranzitoriu studiat în acest subparagraf sunt date în paragraful 7.4.

7.2.3. Modelarea și simularea descărcării bruște a motorului asincron

În acest paragraf se prezintă modelarea și simularea descărcării bruște de sarcină a motorului asincron, studiindu-se comportarea dinamică a acestuia în condițiile modificării momentului de inerție axial  $J$ , la aceleași trei valori din paragraful precedent.

Păstrându-se notațiile (7.1) din paragraful precedent, model matematic care descrie dinamica motorului asincron la descărcare bruscă de sarcină este următorul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.9X + 0.25 \frac{dX}{dt} - 78.5Y + 0.373 \frac{dZ}{dt} - 117.122U = 220\sqrt{3} \\ 78.5X + 1.9Y + 0.25 \frac{dY}{dt} + 117.122Z + 0.373 \frac{dU}{dt} = 0 \\ 0.373 \frac{dX}{dt} - 117.122sY + 0.928Z + 0.597 \frac{dZ}{dt} - 187.458sU = 0 \\ 117.122sX + 0.373 \frac{dY}{dt} + 187.458sZ + 0.928U + 0.597 \frac{dU}{dt} = 0 \\ 2 \cdot 0.373(YZ - XU) - T + \boxed{J} \cdot 157 \frac{ds}{dt} = 0 \\ X(0) = 8.825481 \\ Y(0) = -5.585252 \\ Z(0) = -5.824595 \\ U(0) = 0.6331819 \\ s(0) = 0.02858204 \end{array} \right. \quad (7.32)$$

7.2.3.1. Descărcare bruscă de la 100% la 75% din  $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial  
Sistemul de ecuații diferențiale care modelează acest proces tranzitoriu este următorul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.9X + 0.25 \frac{dX}{dt} - 78.5Y + 0.373 \frac{dZ}{dt} - 117.122U = 220\sqrt{3} \\ 78.5X + 1.9Y + 0.25 \frac{dY}{dt} + 117.122Z + 0.373 \frac{dU}{dt} = 0 \\ 0.373 \frac{dX}{dt} - 117.122sY + 0.928Z + 0.597 \frac{dZ}{dt} - 187.458sU = 0 \\ 117.122sX + 0.373 \frac{dY}{dt} + 187.458sZ + 0.928U + 0.597 \frac{dU}{dt} = 0 \\ 2 \cdot 0.373(YZ - XU) - 15.075 + \boxed{J} \cdot 157 \frac{ds}{dt} = 0 \\ X(0) = 8.825481 \\ Y(0) = -5.585252 \\ Z(0) = -5.824595 \\ U(0) = 0.6331819 \\ s(0) = 0.02858204 \end{array} \right. \quad (7.33)$$

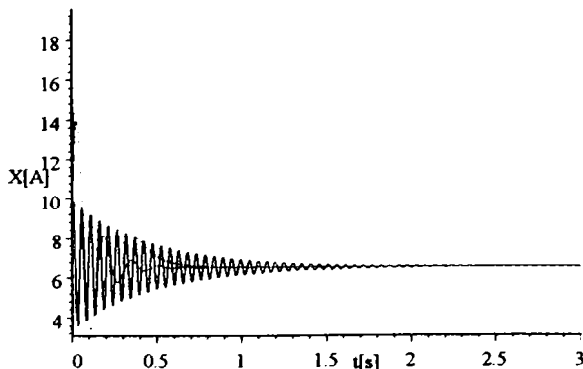


Fig. 7.2.63. Variația în timp a lui  $I_d$ .

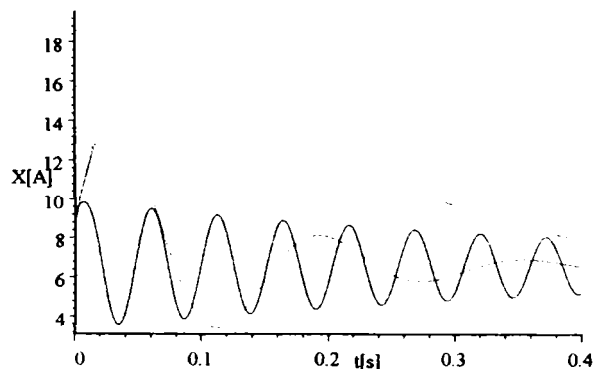


Fig. 7.2.63'. Variația în timp a lui  $I_d$  (detaliu).

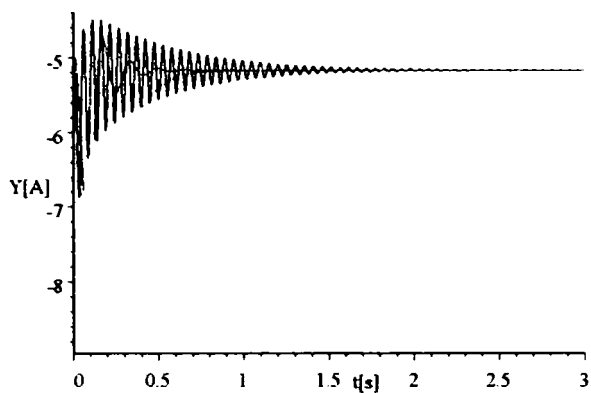


Fig.7.2.64. Variația în timp a lui  $I_q$ .

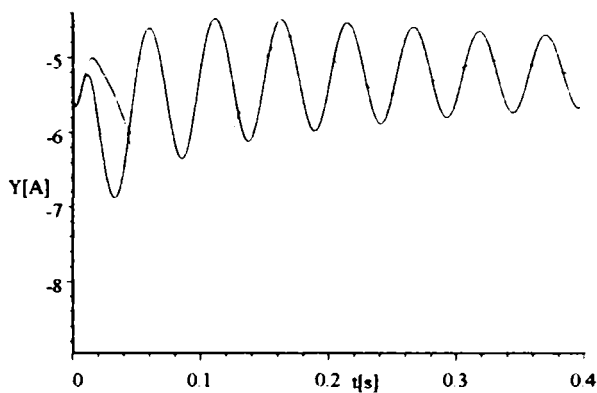


Fig.7.2.64'. Variația în timp a lui  $I_q$ (detaliu).

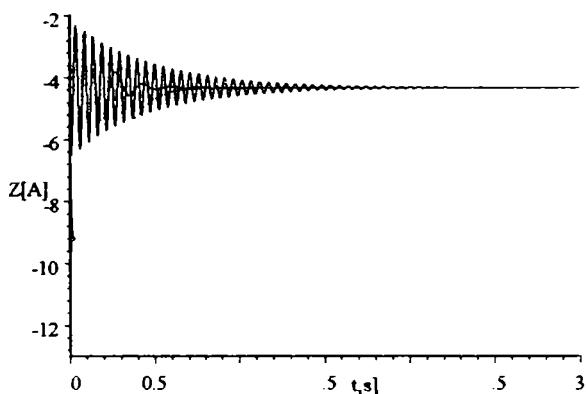


Fig.7.2.65. Variația în timp a lui  $I_{dr}$ .

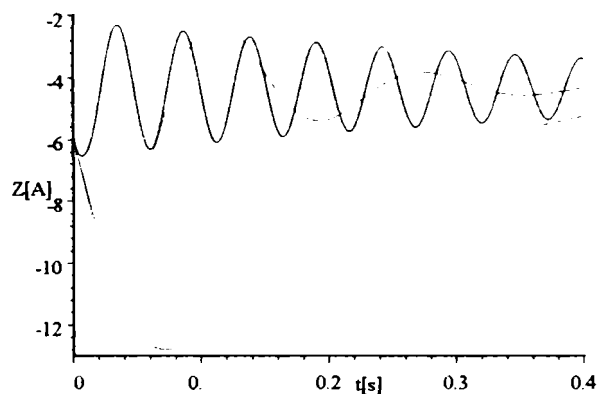


Fig.7.2.65'. Variația în timp a lui  $I_{dr}$ (detaliu).

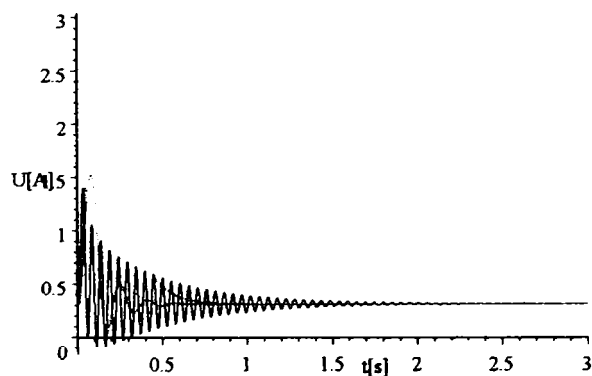


Fig.7.2.66. Variația în timp a lui  $I_{qr}$ .

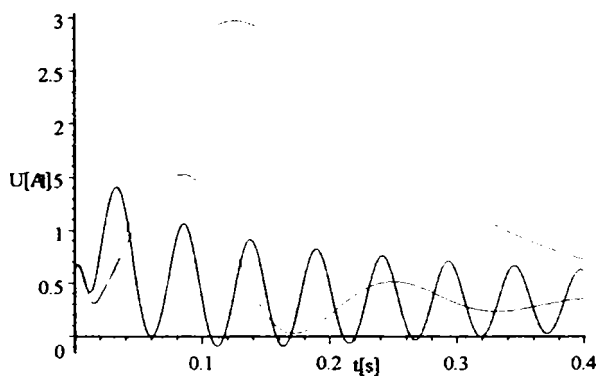


Fig.7.2.66'. Variația în timp a lui  $I_{qr}$ (detaliu).

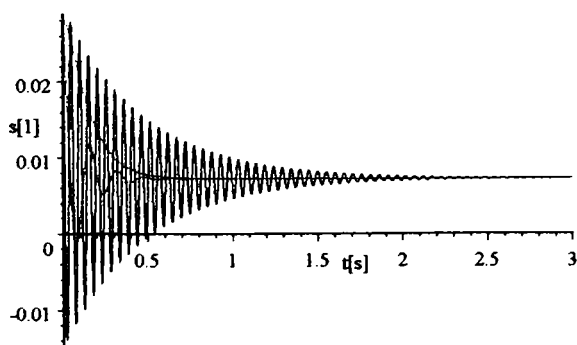


Fig.7.2.67. Variația în timp a lui  $s$ .

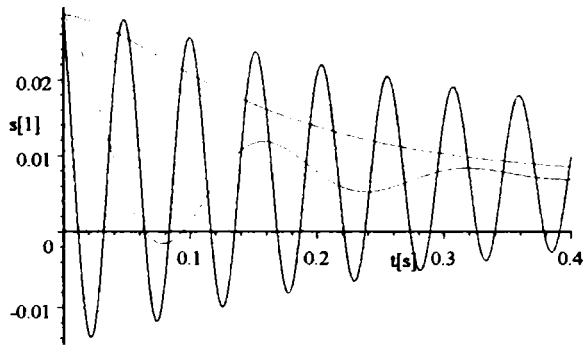


Fig.7.2.67'. Variația în timp a lui  $s$ (detaliu).



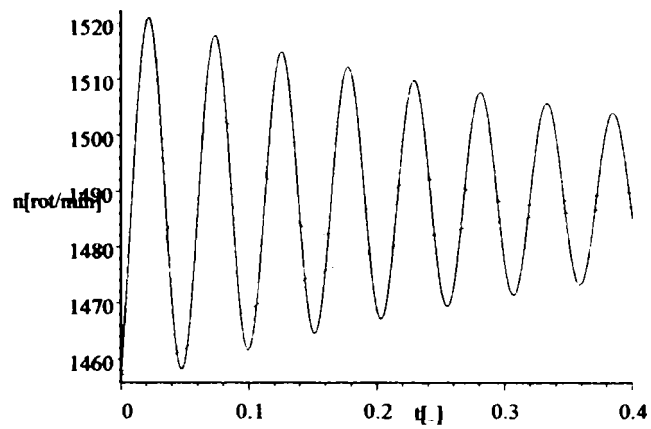
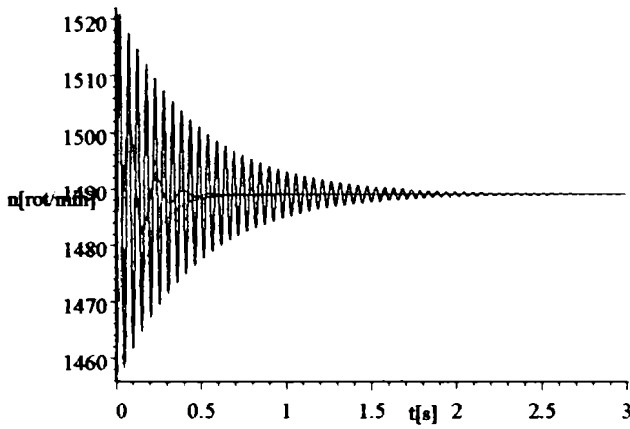


Fig.7.2.68. Variația lui  $n(t) = 1500(1 - s(t))$ .

Fig.7.2.68'. Variația lui  $n(t) = 1500(1 - s(t))$ (detaliu).

Curentul statoric respectiv cuplul electromagnetic în mașina reală sunt:

$$I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos(314 \cdot t) - Y(t) \sin(314 \cdot t)) \quad (7.34)$$

$$M_{el\text{mag}}(t) = M(t) = 2 \cdot 0.373(Y(t)Z(t) - X(t)U(t)) \quad (7.35)$$



Fig.7.2.69. Variația în timp a lui  $I$ .

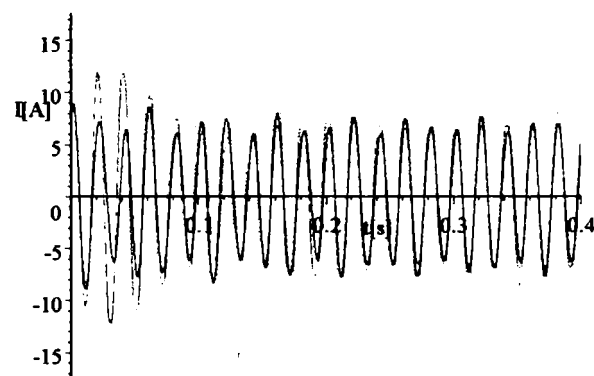


Fig.7.2.69'. Variația în timp a lui  $I$ (detaliu).

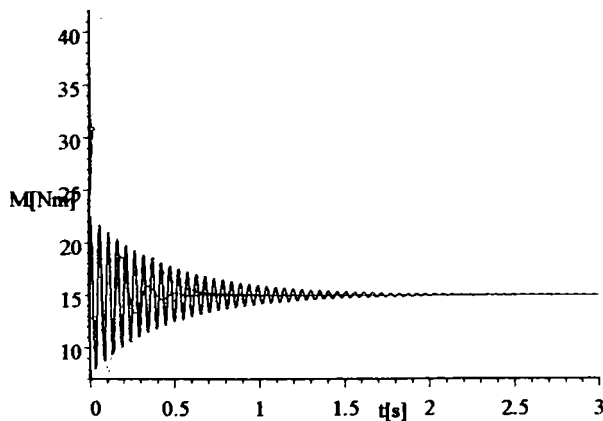


Fig.7.2.70. Variația în timp a lui  $M_{el\text{mag}}$ .

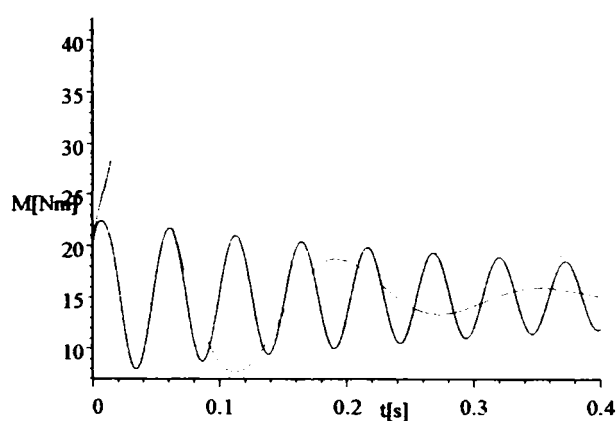


Fig.7.2.70'. Variația în timp a lui  $M_{el\text{mag}}$ (detaliu).

Rezultatele studiului regimului tranzitoriu studiat în acest subparagraf sunt date în paragraful 7.4.

7.2.3.2.Descărcare bruscă de la 100% la 50% din  $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial  
Sistemul de ecuații diferențiale care modelează acest proces tranzitoriu este următorul(din relația 7.5):

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.9X + 0.25 \frac{dX}{dt} - 78.5Y + 0.373 \frac{dZ}{dt} - 117.122U = 220\sqrt{3} \\ 78.5X + 1.9Y + 0.25 \frac{dY}{dt} + 117.122Z + 0.373 \frac{dU}{dt} = 0 \\ 0.373 \frac{dX}{dt} - 117.122sY + 0.928Z + 0.597 \frac{dZ}{dt} - 187.458sU = 0 \\ 117.122sX + 0.373 \frac{dY}{dt} + 187.458sZ + 0.928U + 0.597 \frac{dU}{dt} = 0 \\ 2 \cdot 0.373(YZ - XU) - 10.05 + \boxed{J} \cdot 157 \frac{ds}{dt} = 0 \\ X(0) = 8.825481 \\ Y(0) = -5.585252 \\ Z(0) = -5.824595 \\ U(0) = 0.6331819 \\ s(0) = 0.02858204 \end{array} \right. \quad (7.36)$$

cu soluția:

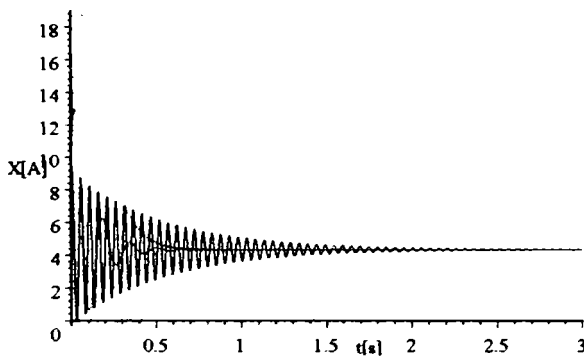


Fig.7.2.71.Variația în timp a lui  $I_d$ .

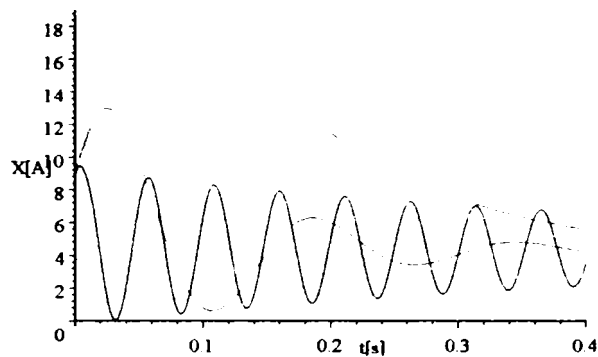


Fig.7.2.71'.Variația în timp a lui  $I_d$ (detaliu).

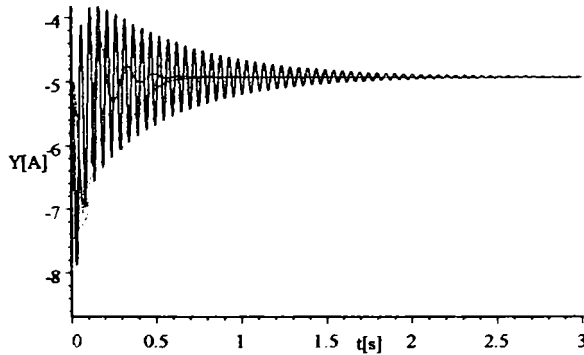


Fig.7.2.72.Variația în timp a lui  $I_q$ .

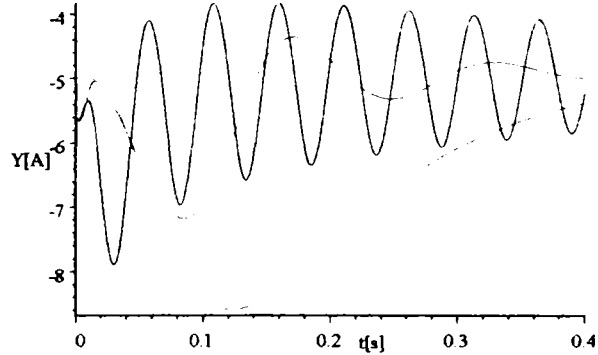


Fig.7.2.72'.Variația în timp a lui  $I_q$ (detaliu).

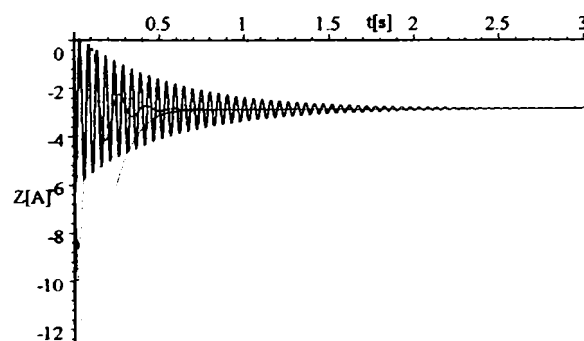


Fig.7.2.73.Variația în timp a lui  $I_{dr}$ .

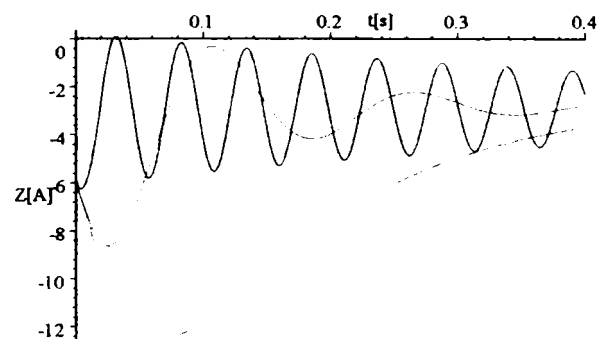


Fig.7.2.73'.Variația în timp a lui  $I_{dr}$ (detaliu).

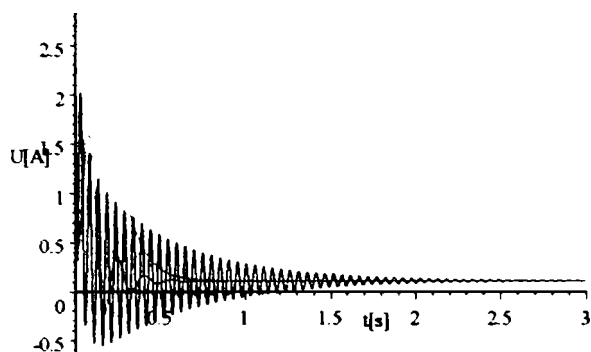


Fig.7.2.74. Variația în timp a lui  $I_{qr}$ .

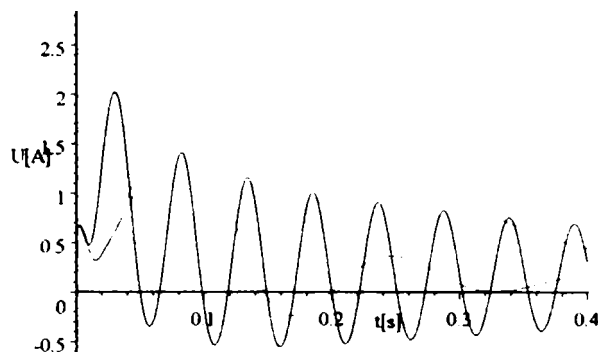


Fig.7.2.74'. Variația în timp a lui  $I_{qr}$ (detaliu).

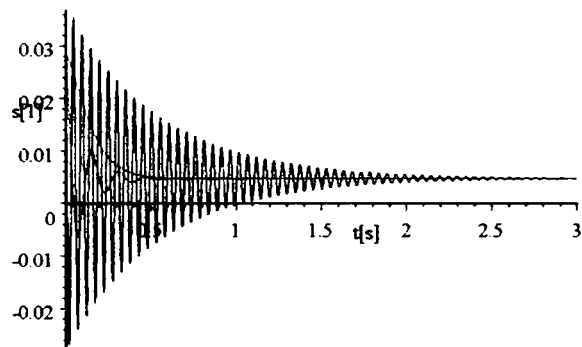


Fig.7.2.75. Variația în timp a lui  $s$ .

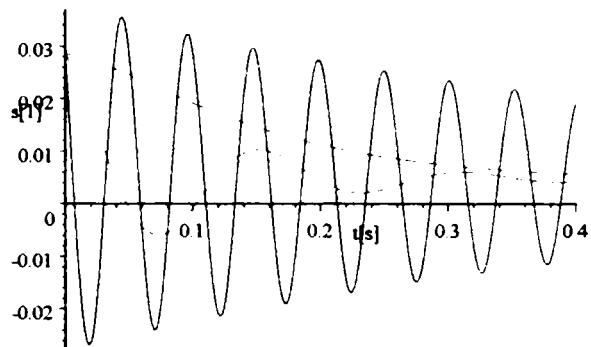


Fig.7.2.75'. Variația în timp a lui  $s$ (detaliu).

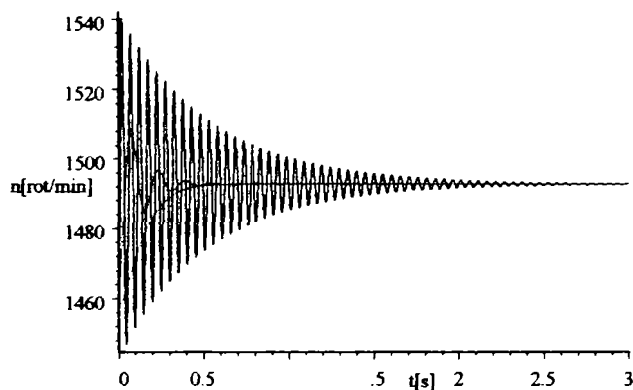


Fig.7.2.76. Variația lui  $n(t) = 1500(1 - s(t))$ .

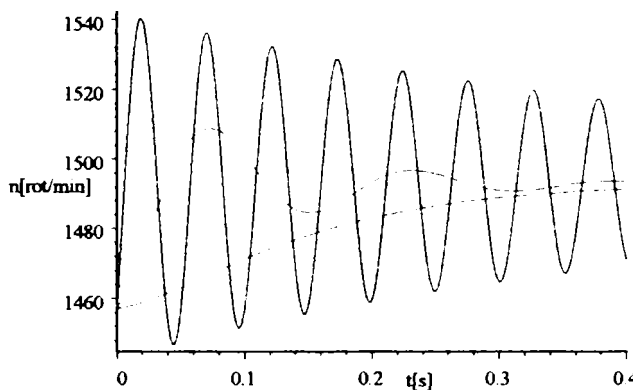


Fig.7.2.76'. Variația lui  $n(t) = 1500(1 - s(t))$ (detaliu).

Curentul statoric respectiv cuplul electromagnetic în mașina reală sunt:

$$I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos(314 \cdot t) - Y(t) \sin(314 \cdot t)) \quad (7.37)$$

$$M_{el\text{mag}}(t) = M(t) = 2 \cdot 0.373(Y(t)Z(t) - X(t)U(t)) \quad (7.38)$$



Fig.7.2.77. Variația în timp a lui  $I$ .

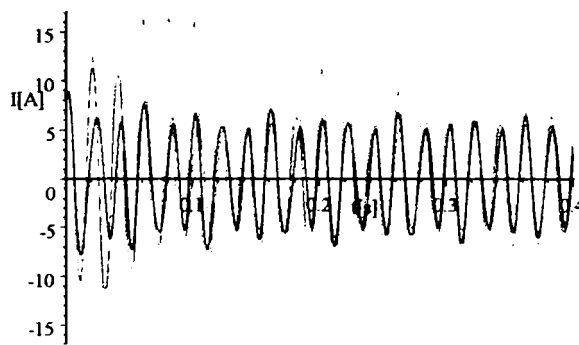


Fig.7.2.77'. Variația în timp a lui  $I$ (detaliu).

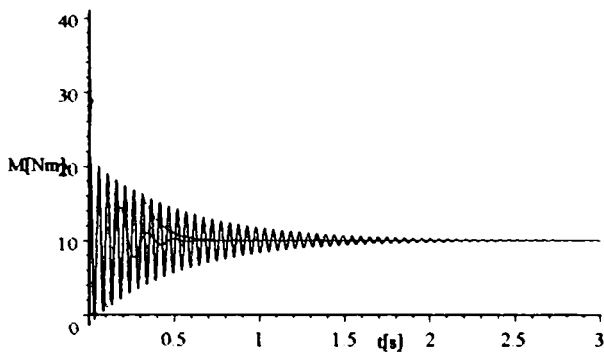


Fig.7.2.78. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$ .

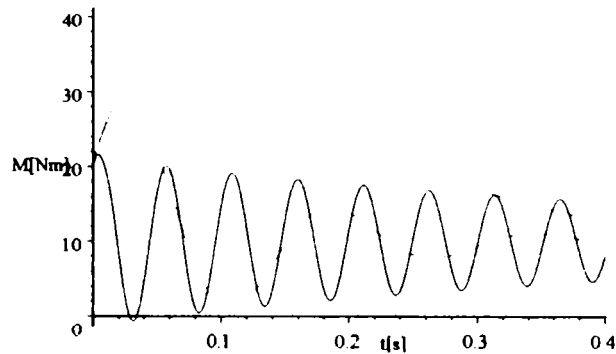


Fig.7.2.78'. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$  (detaliu).

7.2.3.3. Descărcare bruscă de la 100% la 25% din  $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial  
Sistemul de ecuații diferențiale care modelează acest proces tranzitoriu este următorul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.9X + 0.25 \frac{dX}{dt} - 78.5Y + 0.373 \frac{dZ}{dt} - 117.122U = 220\sqrt{3} \\ 78.5X + 1.9Y + 0.25 \frac{dY}{dt} + 117.122Z + 0.373 \frac{dU}{dt} = 0 \\ 0.373 \frac{dX}{dt} - 117.122sY + 0.928Z + 0.597 \frac{dZ}{dt} - 187.458sU = 0 \\ 117.122sX + 0.373 \frac{dY}{dt} + 187.458sZ + 0.928U + 0.597 \frac{dU}{dt} = 0 \\ 2 \cdot 0.373(YZ - XU) - 5.025 + \boxed{J} \cdot 157 \frac{ds}{dt} = 0 \end{array} \right. \quad (7.39)$$

$$\begin{array}{l} X(0) = 8.825481 \\ Y(0) = -5.585252 \\ Z(0) = -5.824595 \\ U(0) = 0.6331819 \\ s(0) = 0.02858204 \end{array}$$

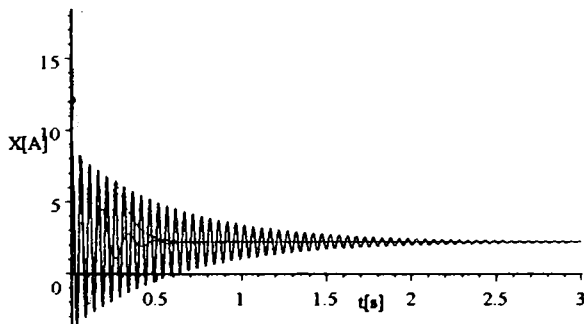


Fig.7.2.79. Variația în timp a lui  $I_d$ .

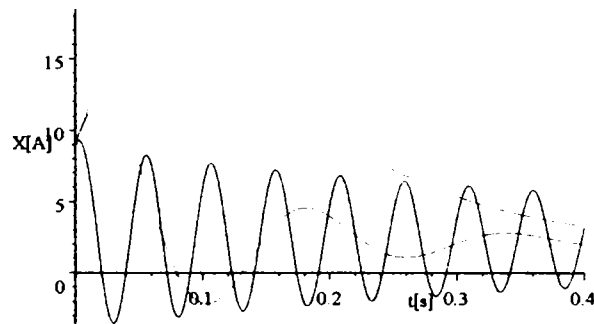


Fig.7.2.79'. Variația în timp a lui  $I_d$  (detaliu).

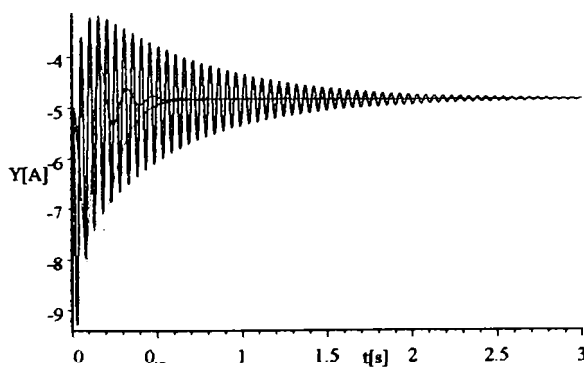


Fig.7.2.80. Variația în timp a lui  $I_q$ .

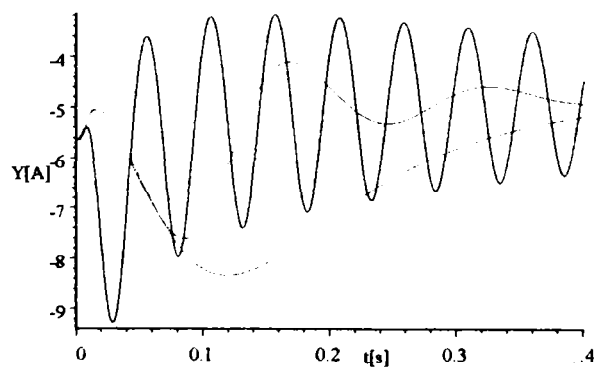


Fig.7.2.80'. Variația în timp a lui  $I_q$  (detaliu).

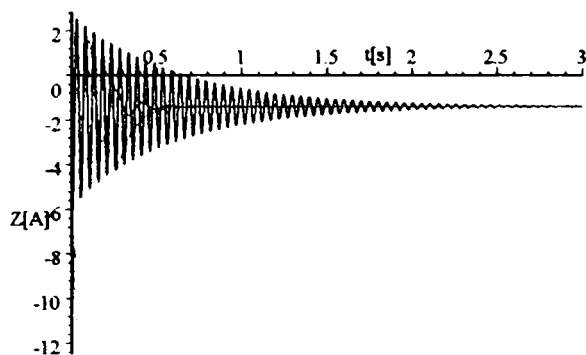


Fig.7.2.81. Variația în timp a lui  $I_d$ .

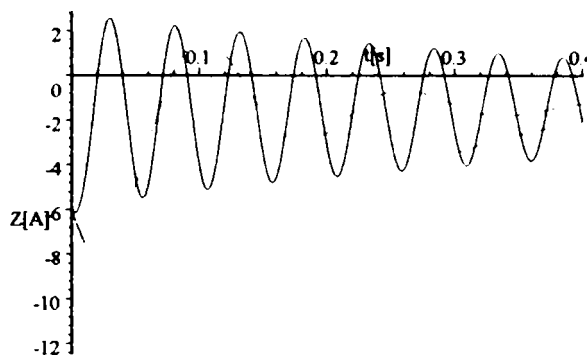


Fig.7.2.81'. Variația în timp a lui  $I_d$ (detaliu).

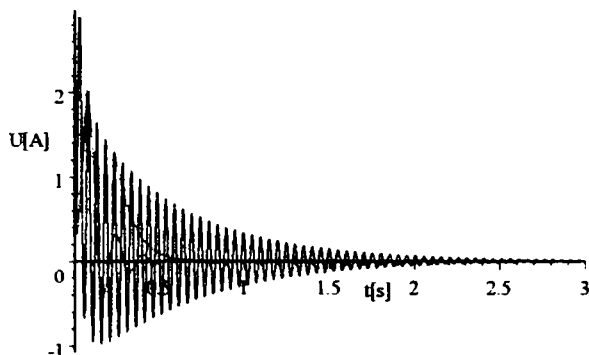


Fig.7.2.82. Variația în timp a lui  $I_{qr}$ .

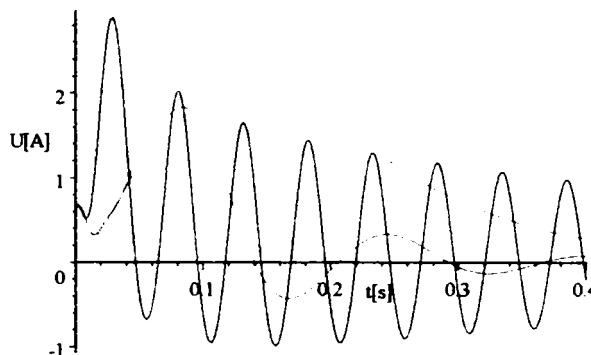


Fig.7.2.82'. Variația în timp a lui  $I_{qr}$ (detaliu).

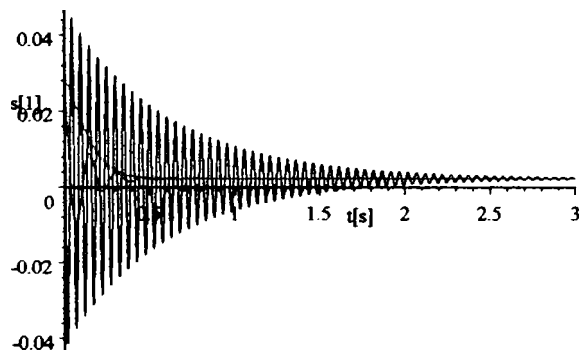


Fig.7.2.83. Variația în timp a lui  $s$ .

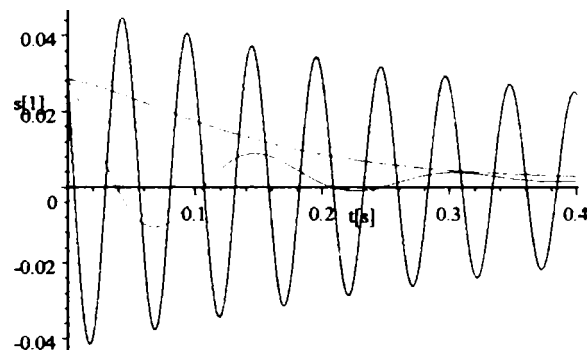


Fig.7.2.83'. Variația în timp a lui  $s$ (detaliu).

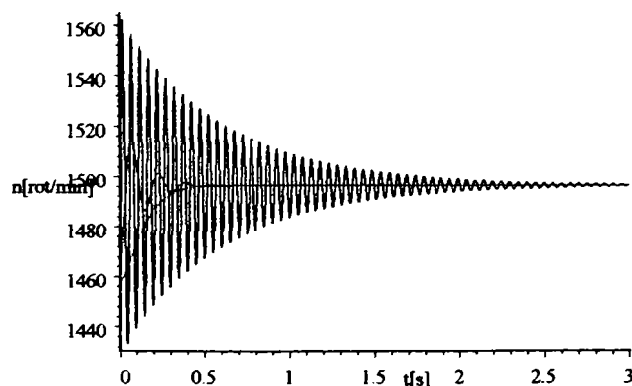


Fig.7.2.84. Variația lui  $n(t) = 1500(1 - s(t))$ .

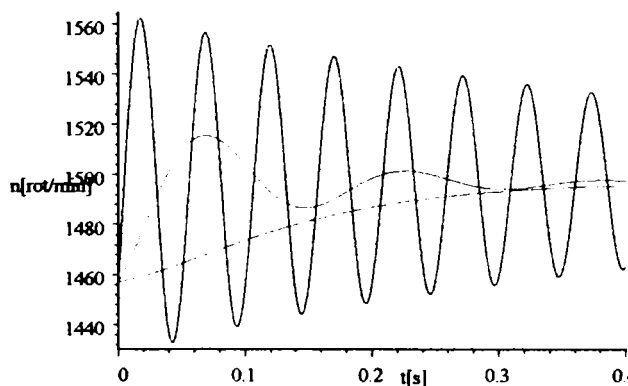


Fig.7.2.84'. Variația lui  $n(t) = 1500(1 - s(t))$ (detaliu).

Curentul statoric respectiv cuplul electromagnetic în mașina reală sunt:

$$I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos(314 \cdot t) - Y(t) \sin(314 \cdot t)) \tag{7.40}$$

$$M_{elmag}(t) = M(t) = 2 \cdot 0.373(Y(t)Z(t) - X(t)U(t)) \quad (7.41)$$



Fig.7.2.85. Variația în timp a lui  $I$ .

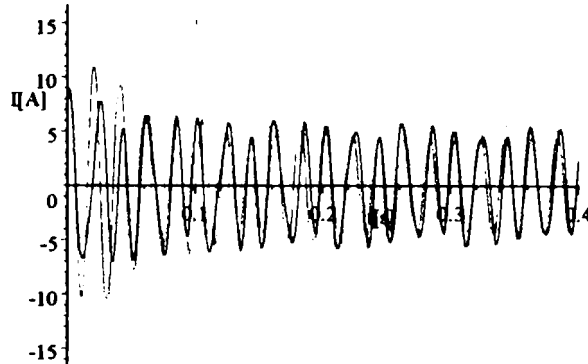


Fig.7.2.85'. Variația în timp a lui  $I$  (detaliu).

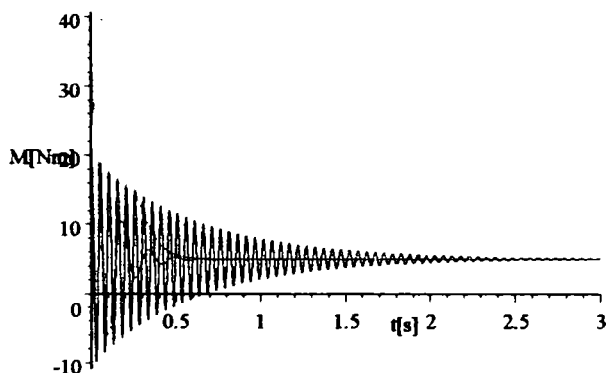


Fig.7.2.86. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$ .

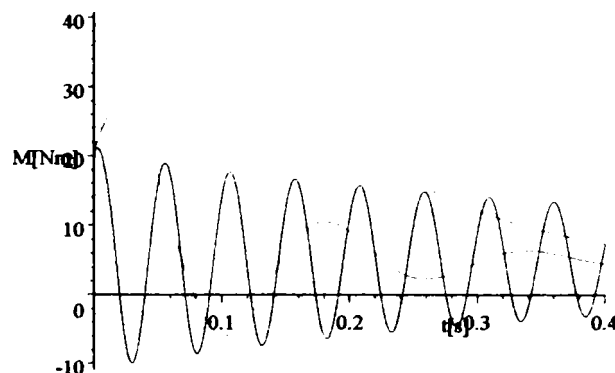


Fig.7.2.86'. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$  (detaliu).

Rezultatele studiului regimului tranzitoriu studiat în acest subparagraf sunt date în paragraful 7.4.

7.2.3.4. Descărcare bruscă de la 100% la 0% din  $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial  
Sistemul de ecuații diferențiale care modelează acest proces tranzitoriu este următorul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.9X + 0.25 \frac{dX}{dt} - 78.5Y + 0.373 \frac{dZ}{dt} - 117.122U = 220\sqrt{3} \\ 78.5X + 1.9Y + 0.25 \frac{dY}{dt} + 117.122Z + 0.373 \frac{dU}{dt} = 0 \\ 0.373 \frac{dX}{dt} - 117.122sY + 0.928Z + 0.597 \frac{dZ}{dt} - 187.458sU = 0 \\ 117.122sX + 0.373 \frac{dY}{dt} + 187.458sZ + 0.928U + 0.597 \frac{dU}{dt} = 0 \\ 2 \cdot 0.373(YZ - XU) - 0 + \boxed{J} \cdot 157 \frac{ds}{dt} = 0 \\ X(0) = 8.825481 \\ Y(0) = -5.585252 \\ Z(0) = -5.824595 \\ U(0) = 0.6331819 \\ s(0) = 0.02858204 \end{array} \right. \quad (7.42)$$

cu soluția:

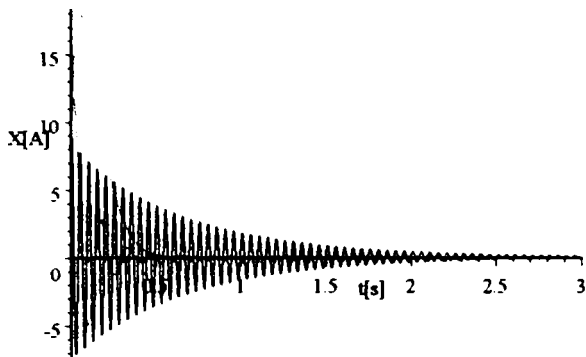


Fig.7.2.87. Variația în timp a lui  $I_d$ .

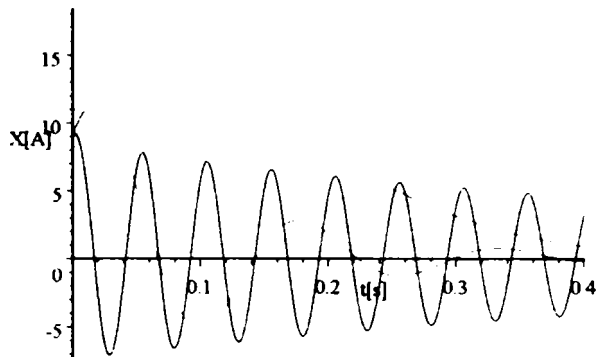


Fig.7.2.87'. Variația în timp a lui  $I_d$ (detaliu).

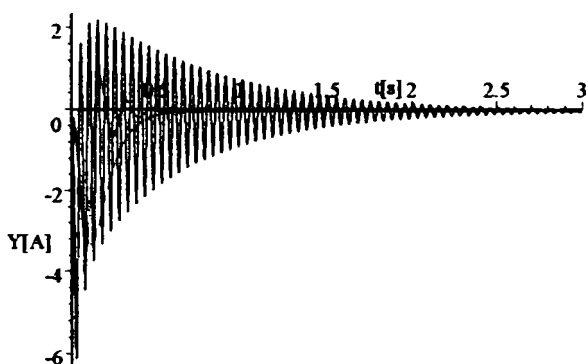


Fig.7.2.88. Variația în timp a lui  $I_q$ .

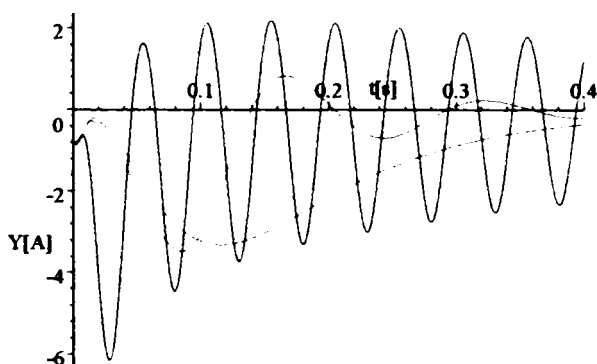


Fig.7.2.88'. Variația în timp a lui  $I_q$ (detaliu).

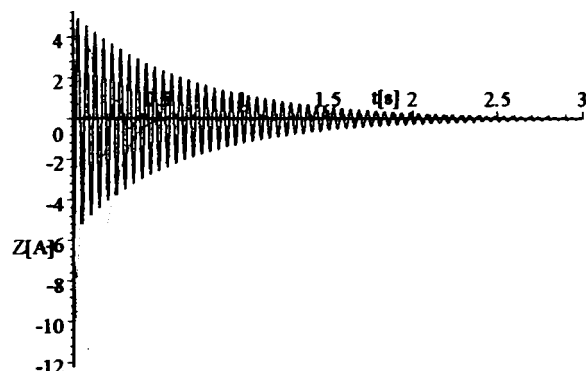


Fig.7.2.89. Variația în timp a lui  $I_{dr}$ .

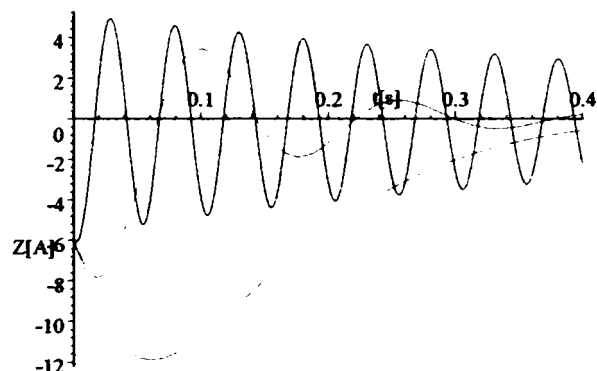


Fig.7.2.89'. Variația în timp a lui  $I_{dr}$ (detaliu).

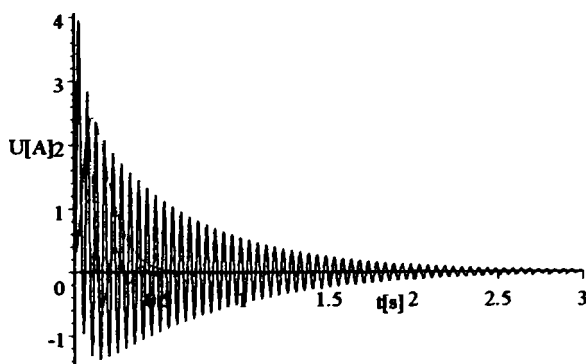


Fig.7.2.90. Variația în timp a lui  $I_{qr}$ .

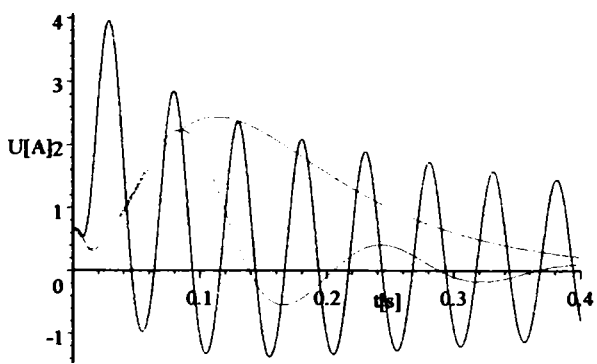


Fig.7.2.90'. Variația în timp a lui  $I_{qr}$ (detaliu).

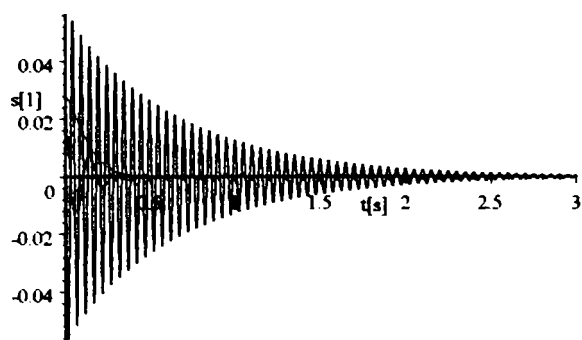


Fig. 7.2.91. Variația în timp a lui  $s$ .

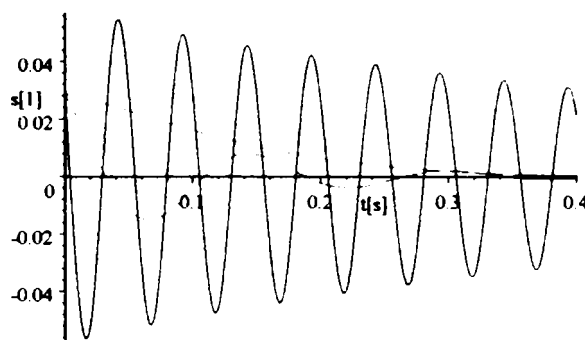


Fig. 7.2.91'. Variația în timp a lui  $s$ (detailiu).

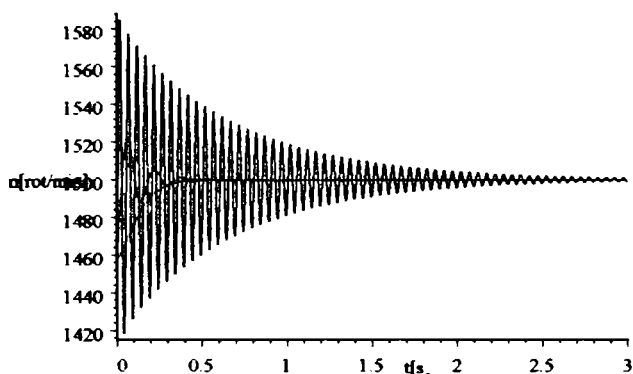


Fig. 7.2.92. Variația lui  $n(t) = 1500(1 - s(t))$ .

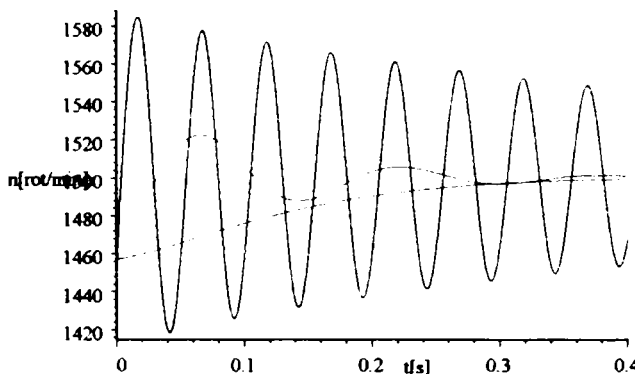


Fig. 7.2.92'. Variația lui  $n(t) = 1500(1 - s(t))$ (detailiu).

Curentul statoric respectiv cuplul electromagnetic în mașina reală sunt:

$$I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos(314 \cdot t) - Y(t) \sin(314 \cdot t)) \quad (7.43)$$

$$M_{elmag}(t) = M(t) = 2 \cdot 0.373(Y(t)Z(t) - X(t)U(t)) \quad (7.44)$$

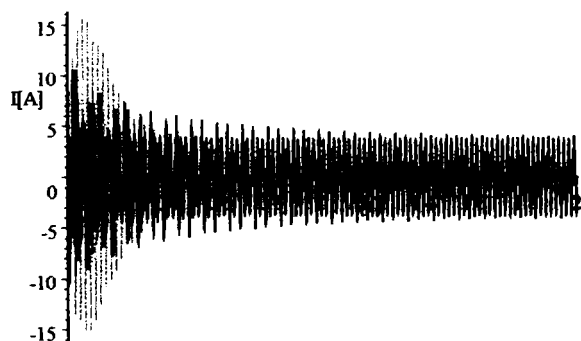


Fig. 7.2.93. Variația în timp a lui  $I$ .

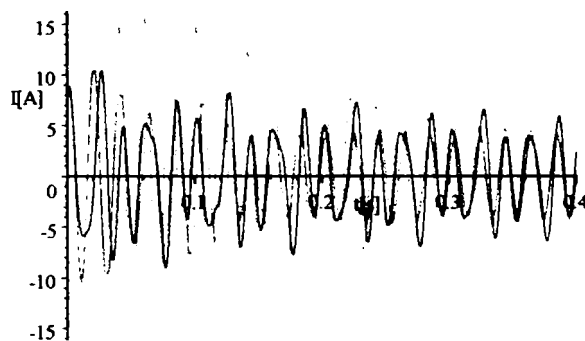


Fig. 7.2.93'. Variația în timp a lui  $I$ (detailiu).

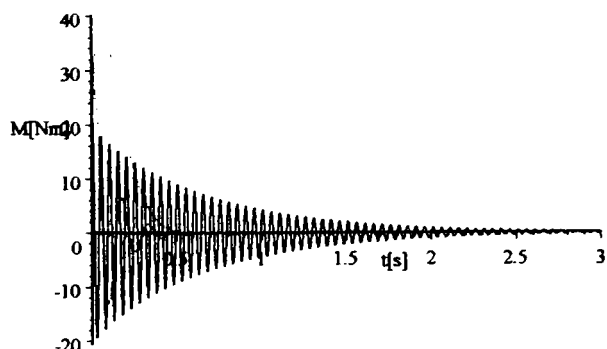


Fig. 7.2.94. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$ .

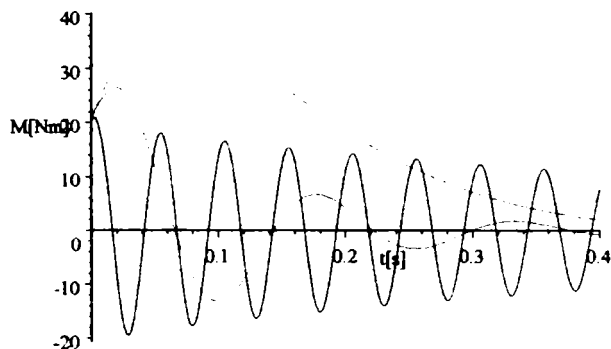


Fig. 7.2.94'. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$ (detailiu).

Rezultatele studiului regimului tranzitoriu studiat în acest subparagraf sunt date în paragraful 7.4.



7.2.4. Modelarea și simularea reversării motorului asincron

Inițial motorul asincron funcționează la o încărcare de 0% din  $M_N$  respectiv la o încărcare de 100% din  $M_N$  (a se vedea subparagraful 7.2.2.4).

Reversarea motorului asincron presupune schimbarea sensului de rotație.

Procesul tranzitoriu de reversare a motorului asincron începe la momentul de timp  $t_0 = 0[s]$  după ce în prealabil motorul asincron a fost deconectat de la rețea, timp în care se consideră că turația s-a păstrat constantă.

7.2.4.1. Reversarea motorului asincron de la 0% din  $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial

Ca și la încărcarea respectiv descărcarea motorului asincron, se consideră pentru momentul de inerție axial  $J$  doar trei valori care sunt cele mai semnificative în intervalul de variație al acestuia și anume:

$$J_1 = 0.017663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]; J_2 = 0.17663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]; J_3 = 1.7663[\text{kg} \cdot \text{m}^2].$$

Corespunzător acestor valori reprezentarea în timp a mărimilor ce intervin în procesele tranzitorii se face diferențiat prin culorile: negru, roșu respectiv verde.

Pe baza notațiilor(7.1), sistemul de ecuații diferențiale ce modelează acest proces tranzitoriu este următorul(din relația 7.5):

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.9X + 0.25 \frac{dX}{dt} - 78.5Y + 0.373 \frac{dZ}{dt} - 117.122U = 380 \\ 78.5X + 1.9Y + 0.25 \frac{dY}{dt} + 117.122Z + 0.373 \frac{dU}{dt} = 0 \\ 0.373 \frac{dX}{dt} - 117.122sY + 0.928Z + 0.597 \frac{dZ}{dt} - 187.458sU = 0 \\ 117.122sX + 0.373 \frac{dY}{dt} + 187.458sZ + 0.928U + 0.597 \frac{dU}{dt} = 0 \\ 2 \cdot 0.373(YZ - XU) - 0 + \boxed{J} \cdot 157 \frac{ds}{dt} = 0 \\ X(0) = 0 \\ Y(0) = 0 \\ Z(0) = 0 \\ U(0) = 0 \\ s(0) = 2 \end{array} \right. \quad (7.45)$$

În urma soluționării sistemului de ecuații diferențiale(7.45), rezultă următoarele evoluții în timp ale mărimilor din mașina model și din mașina reală:

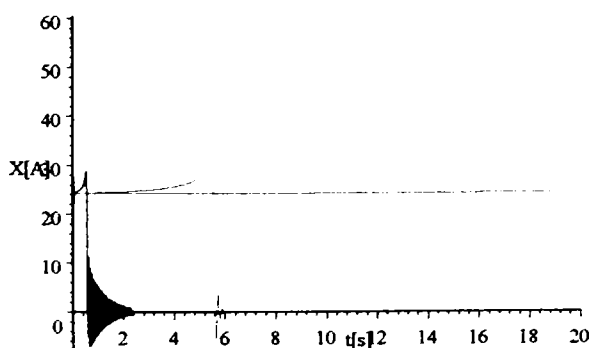


Fig.7.2.95. Variația în timp a lui  $I_d$ .

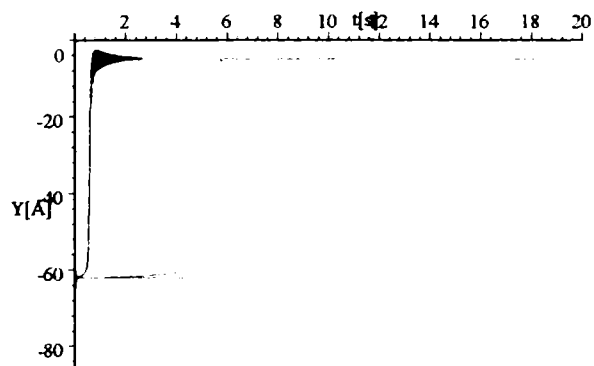


Fig.7.2.96. Variația în timp a lui  $I_q$ .

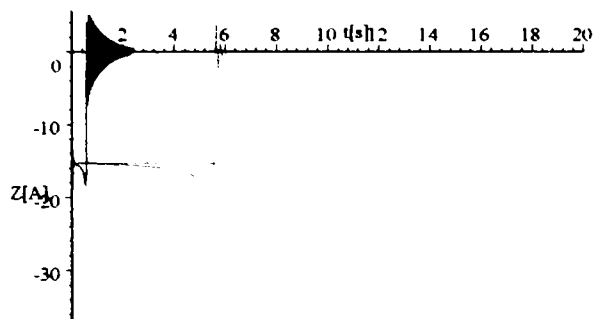


Fig.7.2.97.Variația în timp a lui  $I_{dr}$ .

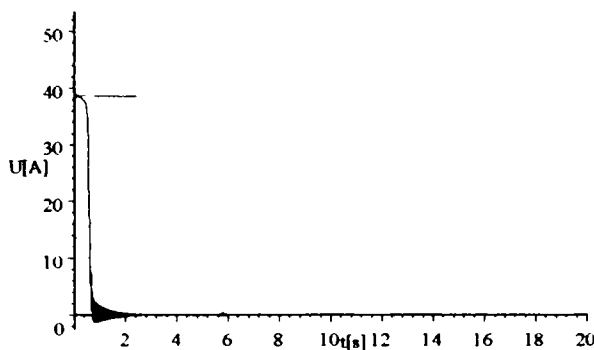


Fig.7.2.98.Variația în timp a lui  $I_{qr}$ .

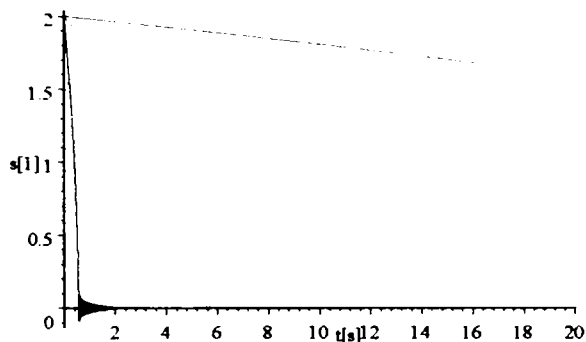


Fig.7.2.99.Variația în timp a lui  $s$ .

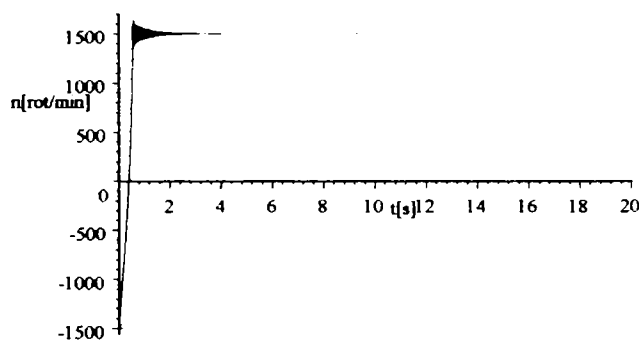


Fig.7.2.100.Variația lui  $n(t) = 1500(1 - s(t))$ .

Curentul statoric(7.43) respectiv cuplul electromagnetic(7.44) în mașina reală sunt:

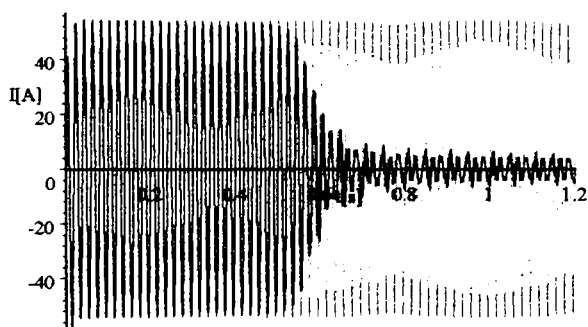


Fig.7.2.101.Variația în timp a lui  $I$ .

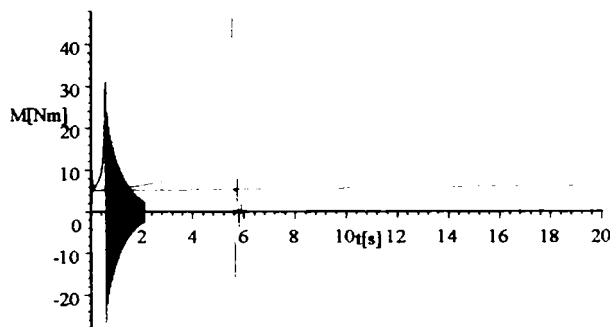


Fig.7.2.102.Variația în timp a lui  $M_{elmag}$ .

Rezultatele studiului regimului tranzitoriu din acest subparagraf sunt date în paragraful 7.4.

7.2.4.2.Reversarea motorului asincron de la 100% din  $M_N$ , cu modificarea momentului de inerție axial Sistemul de ecuații diferențiale ce modelează acest proces tranzitoriu este următorul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.9X + 0.25 \frac{dX}{dt} - 78.5Y + 0.373 \frac{dZ}{dt} - 117.122U = 380 \\ 78.5X + 1.9Y + 0.25 \frac{dY}{dt} + 117.122Z + 0.373 \frac{dU}{dt} = 0 \\ 0.373 \frac{dX}{dt} - 117.122sY + 0.928Z + 0.597 \frac{dZ}{dt} - 187.458sU = 0 \\ 117.122sX + 0.373 \frac{dY}{dt} + 187.458sZ + 0.928U + 0.597 \frac{dU}{dt} = 0 \\ 2 \cdot 0.373(YZ - XU) + 20.1 + [J] \cdot 157 \frac{ds}{dt} = 0 \\ X(0) = Y(0) = Z(0) = U(0) = 0 \\ s(0) = 2 \end{array} \right. \quad (7.46)$$

În urma soluționării sistemului de ecuații diferențiale(7.46), rezultă următoarele evoluții în timp:

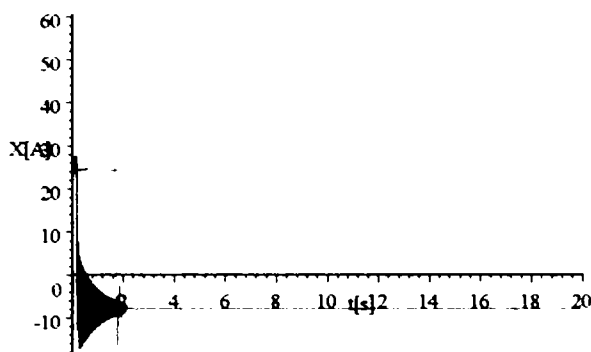


Fig. 7.2.103. Variația în timp a lui  $I_d$ .

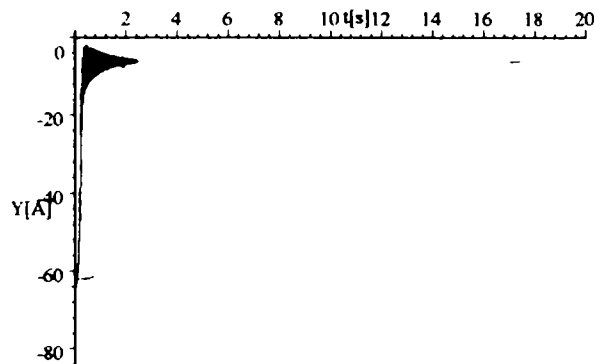


Fig. 7.2.104. Variația în timp a lui  $I_q$ .

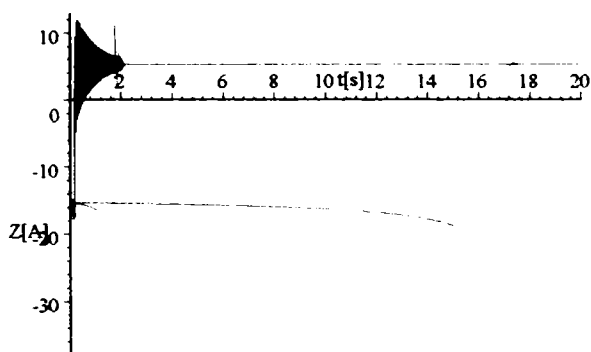


Fig. 7.2.105. Variația în timp a lui  $I_{dr}$ .

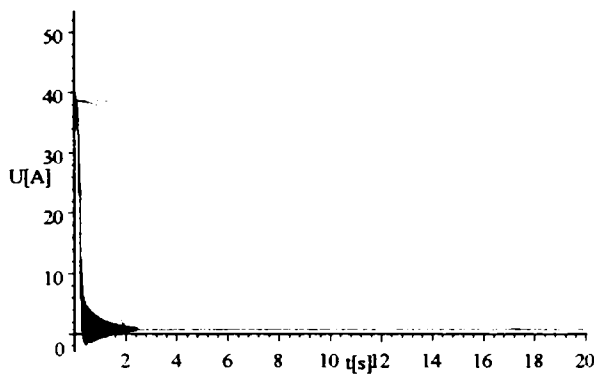


Fig. 7.2.106. Variația în timp a lui  $I_{qr}$ .

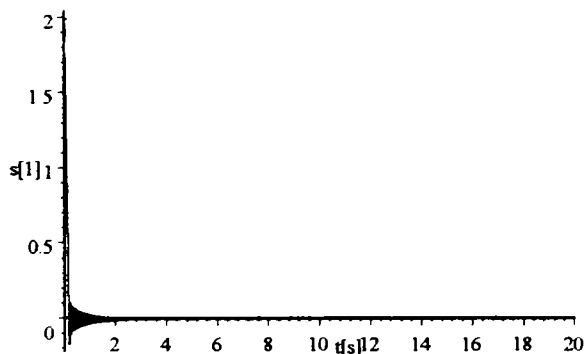


Fig. 7.2.107. Variația în timp a lui  $s$ .

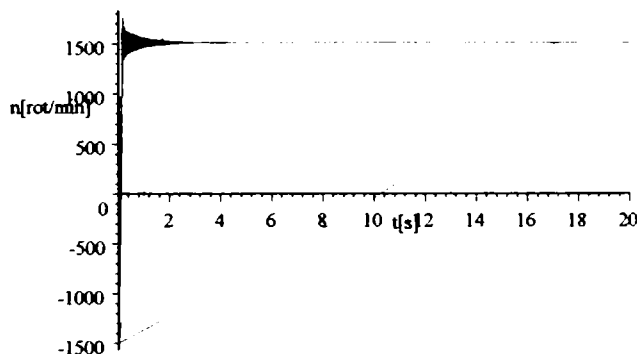


Fig. 7.2.108. Variația lui  $n(t) = 1500(1 - s(t))$ .

Curentul statoric(7.43) respectiv cuplul electromagnetic(7.44) în mașina reală sunt:

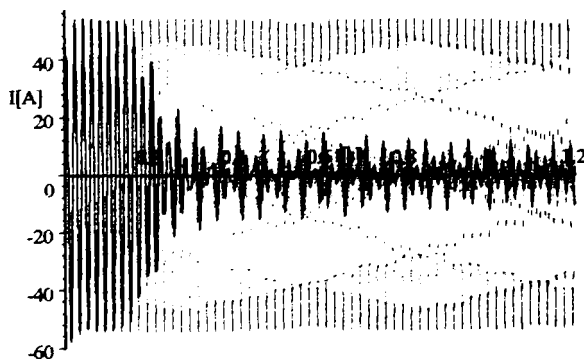


Fig. 7.2.109. Variația în timp a lui  $I$ .

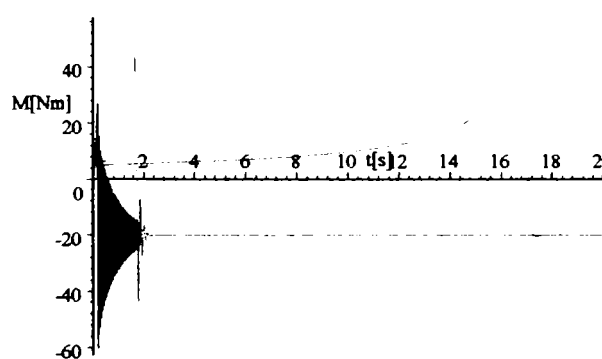


Fig. 7.2.110. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$ .

Rezultatele studiului regimului tranzitoriu din acest subparagraf sunt date în paragraful 7.4.

### 7.3.Funcționarea mașinii asincrone la tensiune și frecvență variabile

Funcționarea mașinii asincrone la tensiune și frecvență variabile a devenit posibilă odată cu evoluția electronicii de putere respectiv realizarea de convertoare statice care să permită modificarea în timp a valorii tensiunii de alimentare respectiv a valorii frecvenței acesteia. Ca urmare a acestor noi posibilități de alimentare a motoarelor din diverse acționări electrice, au rezultat sistemele de acționare electrică reglabile a căror utilizare (conducere și control) se poate face în cadrul unor anumite "strategii".

#### 7.3.1.Strategii de conducere și control a mașinii asincrone

Funcționarea la frecvență variabilă și la flux controlat s-a dezvoltat la mașina asincronă (în lucrarea de față se consideră regimul de motor asincron) după trei direcții (sau strategii):

- funcționarea la frecvență variabilă și la flux *statoric* controlat,
- funcționarea la frecvență variabilă și la flux *util* controlat,
- funcționarea la frecvență variabilă și la flux *rotoric* controlat.

Dintre aceste patru direcții prezentate mai sus, prima și a treia sunt cele mai utilizate în prezent. Ca atare, în lucrarea de față se vor prezenta pe larg doar cele două arătate mai sus.

#### 7.3.2.Modelarea și simularea funcționării motorului asincron la flux statoric controlat cu influența modificării momentului de inerție axial

Controlul fluxului statoric presupune fie controlul curentului statoric fie controlul tensiunii statorice.

Ecuțiile rotorice ale motorului asincron pentru regimul staționar sunt [B3]:

$$\begin{cases} 0 = -\omega_r M I_q + R_2 I_{dr} - \omega_r L_2 I_{qr} \\ 0 = \omega_r M I_d + R_2 I_{qr} + \omega_r L_2 I_{dr} \end{cases} \quad (7.47)$$

de unde rezultă curenții rotorici:

$$I_{dr} = \frac{\omega_r M (R_2 I_q - \omega_r L_2 I_d)}{R_2^2 + (\omega_r L_2)^2} \quad (7.48)$$

$$I_{qr} = \frac{-\omega_r M (R_2 I_d + \omega_r L_2 I_q)}{R_2^2 + (\omega_r L_2)^2} \quad (7.49)$$

respectiv fluxul statoric:

$$\begin{aligned} \Psi_s &= \sqrt{\Psi_d^2 + \Psi_q^2} = \sqrt{(L_1 I_d + M I_{dr})^2 + (L_1 I_q + M I_{qr})^2} = \\ &= \frac{\sqrt{I_d^2 + I_q^2} \cdot \sqrt{[L_1 (R_2^2 + \sigma \omega_r^2 L_2^2)]^2 + (\omega_r M^2 R_2)^2}}{R_2^2 + (\omega_r L_2)^2} = \frac{\sqrt{[L_1 (R_2^2 + \sigma \omega_r^2 L_2^2)]^2 + (\omega_r M^2 R_2)^2}}{R_2^2 + (\omega_r L_2)^2} I_s \end{aligned} \quad (7.50)$$

unde

$$\begin{aligned} I_s &= \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \rightarrow \text{curentul statoric,} \\ \omega_r &= \omega - \omega_m \rightarrow \text{pulsatia electrică a curenților rotorici,} \\ \omega &\rightarrow \text{pulsatia electrică a curenților statorici,} \\ \omega_m &\rightarrow \text{viteza unghiulară mecanică,} \\ \sigma &= \frac{L_1 L_2' - L_u}{L_1 L_2'} \rightarrow \text{factorul global de dispersie.} \end{aligned} \quad (7.51)$$

Ecuțiile generale ale motorului asincron în regimul staționar sunt [B3]:

$$\begin{cases} \underline{U}_s = R_1 \underline{I}_s + j\omega \underline{\Psi}_s \text{ (ecuația statorului)} \\ 0 = R_2 \underline{I}_r + j(\omega - \omega_m) \underline{\Psi}_r \text{ (ecuația rotorului)} \\ \underline{\Psi}_s = L_1 \underline{I}_s + M \underline{I}_r \text{ (ecuația fluxului statoric)} \\ \underline{\Psi}_r = L_2 \underline{I}_r + M \underline{I}_s \text{ (ecuația fluxului rotoric)} \end{cases} \quad (7.52)$$

sau prin reducerea rotorului la stator(7.53):

$$I_r = kI'_r; \Psi'_r = k\Psi_r; L'_2 = k^2L_2; R'_2 = k^2R_2; M' = kM = X_m/\omega = L_u; \quad (7.53)$$

ecuațiile (7.52) devin:

$$\begin{cases} \underline{U}_s = R_1 \underline{I}_s + j\omega \underline{\Psi}_s \text{ (ecuația statorului)} \\ 0 = R'_2 \underline{I}'_r + j(\omega - \omega_m) \underline{\Psi}'_r \text{ (ecuația rotorului)} \\ \underline{\Psi}_s = L_1 \underline{I}_s + M' \underline{I}'_r = L_1 \underline{I}_s + L_u \underline{I}'_r \text{ (ecuația fluxului statoric)} \\ \underline{\Psi}_r = L'_2 \underline{I}'_r + M' \underline{I}_s = L'_2 \underline{I}'_r + L_u \underline{I}_s \text{ (ecuația fluxului rotoric)} \end{cases} \quad (7.54)$$

Din sistemul de ecuații (7.52) rezultă curentul statoric  $\underline{I}_s$  de forma:

$$\underline{I}_s = \underline{\Psi}_s \left[ \frac{L_1 (R'_2)^2 + (\omega - \omega_m)^2 L'_2 (L_1 L'_2 - L_u^2)}{(L_1 R'_2)^2 + (\omega - \omega_m)^2 (L_1 L'_2 - L_u^2)^2} + j \frac{(\omega - \omega_m) R'_2 L_u^2}{(L_1 R'_2)^2 + (\omega - \omega_m)^2 (L_1 L'_2 - L_u^2)^2} \right] \quad (7.55)$$

sau

$$I_s = \frac{\Psi_s}{L_1} \frac{\sqrt{[L_1 (R'_2)^2 + \sigma \omega_r^2 (L'_2)^2 L_1]^2 + (\omega_r R'_2 L_u^2)^2}}{L_1 (R'_2)^2 + \sigma^2 \omega_r^2 (L'_2)^2 L_1} \quad (7.56)$$

Cuplul electromagnetic se calculează cu relația următoare[B3,D1]:

$$M_{elmag} = 3p_1 \operatorname{Im}(\underline{I}_s \cdot \underline{\Psi}_s^*) \quad (7.57)$$

adică

$$M_{elmag} = 3p_1 \Psi_s^2 \frac{\omega_r R'_2 L_u^2}{L_1 (R'_2)^2 + \omega_r^2 (L_1 L'_2 - L_u^2)^2} \quad (7.58)$$

Factorul de putere se calculează cu următoarea relație:

$$\cos \varphi(\omega_r) = \frac{P}{3U_s I_s} = \frac{\omega_r R'_2 L_u^2}{\sqrt{[L_1 (R'_2)^2 + \sigma \omega_r^2 L_1 (L'_2)^2]^2 + (\omega_r R'_2 L_u^2)^2}} \quad (7.59)$$

La factor de putere maxim se obține, prin anularea derivatei funcției  $\cos \varphi(\omega_r)$ , pulsația rotorică:

$$\omega_r(\operatorname{la}(\cos \varphi)_{\max}) = \frac{R'_2}{L'_2 \sqrt{\sigma}} \quad (7.60)$$

Valoarea maximă a factorului de putere este dată de următoarea expresie(prin înlocuire în relația 7.59 din relația 7.60):

$$\cos \varphi_{\max} = \frac{L_u^2}{\sqrt{L_u^4 + 4\sigma (L_1 L'_2)^2}} = \frac{L_u^2}{2L_1 L'_2 - L_u^2} \cong \frac{L_u^2}{L_1 L'_2 (1 + \sigma)} = \frac{1 - \sigma}{1 + \sigma} \quad (7.61)$$

Cuplul electromagnetic la  $\cos \varphi_{\max}$  are următoarea expresie:

$$M_{elmag(\cos \varphi_{\max})} = 3p_1 \Psi_s^2 \frac{L_u^2}{(1 + \sigma) L_1^2 L'_2 \sqrt{\sigma}} \quad (7.62)$$

Cuplul electromagnetic maxim se obține prin anularea derivatei cuplului în raport cu  $\omega_r$ :

$$M'_{elmag}(\omega_r) = 0 \quad (7.63)$$

rezultând:

$$\omega_{rm} = \pm \frac{L_1 R_2'}{L_1 L_2' - L_u^2} = \pm \frac{R_2'}{\sigma L_2'} \quad (7.64)$$

pentru care cuplul electromagnetic maxim este:

$$M_{elmag.max} = \frac{3}{2} \frac{p_1 L_u^2 \Psi_s^2}{L_1 (L_1 L_2' - L_u^2)} = \frac{3}{2} \frac{p_1 (1-\sigma)}{\sigma L_1} \Psi_s^2 \quad (7.65)$$

Tensiunea la bornele mașinii asincrone se calculează cu relația 7.66 (vezi relațiile 7.54, 7.56):

$$\underline{U}_s = R_1 \underline{I}_s + j\omega \underline{\Psi}_s = \left[ \frac{R_1 L_1 (R_2')^2 + (\omega - \omega_m)^2 R_1 L_2' (L_1 L_2' - L_u^2)}{(L_1 R_2')^2 + (\omega - \omega_m)^2 (L_1 L_2' - L_u^2)^2} + j \frac{R_1 (\omega - \omega_m) R_2' L_u^2}{(L_1 R_2')^2 + (\omega - \omega_m)^2 (L_1 L_2' - L_u^2)^2} + \omega \right] \underline{\Psi}_s \quad (7.66)$$

sau în modul:

$$U_s = \frac{\frac{R_1}{L_1} \sqrt{\left[ \left( \frac{R_2'}{L_2'} \right)^2 + \sigma \omega_r^2 \right]^2 + \left\{ \left( \frac{R_2'}{L_2'} \right) (1-\sigma) \omega_r + \omega \frac{L_1}{R_1} \left[ \left( \frac{R_2'}{L_2'} \right)^2 + \sigma^2 \omega_r^2 \right] \right\}^2}}{\left( \frac{R_2'}{L_2'} \right)^2 + \sigma^2 \omega_r^2} \quad (7.67)$$

Curentul  $I_s$  rezultă din cuplul electromagnetic (vezi relația 7.57), având expresia:

$$I_s = \frac{\Psi_s}{L_1} \sqrt{\frac{(R_2')^2 + (\omega_r L_2')^2}{(R_2')^2 + (\sigma \omega_r L_2')^2}} \quad (7.68)$$

Factorul de putere la cuplul maxim este:

$$\cos \varphi = \frac{\Omega_1 M_{elmag.max}}{3 U_s I_s} \quad (7.69)$$

Frecvența minimă (la torație zero) poate fi calculată din cuplul rezistent în felul următor:

$$M_{rez} = 3p_1 \Psi_s^2 \frac{\omega_r (1-\sigma) R_2'}{L_1 L_2' \left[ \left( \frac{R_2'}{L_2'} \right)^2 + \sigma^2 \omega_r^2 \right]} = \frac{3p_1 \Psi_s^2 (1-\sigma)}{\sigma L_1 (x + \frac{1}{x})} \quad (7.70)$$

sau

$$x = \frac{\sigma \omega_r L_2'}{R_2'} = \frac{\frac{3p_1 \Psi_s^2 (1-\sigma)}{\sigma L_1 M_{rez}} \pm \sqrt{\left( \frac{3p_1 \Psi_s^2 (1-\sigma)}{\sigma L_1 M_{rez}} \right)^2 - 4}}{2} \quad (7.71)$$

și deci la  $\omega_m = 0 \Rightarrow \omega = \omega_r$ , frecvența minimă are expresia următoare:

$$f_{min} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{R_2'}{\sigma L_2'} \frac{\frac{3p_1 \Psi_s^2 (1-\sigma)}{\sigma L_1 M_{rez}} \pm \sqrt{\left( \frac{3p_1 \Psi_s^2 (1-\sigma)}{\sigma L_1 M_{rez}} \right)^2 - 4}}{2} \quad (7.72)$$

Frecvența maximă se deduce din faptul că  $M_{rez} < M_{elmag,max}$  cu precizarea că la valori ale frecvenței peste  $f_N$ , tensiunea la borne este limitată la  $U_N$  și deci cuplul maxim scade în valoare cu  $(U/U_N)^2$ .

Deoarece fluxul statoric  $\Psi_s$  scade invers proporțional cu frecvența  $f$ , ( $\Psi_s = U_N / 2\pi f$ ), valoarea cuplului maxim, conform cu relația (7.65), scade cu  $f^2$ :

$$M_{elmag,max} = \frac{3}{2} \frac{p_1 L_u^2 U_N^2}{L_1 (2\pi f)^2 (L_1 L_2' - L_u^2)} = \frac{C}{f^2} \quad (7.73)$$

unde

$$C = \frac{3}{2} \frac{p_1 L_u^2 U_N^2}{L_1 (2\pi)^2 (L_1 L_2' - L_u^2)} = \text{constant (pentru o mașină dată)} \quad (7.74)$$

Se obține astfel frecvența maximă (limită) la care mașina asincronă poate funcționa:

$$f_{max} = \sqrt{\frac{C}{M_{elmag,max}}} = \sqrt{\frac{3}{2} \frac{p_1 L_u^2 U_N^2}{L_1 (2\pi)^2 (L_1 L_2' - L_u^2) M_{elmag,max}}} \quad (7.75)$$

Dacă sistemul de acționare electrică nu impune o anumită valoare a cuplului rezistent, calculul frecvenței limită maximă are în vedere valoarea curentului  $I_s$  (eventual  $I_s = I_N$ ) și a tensiunii  $U_N$ . Din a doua respectiv a patra ecuație din (7.52) se poate scrie:

$$\underline{\Psi}_s = \frac{L_1 R_2' + j\sigma\omega_r L_1 L_2'}{R_2' + j\omega_r L_2'} \underline{I}_s = \frac{L_1 L_s \left(1 + \frac{j\sigma\omega_r L_2'}{R_2'}\right)}{\left(1 + \frac{j\omega_r L_2'}{R_2'}\right)} \quad (7.76)$$

de unde:

$$\omega_r = \pm \frac{R_2'}{L_2'} \sqrt{\frac{L_1^2 I_s^2 - \Psi_s^2}{\Psi_s^2 - \sigma^2 L_1^2 I_s^2}} \quad (7.77)$$

Pentru a funcționa pe porțiunea satabilă a caracteristicii mecanice și prin folosirea relației (7.64), se obține:

$$\frac{R_2'}{L_2'} \sqrt{\frac{L_1^2 I_s^2 - \Psi_s^2}{\Psi_s^2 - \sigma^2 L_1^2 I_s^2}} \leq \frac{L_1 R_2'}{\sigma L_1 L_2'} \quad (7.78)$$

sau

$$\frac{L_1^2 I_s^2 - \left(\frac{U_N}{2\pi f}\right)^2}{\left(\frac{U_N}{2\pi f}\right)^2 - \sigma^2 L_1^2 I_s^2} \leq \frac{1}{\sigma^2} \quad (7.79)$$

adică:

$$f_{max} = \frac{U_N \sqrt{(1+\sigma^2)}}{2\pi \sqrt{2} \sigma L_1 I_s} \quad (7.80)$$

În această situație cuplul rezistent trebuie să fie mai mic decât cel care rezultă prin înlocuirea lui  $\Psi_s$  obținut din relația (7.78) în relația cuplului maxim (7.65).

$$M_{rez} = \frac{3}{2} \frac{p_1 (1-\sigma)}{\sigma L_1} \cdot \frac{2\sigma^2 L_1^2 I_s^2}{1+\sigma^2} = \frac{3p_1 (1-\sigma) \sigma L_1 I_s^2}{1+\sigma^2} \quad (7.81)$$

Conform celor prezentate până acum, se poate prezenta schematic funcționarea unui sistem de acționare electrică cu motor asincron la flux statoric controlat (constant) în următoarea schemă de principiu:

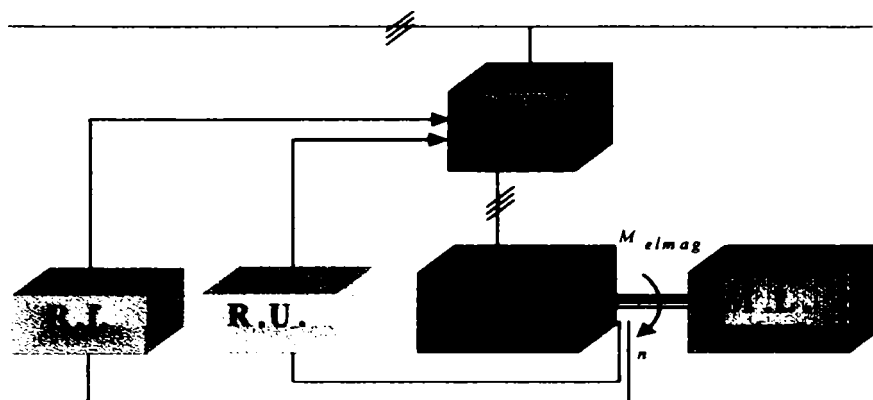


Fig.7.3.1.Sistemul de reglare automată pentru funcționarea la  $\Psi_s = ct.$  a M.A.

unde:C.S. - convertor static de frecvență;M.A.- motor asincron;R.U. - regulator de tensiune;  
R.f. - regulator de frecvență; M.L. - mașină de lucru.

Pentru exemplificare, în acest paragraf se va prezenta o încărcare bruscă de sarcină de la 25% la 75% din  $M_N$  în condițiile în care pe tensiunea statorică respectiv pe frecvența tensiunii statorice se consideră două regulatoare de tip PI pentru aceleași valori ale factorului de amplificarea respectiv ale constantei de timp ca și în paragraful 6.3(a se vedea relațiile (6.128,6.130,6.131)).Deasemenea saltul de cuplu se face pentru aceleași valori ale momentului de inerție axial(cu același mod de reprezentare grafică color) ca și în subparagraful 7.2.2(a se vedea tabelul 7.12).

Inițial motorul asincron(vezi relația 5.13) funcționează la turația  $n(0)$ , la tensiunea  $U_s(0)$  și la frecvența  $f(0)$ , cuplul electromagnetic fiind egal cu cuplul rezistent( $M_{elmag}(0) = M_{rez}(0)$ ).

După ce saltul de cuplu a avut loc, cuplul electromagnetic va devenii egal cu cel rezistent( $M_{elmag}(\infty) = M_{rez}(\infty)$ ) și va atinge noua valoare de regim staționar, turația se va stabili la  $n(\infty)$  la tensiunea  $U_s(\infty)$  și frecvența  $f(\infty)$ , fluxul statoric fiind același cu cel inițial( $\Psi_s(0) = \Psi_s(\infty)$ ).

La  $\Psi_s = 1.2[Wb]$  și condițiile inițiale:

$$\omega(0) = 314[rad/s]; f(0) = 50[Hz]; \omega_m(0) = 313.2719[rad/s] \Rightarrow \omega_r(0) = 0.7281[rad/s] \quad (7.82)$$

tensiunea inițială  $U_s(0)$ , având în vedere relația (7.67), este:

$$U_s(0) = 380.8904[V] \quad (7.83)$$

În vederea simplificării scrierii, se fac următoarele notații:

<u>Mărime</u>	<u>Notație</u>	<u>Semnificație</u>
$I_d(t)$	$= X(t)$	-curentul statoric din axa d,
$I_q(t)$	$= Y(t)$	-curentul statoric din axa q,
$I_{\phi d}(t)$	$= Z(t)$	-curentul rotoric din axa d,
$I_{\phi q}(t)$	$= U(t)$	-curentul rotoric din axa q,
$U_s(t)$	$= V(t)$	-tensiunea statorică,
$I(t)$	$= I(t)$	-curentul statoric în mașina reală,
$\omega(t)$	$= \omega(t)$	-pulsăția electrică statorică,
$\omega_m(t)$	$= P(t)$	-viteza unghiulară mecanică,
$\Psi_s(t)$	$= S(t)$	-fluxul statoric,
$\Psi_r(t)$	$= R(t)$	-fluxul rotoric,
$M_{elmag}(t)$	$= M(t)$	-cuplul electromagnetic.



Condițiile inițiale se obțin din următorul sistem algebric:

$$\begin{cases} 1.9X - 78.5Y - 117.122U = 380.8904 \\ 78.5X + 1.9Y + 117.122Z = 0 \\ -0.2715813Y + 0.928Z - 0.4346757U = 0 \\ 0.2715813X + 0.4346757Z + 0.928U = 0 \end{cases} \quad (7.85)$$

și au valorile:

$$U(0) = 0.01049450[A]; Z(0) = -1.403984[A]; X(0) = 2.211267[A]; Y(0) = -4.814244[A] \quad (7.86)$$

Cuplul electromagnetic este egal cu cel rezistent și are valoarea:

$$\begin{aligned} M(0) &= 2 \cdot 0.373(Y(0)Z(0) - X(0)U(0)) = \\ &= 2 \cdot 0.373((-4.814244) \cdot (-1.403984) - 2.211267 \cdot 0.01049450) = 5.024993[Nm] \end{aligned} \quad (7.87)$$

Condițiile finale pentru:

$$\left. \begin{aligned} \omega(\infty) &= 300[rad/s] \\ f(\infty) &= 47.74648[Hz] \\ \omega_m(\infty) &= 297.8959[rad/s] \end{aligned} \right\} \Rightarrow \omega_r(\infty) = 2.1[rad/s] \quad (7.88)$$

tensiunea finală  $U_s(\infty)$ , având în vedere relația (7.67), este:

$$U_s(\infty) = 388.8699[V] \quad (7.89)$$

Condițiile finale se obțin din următorul sistem algebric:

$$\begin{cases} 1.9X - 78.5Y - 117.122U = 388.8699 \\ 78.5X + 1.9Y + 117.122Z = 0 \\ -0.8214547Y + 0.928Z - 1.314768U = 0 \\ 0.8214547X + 1.314768Z + 0.928U = 0 \end{cases} \quad (7.90)$$

și au valorile:

$$Y(\infty) = -5.235761[A]; U(\infty) = 0.2931887[A]; Z(\infty) = -4.219251[A]; X(\infty) = 6.421849[A]; \quad (7.91)$$

Cuplul electromagnetic este egal cu cel rezistent și are valoarea(a se vedea relațiile 3.17, 7.84):

$$\begin{aligned} M(\infty) &= 2 \cdot 0.373(Y(\infty)Z(\infty) - X(\infty)U(\infty)) = \\ &= 2 \cdot 0.373((-5.235761) \cdot (-4.219251) - 6.421849 \cdot 0.2931887) = 15.07530[Nm] \end{aligned} \quad (7.92)$$

Pe baza parametrilor mașinii asincrone considerate în această lucrare, determinați în capitolul 5, respectiv pe baza ecuațiilor mașinii asincrone prezentate în capitolul 3:(3.12, 3.13, 3.17, 3.18, 3.19), conform cu notațiile(7.84), rezultă următorul sistem de ecuații diferențiale care modelează procesul tranzitoriu de încărcare bruscă al motorului asincron:

$$\left. \begin{aligned}
 1.9X + 0.25 \frac{dX}{dt} - 0.25\omega Y + 0.373 \frac{dZ}{dt} - 0.373\omega U &= V \\
 0.25\omega X + 1.9Y + 0.25 \frac{dY}{dt} + 0.373\omega Z + 0.373 \frac{dU}{dt} &= 0 \\
 0.373 \frac{dX}{dt} - 0.373(\omega - P)Y + 0.928Z + 0.597 \frac{dZ}{dt} - 0.597(\omega - P)U &= 0 \\
 0.373(\omega - P)X + 0.373 \frac{dY}{dt} + 0.597(\omega - P)Z + 0.928U + 0.597 \frac{dU}{dt} &= 0 \\
 2 \cdot 0.373(YZ - XU) - 15.075 - \boxed{J} \frac{dP}{dt} &= 0 \\
 -\frac{dV}{dt} - 10(V - 388.8699) - 0.1 \frac{dV}{dt} &= 0 \\
 -\frac{d\omega}{dt} - 10(\omega - 300) - 0.1 \frac{d\omega}{dt} &= 0 \\
 X(0) &= 2.211267 \\
 Y(0) &= -4.814244 \\
 Z(0) &= -1.403984 \\
 U(0) &= 0.01049450 \\
 V(0) &= 380.8904 \\
 \omega(0) &= 314 \\
 P(0) &= 313.2719
 \end{aligned} \right\} \quad (7.93)$$

În urma soluționării sistemului de ecuații diferențiale (7.93), rezultă următoarele evoluții în timp ale mărimilor din mașina model și din mașina reală:

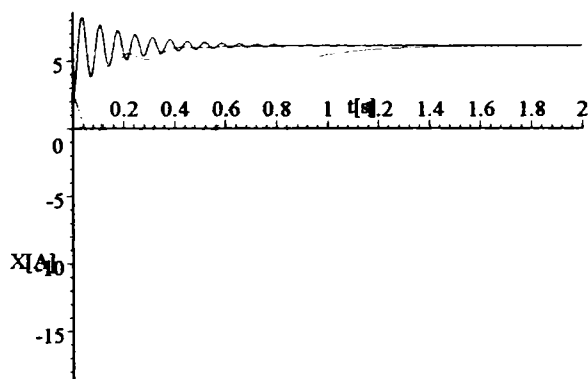


Fig. 7.3.2. Variația în timp a lui  $I_d$ .

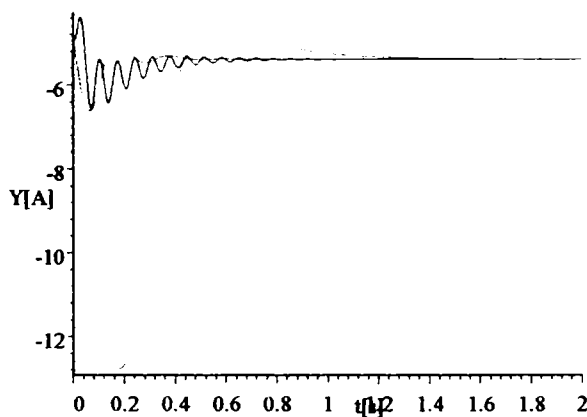


Fig. 7.3.3. Variația în timp a lui  $I_q$ .

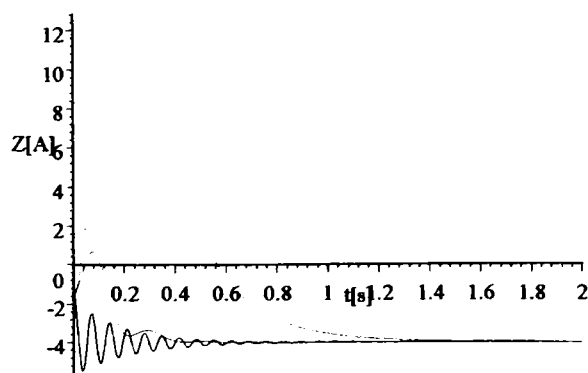


Fig. 7.3.4. Variația în timp a lui  $I_{dr}$ .

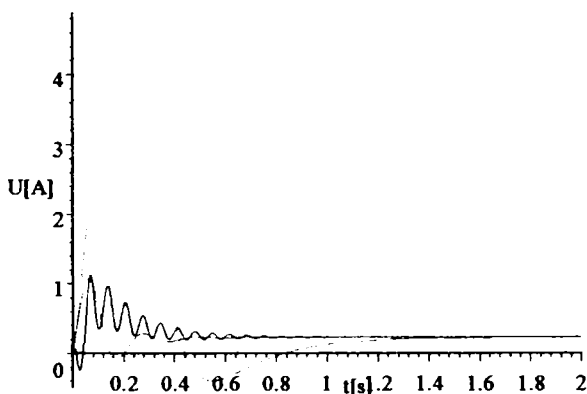


Fig. 7.3.5. Variația în timp a lui  $I_{qr}$ .

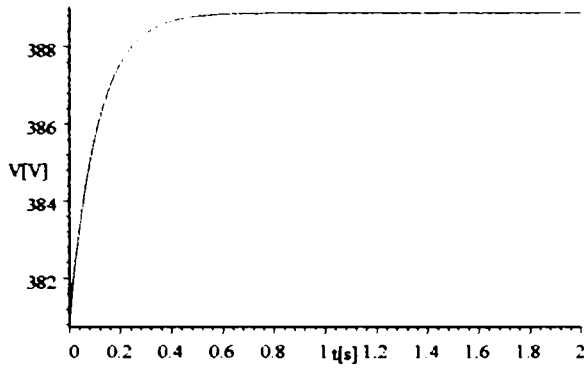


Fig. 7.3.6. Variația în timp a lui  $U_s$ .

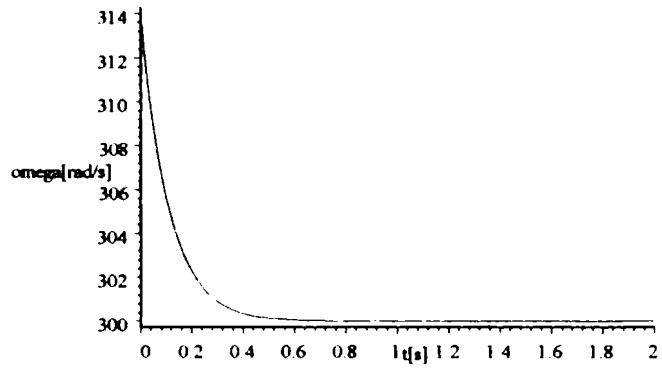


Fig. 7.3.7. Variația în timp a lui  $\omega$ .

Variațiile în timp ale fluxului statoric respectiv rotoric sunt date de expresiile (7.94,7.95):

$$S(t) = \sqrt{(0.25X(t) + 0.373Z(t))^2 + (0.25Y(t) + 0.373U(t))^2} \quad (7.94)$$

$$R(t) = \sqrt{(0.597Z(t) + 0.373X(t))^2 + (0.597U(t) + 0.373Y(t))^2} \quad (7.95)$$

și sunt prezentate în figurile 7.3.9 și 7.3.10 iar variațiile în timp ale curentului statoric respectiv a cuplului electromagnetic din mașina reală(7.96,7.97):

$$I(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} (X(t) \cos(\omega(t) \cdot t) - Y(t) \sin(\omega(t) \cdot t)) \quad (7.96)$$

$$M(t) = 2 \cdot 0.373(Y(t)Z(t) - X(t)U(t)) \quad (7.97)$$

sunt prezentate în figurile 7.3.11 și 7.3.12.

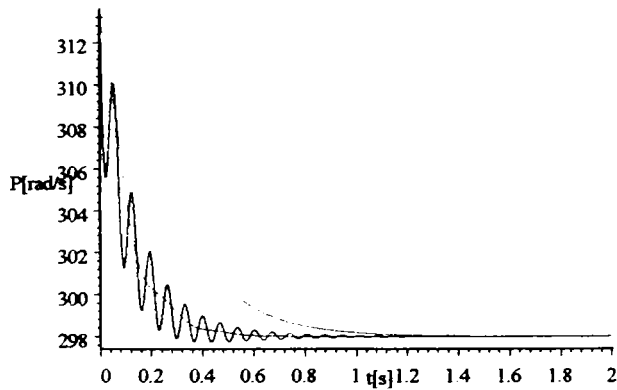


Fig. 7.3.8. Variația în timp a lui  $\omega_m$ .

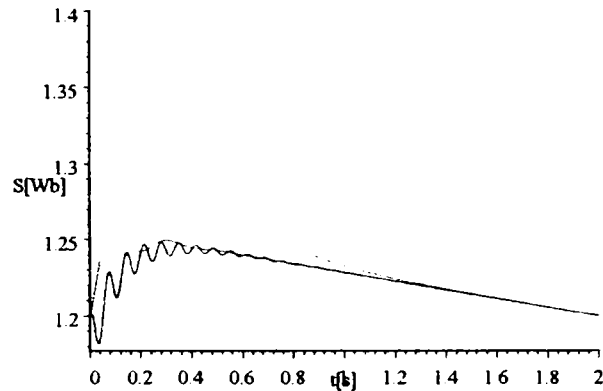


Fig. 7.3.9. Variația în timp a lui  $\Psi_s$ .

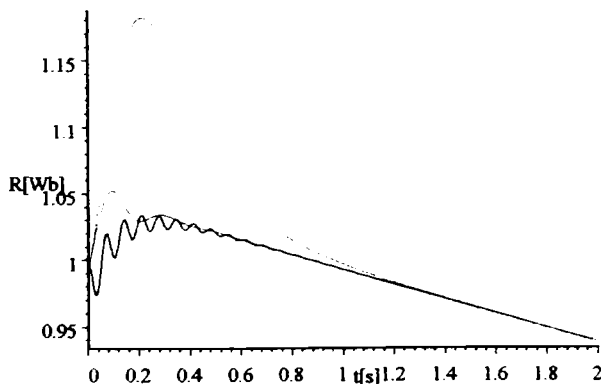


Fig. 7.3.10. Variația în timp a lui  $\Psi_r$ .

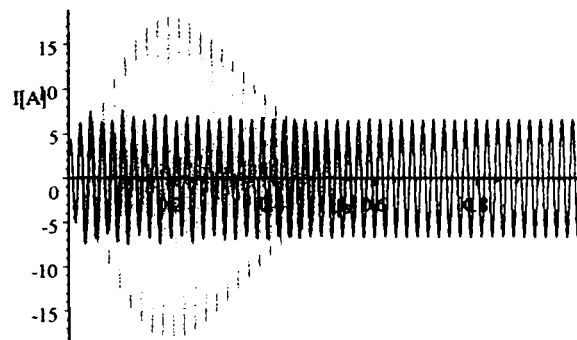


Fig. 7.3.11. Variația în timp a lui  $I$ .

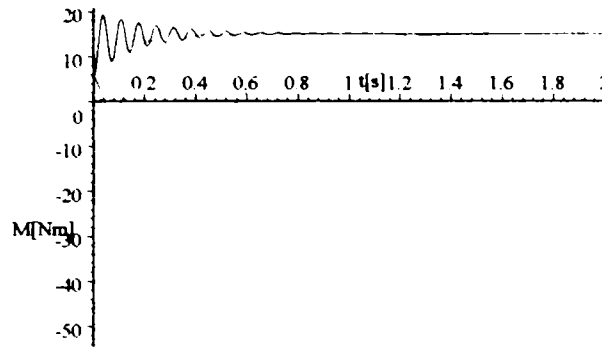


Fig. 7.3.12. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$ .

Rezultatele studiului regimului tranzitoriu studiat în acest subparagraf sunt date în paragraful 7.4.

7.3.3. Modelarea și simularea funcționării motorului asincron la flux rotoric controlat cu influența modificării momentului de inerție axial

Fluxul în rotorul motorului asincron (ultima ecuație din 7.52) are expresia[B3]:

$$\underline{\Psi}'_r = L_u \underline{I}_s + L'_2 \underline{I}'_r \quad (7.98)$$

și deoarece, din relațiile(7.52):

$$\underline{I}'_r = -\frac{j\omega_r L_u}{R'_2 + j\omega_r L'_2} \underline{I}_s \quad (7.99)$$

rezultă:

$$\underline{\Psi}'_r = \underline{I}_s \frac{L_u R'_2}{R'_2 + j\omega_r L'_2} \quad (7.100)$$

adică:

$$\underline{I}_s = \frac{\underline{\Psi}'_r}{L_u} + j \underline{\Psi}'_r \frac{\omega_r L'_2}{L_u R'_2} \quad (7.101)$$

Cuplul electromagnetic este[B3, D1]:

$$\begin{aligned} M_{elmag} &= 3p_1 \operatorname{Im}(\underline{I}_s \underline{\Psi}'_s) = 3p_1 \operatorname{Im} \left[ \underline{I}_s \left( L_1 \underline{I}_s - j \frac{\omega_r L_u}{R'_2} \underline{\Psi}'_r \right)^* \right] = \\ &= 3p_1 \operatorname{Im} \left[ \left( \left( j \frac{\omega_r L_u}{R'_2} \right) (\underline{\Psi}'_r)^* \right) \right] = 3p_1 \frac{\omega_r (\underline{\Psi}'_r)^2}{R'_2} \end{aligned} \quad (7.102)$$

depinzând de  $(\underline{\Psi}'_r)^2$  și de pulsația curenților din rotor  $\omega_r$ .

Deoarece din cea de-a doua ecuație din 7.52 se observă că:

$$R'_2 \underline{I}'_r = \omega_r \underline{\Psi}'_r \quad (7.103)$$

cuplul electromagnetic se poate pune și sub forma următoare:

$$M_{elmag} = 3p_1 \underline{\Psi}'_r \underline{I}'_r \quad (7.104)$$

Cuplul electromagnetic maxim este dat de expresia:

$$M_{elmag.max} = 3p_1 \underline{\Psi}'_{rN} \underline{I}'_{r.limită} \quad (7.105)$$

Tensiunea statorică  $\underline{U}_s$  necesară asigurării fluxului  $\Psi_r$ , la frecvența  $f$  este dată de relația:

$$\underline{U}_s = R_1 \underline{I}_s + j\omega \underline{\Psi}_s = \left( R_1 + j\omega \frac{j\omega_r \sigma L_1 L_2' + L_1 R_2'}{R_2' + j\omega_r L_2'} \right) \underline{I}_s \quad (7.106)$$

Deoarece

$$\underline{I}_r' = -\frac{j\omega_r L_u}{R_2' + j\omega_r L_2'} \underline{I}_s \quad (7.107)$$

înlocuind pe  $\underline{I}_s$  cu:

$$\underline{I}_s = \frac{\Psi_r'}{L_u R_2'} (R_2' + j\omega_r L_2') \quad (7.108)$$

se obține în final:

$$U_s = \frac{\Psi_r'}{L_u} \sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2 + 2\omega R_1 L_1 (1 - \sigma) \frac{\omega_r L_2'}{R_2'} + \left( \frac{\omega_r L_2'}{R_2'} \right)^2 [R_1^2 + (\sigma \omega L_1)^2]} \quad (7.109)$$

unde:

$$\omega_r = \frac{R_2' M_{rez}}{3p_1 (\Psi_r')^2} \quad (7.110)$$

La flux rotoric controlat (constant), tensiunea statorică  $U_s$  se modifică cu turația, la o frecvență  $f$  dată.

Curentul statoric în funcție de cuplul electromagnetic se determină din relația (7.101), obținându-se expresia:

$$I_s = \frac{\Psi_r'}{L_u} \sqrt{1 + \left( L_2' \frac{M_{elmag}}{3p_1 (\Psi_r')^2} \right)^2} \quad (7.111)$$

sau

$$I_s = \frac{\Psi_r'}{L_u R_2'} \sqrt{(R_2')^2 + (\omega_r L_2')^2} \quad (7.112)$$

Pentru a avea turație zero ( $\omega = \omega_r = 2\pi f_{\min}$ ), frecvența de alimentare minimă va fi:

$$f_{\min} = \frac{R_2' M_{rez}}{6\pi p_1 (\Psi_r')^2} \quad (7.113)$$

La frecvențe peste cea nominală, pentru a respecta condiția  $U_s = U_{sN}$ , se „slăbește” fluxul rotoric după legea „ $1/f$ ”.

Cuplul maxim disponibil la valorile nominale ale curenților prin înfășurări va fi:

$$M_{elmag,max} = 3p_1 \cdot \Psi_{rN}' \cdot \frac{f_N}{f} \cdot I_{r,limită}' \quad (7.114)$$

Frecvența maximă se determină din condiția ca la curentul nominal, cuplul rezistent să fie egal cu cuplul maxim disponibil:

$$3p_1 \cdot \Psi_{rN}' \cdot \frac{f_N}{f} \cdot I_{rN}' = M_{rez} \quad (7.115)$$

rezultând:

$$f_{\max} = \frac{3p_1 \cdot \Psi'_{rN} \cdot f_{N'} \cdot I_{rN'}}{M_{rea}} \quad (7.116)$$

Funcționarea unui sistem de acționare electrică cu motor asincron la flux rotoric controlat(constant) se poate reprezenta într-o schemă de principiu similară cu cea din figura 7.3.1.

Având în vedere fluxul nominal statoric:

$$\Psi_s = \Psi_{sN} = \frac{U_N}{\omega_N} = \frac{380}{2\pi \cdot 50} = 1.2[\text{Wb}] \quad (7.117)$$

fluxul rotoric este:

$$\Psi_r = \Psi_s \frac{L_u}{L_1} \frac{R_2'}{\sqrt{(R_2')^2 + (\sigma\omega_r L_2')^2}} = 0.98[\text{Wb}] \quad (7.118)$$

În condițiile inițiale:

$$\{\omega(0) = 314[\text{rad/s}]; f(0) = 50[\text{Hz}]; \omega_m(0) = 311.5723[\text{rad/s}]\} \Rightarrow \omega_r(0) = 2.4277[\text{rad/s}] \quad (7.119)$$

tensiunea inițială  $U_s(0)$ , având în vedere relația (7.109), este:

$$U_s(0) = 214.7055[\text{V}] \quad (7.120)$$

Condițiile inițiale se obțin din următorul sistem algebric:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.9X - 0.25\omega Y - 0.373\omega U = 214.7055 \\ 0.25\omega X + 1.9Y + 0.373\omega Z = 0 \\ -0.373(\omega - P)Y + 0.928Z - 0.597(\omega - P)U = 0 \\ 0.373(\omega - P)X + 0.597(\omega - P)Z + 0.928U = 0 \\ 2 \cdot 0.373(YZ - XU) - 5.025 = 0 \\ \omega = 314 \end{array} \right. \quad (7.121)$$

cu soluția:

$$X(0) = 3.884543[\text{A}]; P(0) = 311.5723[\text{rad/s}]; Z(0) = -2.555866[\text{A}]; \quad (7.122)$$

$$U(0) = 0.2012236[\text{A}]; Y(0) = -2.941307[\text{A}]$$

Condițiile finale pentru:

$$\left. \begin{array}{l} \omega(\infty) = 300[\text{rad/s}] \\ f(\infty) = 47.74648[\text{Hz}] \\ \omega_m(\infty) = 292.7168[\text{rad/s}] \end{array} \right\} \Rightarrow \omega_r(\infty) = 7.2832[\text{rad/s}] \quad (7.123)$$

tensiunea finală  $U_s(\infty)$  fiind:

$$U_s(\infty) = 227.8458[\text{V}] \quad (7.124)$$

Condițiile finale se obțin din următorul sistem algebric:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.9X - 0.25\omega Y - 0.373\omega U = 227.8458 \\ 0.25\omega X + 1.9Y + 0.373\omega Z = 0 \\ -0.373(\omega - P)Y + 0.928Z - 0.597(\omega - P)U = 0 \\ 0.373(\omega - P)X + 0.597(\omega - P)Z + 0.928U = 0 \\ 2 \cdot 0.373(YZ - XU) - 15.075 = 0 \\ \omega = 300 \end{array} \right. \quad (7.125)$$

cu soluția:

$$\begin{aligned} Z(\infty) &= -7.441345[A]; U(\infty) = 1.944963[A]; P(\infty) = 292.7168[rad/s]; \\ X(\infty) &= 11.24574[A]; Y(\infty) = -5.654937[A]; \end{aligned} \quad (7.126)$$

Sistemul de ecuații diferențiale care modelează procesul tranzitoriu de încărcare bruscă al motorului asincron este următorul:

$$\left\{ \begin{aligned} 1.9X + 0.25 \frac{dX}{dt} - 0.25\omega Y + 0.373 \frac{dZ}{dt} - 0.373\omega U &= V \\ 0.25\omega X + 1.9Y + 0.25 \frac{dY}{dt} + 0.373\omega Z + 0.373 \frac{dU}{dt} &= 0 \\ 0.373 \frac{dX}{dt} - 0.373(\omega - P)Y + 0.928Z + 0.597 \frac{dZ}{dt} - 0.597(\omega - P)U &= 0 \\ 0.373(\omega - P)X + 0.373 \frac{dY}{dt} + 0.597(\omega - P)Z + 0.928U + 0.597 \frac{dU}{dt} &= 0 \\ 2 \cdot 0.373(YZ - XU) - 15.075 - \boxed{J} \frac{dP}{dt} &= 0 \\ -\frac{dV}{dt} - 10(V - 227.8458) - 0.1 \frac{dV}{dt} &= 0 \\ -\frac{d\omega}{dt} - 10(\omega - 300) - 0.1 \frac{d\omega}{dt} &= 0 \\ X(0) &= 3.884543 \\ Y(0) &= -2.941307 \\ Z(0) &= -2.555866 \\ U(0) &= 0.2012236 \\ V(0) &= 214.7055 \\ \omega(0) &= 314 \\ P(0) &= 311.5723 \end{aligned} \right. \quad (7.127)$$

cu următoarea soluție grafică:

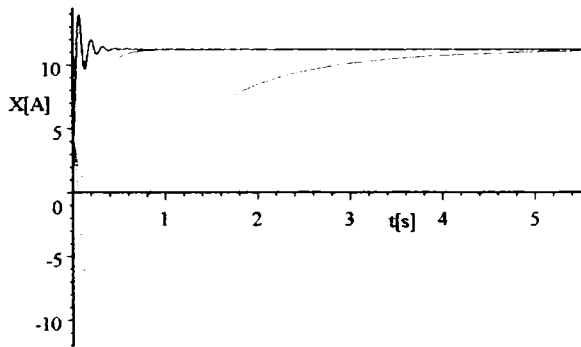


Fig. 7.3.13. Variația în timp a lui  $I_d$ .

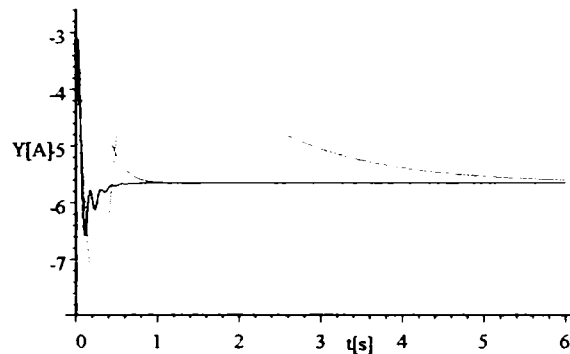


Fig. 7.3.14. Variația în timp a lui  $I_q$ .

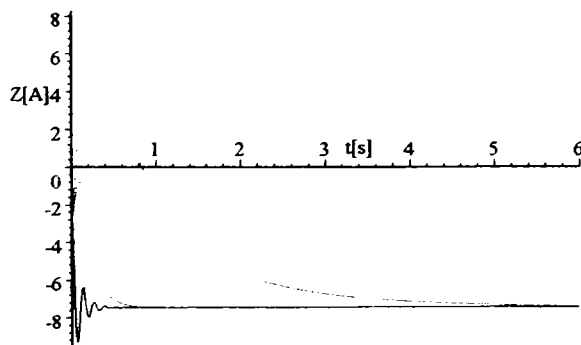


Fig. 7.3.15. Variația în timp a lui  $I_{dr}$ .

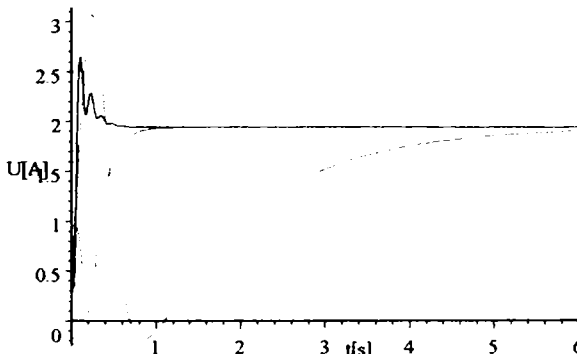


Fig. 7.3.16. Variația în timp a lui  $I_{qr}$ .

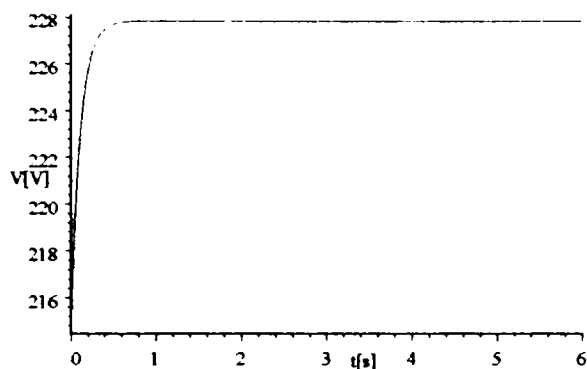


Fig. 7.3.17. Variația în timp a lui  $U_s$ .

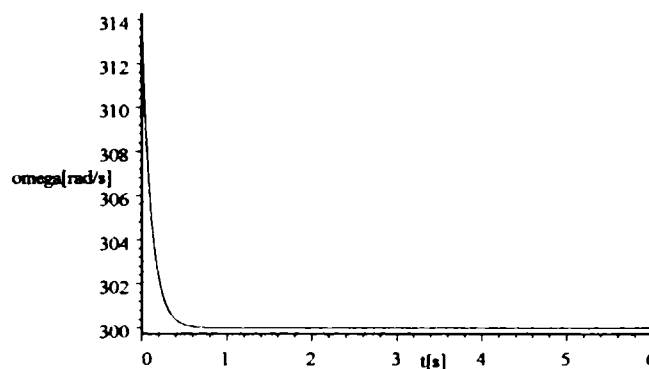


Fig. 7.3.18. Variația în timp a lui  $\omega$ .

Variațiile în timp ale fluxului statoric respectiv rotorului sunt date de expresiile (7.94,7.95) și sunt prezentate în figurile 7.3.20 și 7.3.21 iar variațiile în timp ale curentului statoric respectiv a cuplului electromagnetic din mașina reală (7.96,7.97) sunt prezentate în figurile 7.3.22 și 7.3.23.

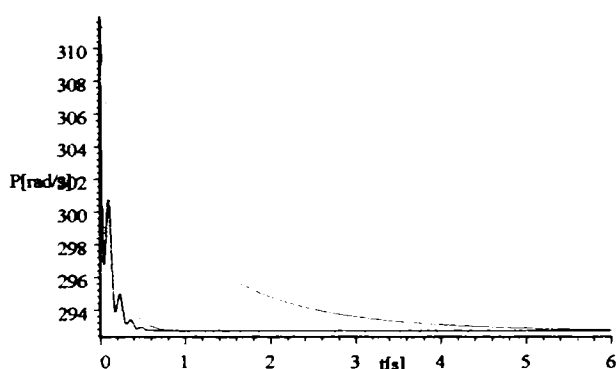


Fig. 7.3.19. Variația în timp a lui  $\omega_m$ .

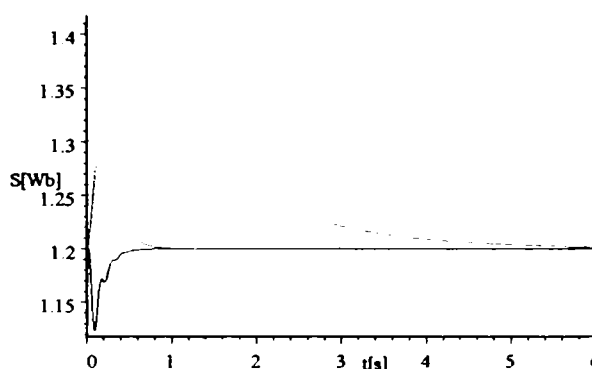


Fig. 7.3.20. Variația în timp a lui  $\Psi_s$ .

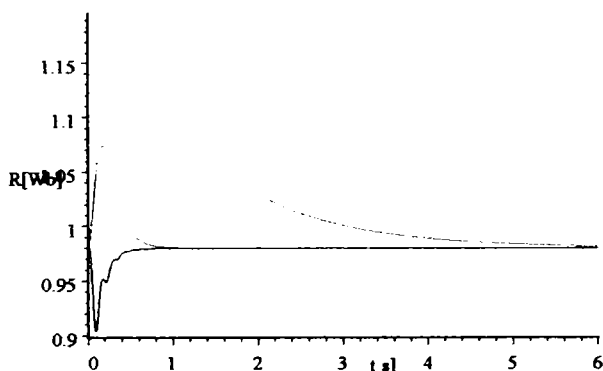


Fig. 7.3.21. Variația în timp a lui  $\Psi_r$ .

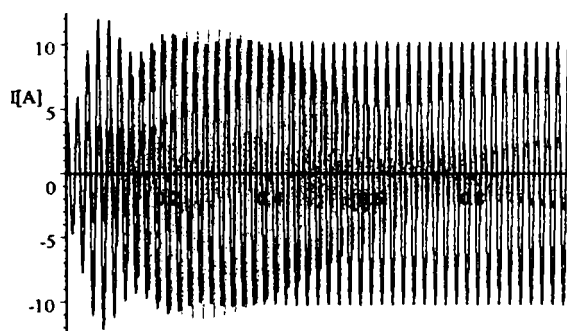


Fig. 7.3.22. Variația în timp a lui  $I$ .

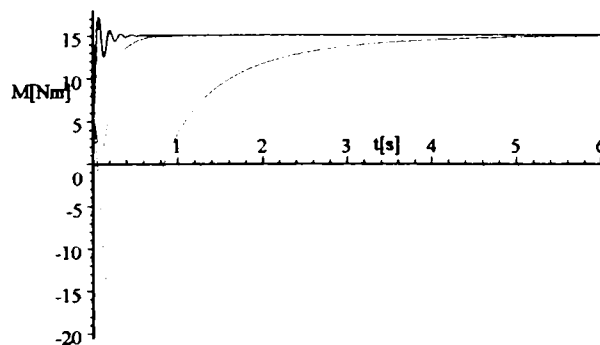


Fig. 7.3.23. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$ .

Concluziile studiului regimului tranzitoriu studiat în acest subparagraf sunt date în paragraful 7.4.



7.3.4. Modelarea și simularea funcționării motorului asincron la flux statoric controlat cu influența modificării constantei de timp a reguletoarelor

În acest paragraf se prezintă influența modificării constantei de timp a reguletoarelor PI asupra proceselor tranzitorii care au loc la funcționarea motorului asincron la flux statoric controlat, în cazul unei încărcări bruște de sarcină de la  $25\%M_N$  la  $75M_N$ . Se aleg pentru constanta de timp a reguletoarelor  $T_i$  trei valori mai semnificative din plaja de interes, conform cu tabelul (6.131). Momentul de inerție axial se consideră a fi cel de catalog, dat de firma constructoare,  $J = 0.017663[kg \cdot m^2]$ .

Pe baza aceluiași notații (7.84), sistemul de ecuații diferențiale care modelează acest proces tranzitoriu este următorul (a se vedea relațiile 3.12, 3.13, 3.17, 6.128):

$$\begin{cases}
 1.9X + 0.25 \frac{dX}{dt} - 0.25\omega Y + 0.373 \frac{dZ}{dt} - 0.373\omega U = V \\
 0.25\omega X + 1.9Y + 0.25 \frac{dY}{dt} + 0.373\omega Z + 0.373 \frac{dU}{dt} = 0 \\
 0.373 \frac{dX}{dt} - 0.373(\omega - P)Y + 0.928Z + 0.597 \frac{dZ}{dt} - 0.597(\omega - P)U = 0 \\
 0.373(\omega - P)X + 0.373 \frac{dY}{dt} + 0.597(\omega - P)Z + 0.928U + 0.597 \frac{dU}{dt} = 0 \\
 2 \cdot 0.373(YZ - XU) - 15.075 - 0.017663 \frac{dP}{dt} = 0 \\
 -10 \boxed{T_i} \frac{dV}{dt} - 10(V - 388.8699) - \boxed{T_i} \frac{dV}{dt} = 0 \\
 -10 \boxed{T_i} \frac{d\omega}{dt} - 10(\omega - 300) - \boxed{T_i} \frac{d\omega}{dt} = 0
 \end{cases} \tag{7.128}$$

$$\begin{aligned}
 X(0) &= 2.211267 \\
 Y(0) &= -4.814244 \\
 Z(0) &= -1.403984 \\
 U(0) &= 0.01049450 \\
 V(0) &= 380.8904 \\
 \omega(0) &= 314 \\
 P(0) &= 313.2719
 \end{aligned}$$

În urma soluționării sistemului de ecuații diferențiale (7.128), rezultă următoarele evoluții în timp ale mărimilor din mașina model și din mașina reală:

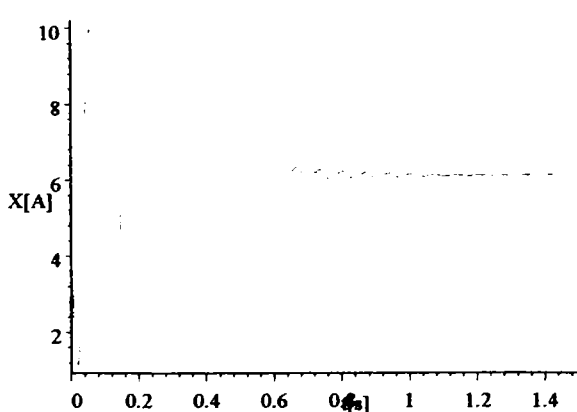


Fig. 7.3.24. Variația în timp a lui  $I_d$ .

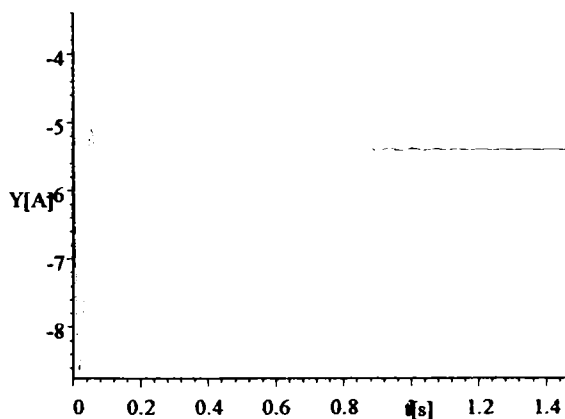


Fig. 7.3.25. Variația în timp a lui  $I_q$ .

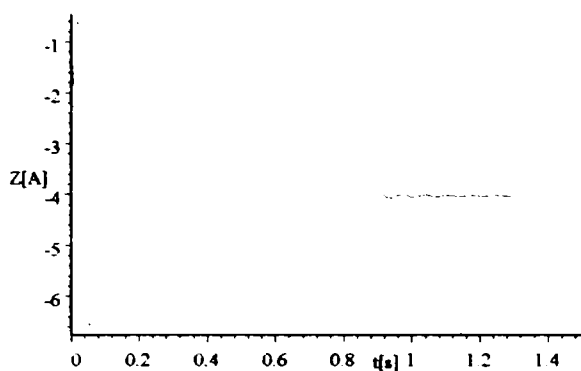


Fig. 7.3.26. Variația în timp a lui  $I_{dr}$ .

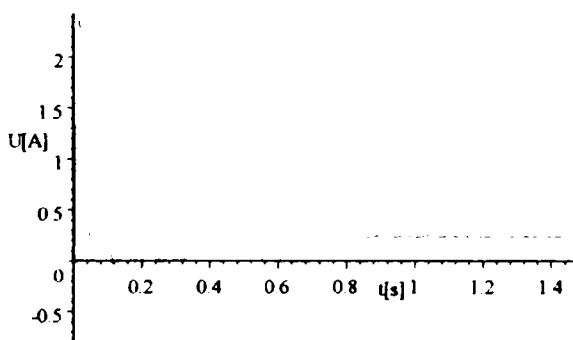


Fig. 7.3.27. Variația în timp a lui  $I_{qr}$ .

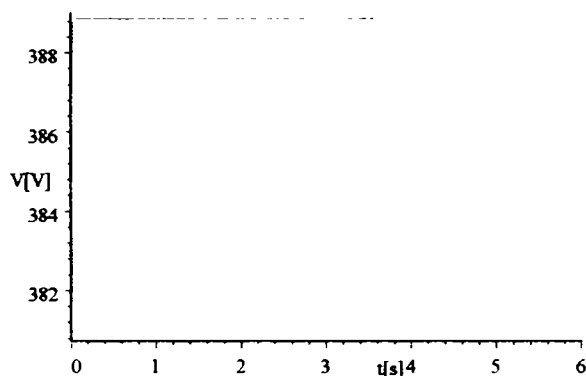


Fig. 7.3.28. Variația în timp a lui  $U_s$ .

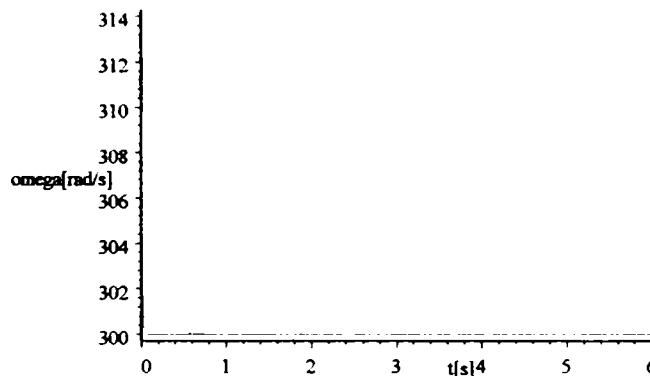


Fig. 7.3.29. Variația în timp a lui  $\omega$ .

Variațiile în timp ale fluxului statoric respectiv rotoric sunt date de expresiile (7.94,7.95) și sunt prezentate în figurile 7.3.31 și 7.3.32 iar variațiile în timp ale curentului statoric respectiv a cuplului electromagnetic din mașina reală(7.96,7.97) sunt prezentate în figurile 7.3.33 și 7.3.34.

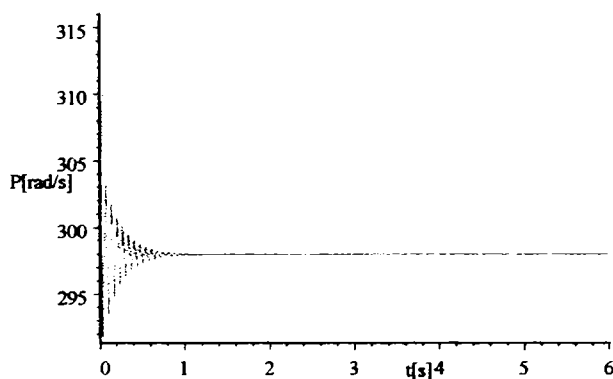


Fig. 7.3.30. Variația în timp a lui  $\omega_m$ .

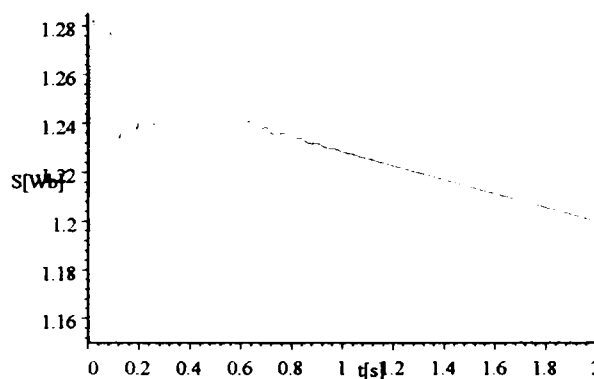


Fig. 7.3.31. Variația în timp a lui  $\Psi_s$ .

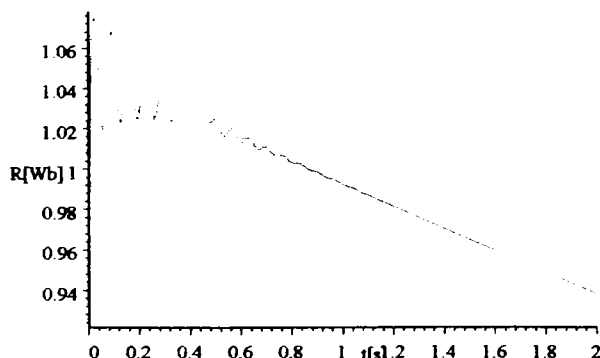


Fig. 7.3.32. Variația în timp a lui  $\Psi_r$ .

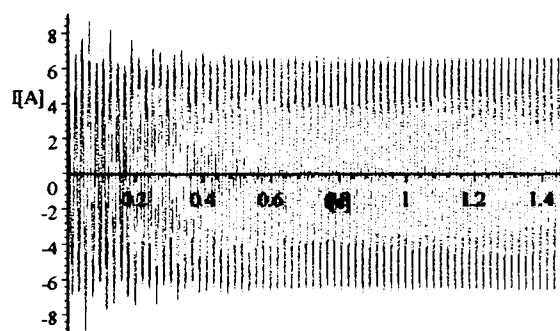


Fig. 7.3.33. Variația în timp a lui  $I$ .

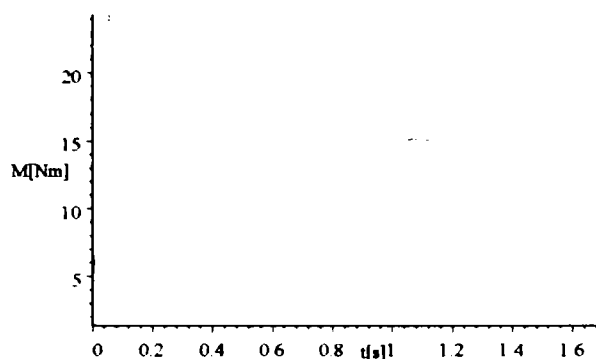


Fig.7.3.34. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$ .

7.3.5. Modelarea și simularea funcționării motorului asincron la flux rotoric controlat cu influența modificării constantei de timp a reguletoarelor

În acest paragraf se prezintă influența modificării constantei de timp a reguletoarelor PI asupra proceselor tranzitorii, la funcționarea motorului asincron la flux rotoric controlat, în cazul unei încărcări bruște de sarcină de la  $25\%M_N$  la  $75M_N$ , pentru aceleași trei valori ale lui  $T_i$ , respectiv  $J$  ca și la subparagraful precedent. Sistemul de ecuații diferențiale în acest caz este următorul(a se vedea relațiile 3.12, 3.13, 3.17, 6.128):

$$\begin{cases}
 1.9X + 0.25 \frac{dX}{dt} - 0.25\omega Y + 0.373 \frac{dZ}{dt} - 0.373\omega U = V \\
 0.25\omega X + 1.9Y + 0.25 \frac{dY}{dt} + 0.373\omega Z + 0.373 \frac{dU}{dt} = 0 \\
 0.373 \frac{dX}{dt} - 0.373(\omega - P)Y + 0.928Z + 0.597 \frac{dZ}{dt} - 0.597(\omega - P)U = 0 \\
 0.373(\omega - P)X + 0.373 \frac{dY}{dt} + 0.597(\omega - P)Z + 0.928U + 0.597 \frac{dU}{dt} = 0 \\
 2 \cdot 0.373(YZ - XU) - 15.075 - 0.017663 \frac{dP}{dt} = 0 \\
 -10 \boxed{T_i} \frac{dV}{dt} - 10(V - 227.8458) - \boxed{T_i} \frac{dV}{dt} = 0 \\
 -10 \boxed{T_i} \frac{d\omega}{dt} - 10(\omega - 300) - \boxed{T_i} \frac{d\omega}{dt} = 0
 \end{cases} \tag{7.129}$$

$$\begin{aligned}
 X(0) &= 3.884543 \\
 Y(0) &= -2.941307 \\
 Z(0) &= -2.555866 \\
 U(0) &= 0.2012236 \\
 V(0) &= 214.7055 \\
 \omega(0) &= 314, P(0) = 311.5723
 \end{aligned}$$

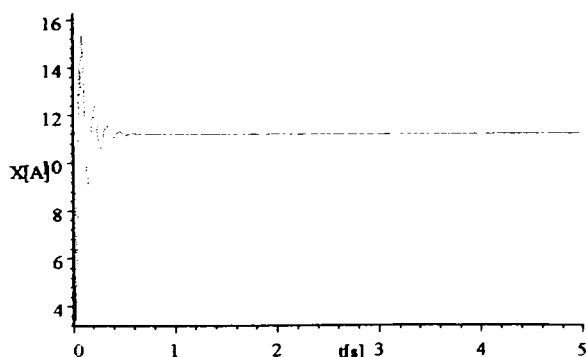


Fig.7.3.35. Variația în timp a lui  $I_d$ .

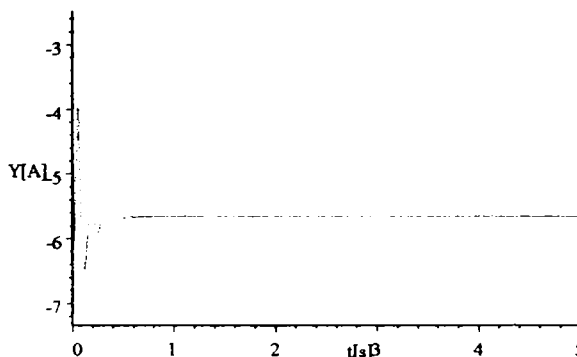


Fig.7.3.36. Variația în timp a lui  $I_q$ .

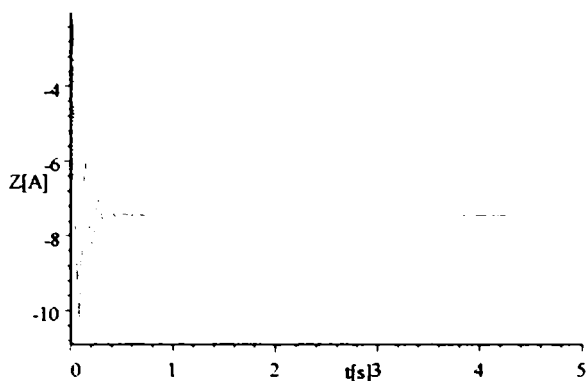


Fig. 7.3.37. Variația în timp a lui  $I_{dr}$ .

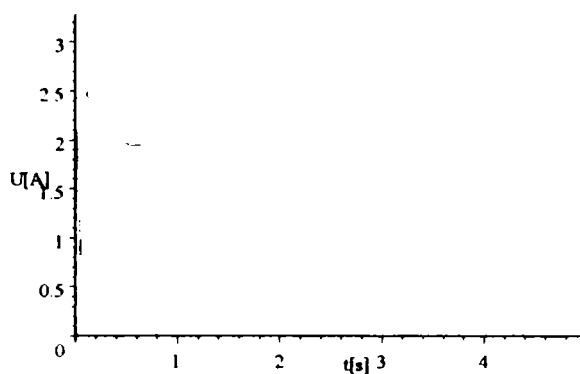


Fig. 7.3.38. Variația în timp a lui  $I_{qr}$ .

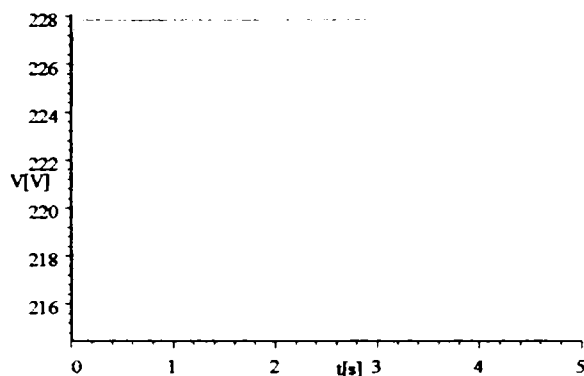


Fig. 7.3.39. Variația în timp a lui  $U_s$ .

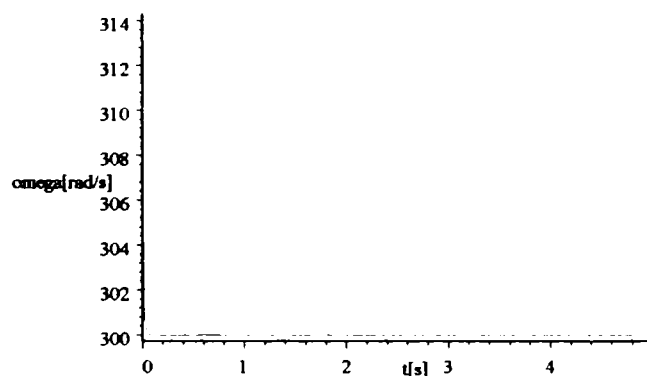


Fig. 7.3.40. Variația în timp a lui  $\omega$ .

Variațiile în timp ale fluxului statoric respectiv rotoric sunt date de expresiile (7.94,7.95) și sunt prezentate în figurile 7.3.42 și 7.3.43 iar variațiile în timp ale curentului statoric respectiv a cuplului electromagnetic din mașina reală (7.96,7.97) sunt prezentate în figurile 7.3.44 și 7.3.45.

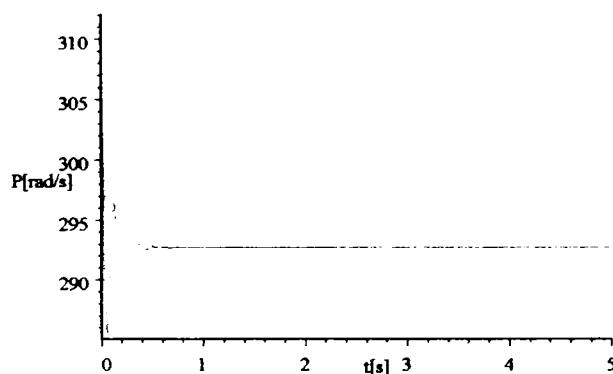


Fig. 7.3.41. Variația în timp a lui  $\omega_m$ .

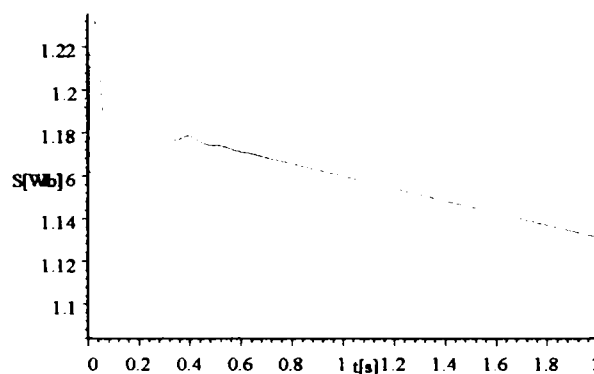


Fig. 7.3.42. Variația în timp a lui  $\Psi_s$ .

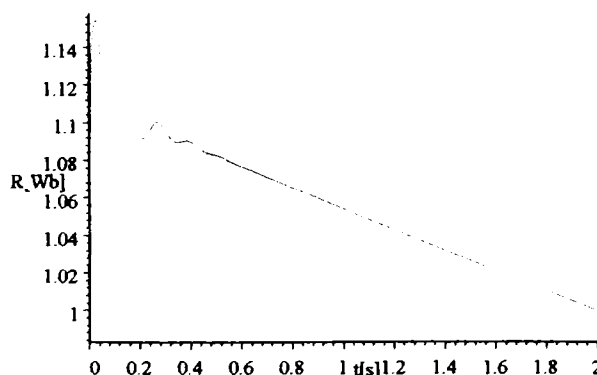


Fig. 7.3.43. Variația în timp a lui  $\Psi_r$ .

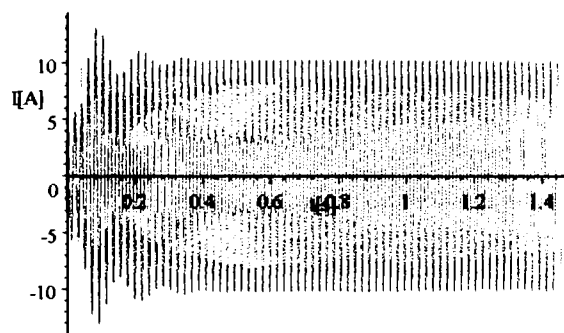


Fig. 7.3.44. Variația în timp a lui  $I$ .

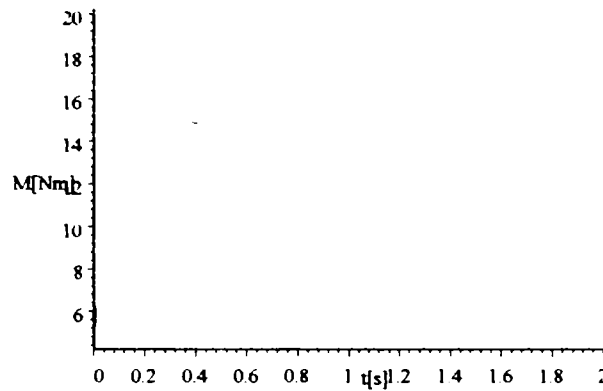


Fig. 7.3.45. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$ .

Concluziile desprinse din ultimele două subparagrafe sunt prezentate în continuare.

**7.4. Concluzii**

Pentru pornirea motorului asincron, rezultatele desprinse din evoluțiile timp ale mărimilor din mașina model și mașina reală se prezintă (în conformitate cu tabelul 6.201) în următorul tabel:

	<b>P O R N I R E</b>							
$f(t)=$	$I_d[A]$	$I_q[A]$	$I_{dr}[A]$	$I_{qr}[A]$	$s[1]$	$n[rpm]$	$I[A]$	$M_{elmag}[Nm]$
$f(0)$	0	0	0	0	1	0	0	0
$f(\infty)$	0	5	0	0	0	1500	1.8	0.1
$f_{max}$	32	76	20	47	1	1630	56	34
$t_{f_{max}}[s]$	0.15	0.01	0.1	0.02	0	0.21	0.1	0.01
$t_{stab,f}[s]$	3	3	3.2	2.5	2.5	3.1	1.5	4

(7.130)

Pentru încărcarea/descărcarea bruscă a motorului asincron, rezultatele desprinse din evoluțiile timp ale mărimilor din mașina model și mașina reală se prezintă în următoarele tabele:

<b>ÎNCĂRCARE</b>	$f(t)=$	$I_d$	$I_q$	$I_{dr}$	$I_{qr}$	$s$	$n$	$I$	$M_{elmag}$
<b>BRUSCĂ 0%-25%<math>M_N</math></b>	<i>u. m.</i>	[A]	[A]	[A]	[A]	[1]	[rpm]	[A]	[Nm]
	$f(0)$	0	0	0	0	0	1500	0	0
	$f(\infty)$	2.21	-4.81	-1.4	0.01	0.002	1496.5	5.3	5.025
$J_1 = 0.017663[kg \cdot m^2]$	$f_{max}$	55	78	34.5	51	0.1	1560	42	22
	$t_{f_{max}}[s]$	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.06	0.005	0.05
	$t_{stab,f}[s]$	2.6	2.2	3	2.5	3.2	3.2	1	3.2
$J_2 = 0.17663[kg \cdot m^2]$	$f_{max}$	10	78	34.5	51	0.02	1506	42	18
	$t_{f_{max}}[s]$	0.02	0.01	0.01	0.02	0.06	0.16	0.005	0.02
	$t_{stab,f}[s]$	0.55	1.9	0.55	0.5	0.5	0.5	0.4	0.7
$J_3 = 1.7663[kg \cdot m^2]$	$f_{max}$	9	78	34.5	51	0.006	1500	42	19
	$t_{f_{max}}[s]$	0.02	0.01	0.01	0.02	0.15	0	0.005	0.02
	$t_{stab,f}[s]$	0.52	0.2	0.53	0.2	0.5	0.5	0.25	0.6

(7.131)

ÎNCĂRCARE	$f(t)=$	$I_d$	$I_q$	$I_{dr}$	$I_{qr}$	$s$	$n$	$I$	$M_{elmag.}$
<b>BRUSCĂ 0%-50%<math>M_N</math></b>	<i>u. m.</i>	[A]	[A]	[A]	[A]	[1]	[rpm]	[A]	[Nm]
$J_1 = 0.017663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	0	0	0	0	0	1500	0	0
	$f(\infty)$	4.35	-4.91	-2.83	0.11	0.004	1492.8	6.57	10.05
	$f_{\max}$	55	78	34	48	0.14	1580	48	32
	$t_{f_{\max}}[\text{s}]$	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.06	0.02	0.05
	$t_{\text{stab.}r}[\text{s}]$	2.7	2.5	2.6	2	3	3	1	3.2
$J_2 = 0.17663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	0	0	0	0	0	1500	0	0
	$f(\infty)$	4.35	-4.91	-2.83	0.11	0.004	1492.8	6.57	10.05
	$f_{\max}$	55	78	34	48	0.028	1508	48	25
	$t_{f_{\max}}[\text{s}]$	0.01	0.01	0.01	0.02	0.06	0.15	0.02	0.11
	$t_{\text{stab.}r}[\text{s}]$	0.6	0.45	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.8
$J_3 = 1.7663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	0	0	0	0	0	1500	0	0
	$f(\infty)$	4.35	-4.91	-2.83	0.11	0.004	1492.8	6.57	10.05
	$f_{\max}$	55	78	34	48	0.01	1500	48	19
	$t_{f_{\max}}[\text{s}]$	0.01	0.01	0.01	0.02	0.16	0	0.02	0.02
	$t_{\text{stab.}r}[\text{s}]$	0.6	0.42	0.5	0.4	0.5	0.5	0.35	0.8

(7.132)

ÎNCĂRCARE	$f(t)=$	$I_d$	$I_q$	$I_{dr}$	$I_{qr}$	$s$	$n$	$I$	$M_{elmag.}$
<b>BRUSCĂ 0%-75%<math>M_N</math></b>	<i>u. m.</i>	[A]	[A]	[A]	[A]	[1]	[rpm]	[A]	[Nm]
$J_1 = 0.017663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	0	0	0	0	0	1500	0	0
	$f(\infty)$	6.55	-5.16	-4.31	0.31	0.007	1489	8.35	15.075
	$f_{\max}$	56	78	34	49	0.16	1595	48	40
	$t_{f_{\max}}[\text{s}]$	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.06	0.02	0.05
	$t_{\text{stab.}r}[\text{s}]$	2.3	1.5	2.3	3.2	2.9	3	1.1	2.9
$J_2 = 0.17663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	0	0	0	0	0	1500	0	0
	$f(\infty)$	6.55	-5.16	-4.31	0.31	0.007	1489	8.35	15.075
	$f_{\max}$	56	78	34	49	0.035	1510	48	32
	$t_{f_{\max}}[\text{s}]$	0.01	0.01	0.01	0.02	0.06	0.06	0.02	0.11
	$t_{\text{stab.}r}[\text{s}]$	0.7	0.5	0.6	0.5	0.5	0.7	0.5	0.7
$J_3 = 1.7663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	0	0	0	0	0	1500	0	0
	$f(\infty)$	6.55	-5.16	-4.31	0.31	0.007	1489	8.35	15.075
	$f_{\max}$	56	78	34	49	0.01	1500	48	18
	$t_{f_{\max}}[\text{s}]$	0.01	0.01	0.01	0.02	0.15	0	0.02	0.26
	$t_{\text{stab.}r}[\text{s}]$	0.65	0.45	0.5	0.5	0.5	0.55	0.35	0.7

(7.133)

<b>ÎNCĂRCARE</b>	$f(t)=$	$I_d$	$I_q$	$I_{dr}$	$I_{qr}$	$s$	$n$	$I$	$M_{elmag.}$
<b>BRUSCĂ 0%-100%<math>M_N</math></b>	<i>u. m.</i>	[A]	[A]	[A]	[A]	[1]	[rpm]	[A]	[Nm]
$J_1 = 0.017663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	0	0	0	0	0	1500	0	0
	$f(\infty)$	8.82	-5.58	-5.82	0.63	0.028	1457.1	10.44	20.1
	$f_{\max}$	56	77	34	49	0.19	1607	42	48
	$t_{f_{\max}}[\text{s}]$	0.01	0.01	0.01	0.018	0.03	0.07	0.008	0.05
	$t_{\text{stab},f}[\text{s}]$	2.3	1.4	3.1	3.1	2.2	2.5	1.5	2.65
$J_2 = 0.17663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	0	0	0	0	0	1500	0	0
	$f(\infty)$	8.82	-5.58	-5.82	0.63	0.028	1457.1	10.44	20.1
	$f_{\max}$	56	77	34	49	0.04	1507	42	39
	$t_{f_{\max}}[\text{s}]$	0.01	0.01	0.01	0.018	0.06	0.16	0.008	0.11
	$t_{\text{stab},f}[\text{s}]$	0.7	0.4	0.7	0.6	0.4	0.6	1	0.7
$J_3 = 1.7663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	0	0	0	0	0	1500	0	0
	$f(\infty)$	8.82	-5.58	-5.82	0.63	0.028	1457.1	10.44	20.1
	$f_{\max}$	56	77	34	49	0.015	1500	42	21
	$t_{f_{\max}}[\text{s}]$	0.01	0.01	0.01	0.018	0.14	0	0.008	0.25
	$t_{\text{stab},f}[\text{s}]$	0.6	0.3	0.6	0.5	0.4	0.5	0.4	0.7

(7.134)

<b>LIMITA DE STABILITATE</b>	$f(t)=$	$I_d$	$I_q$	$I_{dr}$	$I_{qr}$	$s$	$n$	$I$	$M_{elmag.}$
<b>LA ÎNCĂRCARE</b>	<i>u. m.</i>	[A]	[A]	[A]	[A]	[1]	[rpm]	[A]	[Nm]
$J_1 = 0.017663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	0	0	0	0	0	1500	0	0
	$f(\infty)$	21.03	-11	-13.9	4.48	0.048	1427	23.75	44.22
	$f_{\max}$	66	107	45	73	0.4	1500	70	66
	$t_{f_{\max}}[\text{s}]$	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0	0.055	0.036
	$t_{\text{stab},f}[\text{s}]$	1	0.43	0.9	0.42	0.86	1.6	0.4	1.1
$J_2 = 0.17663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	0	0	0	0	0	1500	0	0
	$f(\infty)$	21.03	-11	-13.9	4.48	0.048	1427	23.75	44.22
	$f_{\max}$	66	107	45	73	0.09	1500	68	70
	$t_{f_{\max}}[\text{s}]$	0.01	0.01	0.01	0.01	0.08	0	0.017	0.1
	$t_{\text{stab},f}[\text{s}]$	0.89	0.4	0.49	0.33	0.36	0.46	0.32	0.5
$J_3 = 1.7663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	0	0	0	0	0	1500	0	0
	$f(\infty)$	21.03	-11	-13.9	4.48	0.048	1427	23.75	44.22
	$f_{\max}$	66	107	45	73	0.025	1500	68	44.22
	$t_{f_{\max}}[\text{s}]$	0.01	0.01	0.01	0.01	0.32	0	0.017	0.3
	$t_{\text{stab},f}[\text{s}]$	0.49	0.34	0.48	0.38	0.32	0.2	0.32	0.3

(7.135)

DESCĂRCARE	$f(t)=$	$I_d$	$I_q$	$I_{dr}$	$I_{qr}$	$s$	$n$	$I$	$M_{elmag.}$
<b>BRUSCĂ 100%-75%<math>M_N</math></b>	<i>u. m.</i>	[A]	[A]	[A]	[A]	[1]	[rpm]	[A]	[Nm]
$J_1 = 0.017663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	8.82	-5.58	-5.82	0.63	0.028	1457.1	10.44	20.1
	$f(\infty)$	6.55	-5.16	-4.31	0.31	0.007	1489	8.35	15.075
	$f_{\max}$	9.8	6.9	6.5	1.4	0.028	1521	9	22.3
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.01	0.03	0.01	0.04	0	0.03	0.005	0.01
	$t_{\text{stab.}f}[s]$	2.3	2.5	2.4	2.3	2.9	2.9	1	2.6
$J_2 = 0.17663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	8.82	-5.58	-5.82	0.63	0.028	1457.1	10.44	20.1
	$f(\infty)$	6.55	-5.16	-4.31	0.31	0.007	1489	8.35	15.075
	$f_{\max}$	13.8	7	9.2	1.5	0.028	1502	12	31
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.04	0.09	0.03	0.09	0	0.09	0.02	0.04
	$t_{\text{stab.}f}[s]$	0.7	0.8	0.7	0.7	0.6	0.7	0.7	0.8
$J_3 = 1.7663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	8.82	-5.58	-5.82	0.63	0.028	1457.1	10.44	20.1
	$f(\infty)$	6.55	-5.16	-4.31	0.31	0.007	1489	8.35	15.075
	$f_{\max}$	19.1	8.8	12.6	3	0.028	1489	17	41.3
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.08	0.13	0.07	0.13	0	0.7	0.08	0.09
	$t_{\text{stab.}f}[s]$	0.8	0.9	0.9	0.9	0.7	0.7	0.5	0.8

(7.136)

DESCĂRCARE	$f(t)=$	$I_d$	$I_q$	$I_{dr}$	$I_{qr}$	$s$	$n$	$I$	$M_{elmag.}$
<b>BRUSCĂ 100%-50%<math>M_N</math></b>	<i>u. m.</i>	[A]	[A]	[A]	[A]	[1]	[rpm]	[A]	[Nm]
$J_1 = 0.017663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	8.82	-5.58	-5.82	0.63	0.028	1457.1	10.44	20.1
	$f(\infty)$	4.35	-4.91	-2.83	0.11	0.004	1492.8	6.57	10.05
	$f_{\max}$	9.4	7.9	6.2	2	0.035	1540	9	21
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.01	0.03	0.006	0.04	0.05	0.03	0.003	0.01
	$t_{\text{stab.}f}[s]$	2.8	3.1	3.1	3	3	3	1.1	3.1
$J_2 = 0.17663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	8.82	-5.58	-5.82	0.63	0.028	1457.1	10.44	20.1
	$f(\infty)$	4.35	-4.91	-2.8	0.11	0.004	1492.8	6.57	10.05
	$f_{\max}$	12.8	7.2	8.6	1.5	0.028	1507	11.3	28.2
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.03	0.09	0.03	0.09	0	0.08	0.02	0.03
	$t_{\text{stab.}f}[s]$	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
$J_3 = 1.7663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	8.82	-5.58	-5.82	0.63	0.028	1457.1	10.44	20.1
	$f(\infty)$	4.35	-4.91	-2.8	0.11	0.004	1492.8	6.57	10.05
	$f_{\max}$	18.6	8.5	12.4	2.75	0.028	1492.8	16	40
	$t_{f_{\max}}[s]$	0.08	0.12	0.06	0.13	0	0.7	0.09	0.075
	$t_{\text{stab.}f}[s]$	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.6	0.7

(7.137)



DESCĂRCARE	$f(t)=$	$I_d$	$I_q$	$I_{dr}$	$I_{qr}$	$s$	$n$	$I$	$M_{elmag.}$
<b>BRUSCĂ 100%-25%<math>M_N</math></b>	<i>u. m.</i>	[A]	[A]	[A]	[A]	[1]	[rpm]	[A]	[Nm]
$J_1 = 0.017663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	8.82	-5.58	-5.82	0.63	0.028	1457.1	10.44	20.1
	$f(\infty)$	2.21	-4.81	-1.4	0.01	0.002	1496.5	5.3	5.025
	$f_{\max}$	9.2	9.3	6	2.9	0.044	1562	9	21
	$t_{f_{\max}}[\text{s}]$	0.007	0.03	0.006	0.04	0.05	0.02	0.004	0.004
	$t_{\text{stab.}f}[\text{s}]$	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	1	3.1
$J_2 = 0.17663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	8.82	-5.58	-5.82	0.63	0.028	1457.1	10.44	20.1
	$f(\infty)$	2.21	-4.81	-1.4	0.01	0.002	1496.5	5.3	5.025
	$f_{\max}$	12	7.5	8.2	1.8	0.028	1514	11	27
	$t_{f_{\max}}[\text{s}]$	0.03	0.09	0.02	0.09	0	0.07	0.02	0.03
	$t_{\text{stab.}f}[\text{s}]$	0.7	0.7	0.7	0.75	0.6	0.6	0.7	0.65
$J_3 = 1.7663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	8.82	-5.58	-5.82	0.63	0.028	1457.1	10.44	20.1
	$f(\infty)$	2.21	-4.81	-1.4	0.01	0.002	1496.5	5.3	5.025
	$f_{\max}$	18	4.81	12	2.6	0.028	1496.5	16	39
	$t_{f_{\max}}[\text{s}]$	0.07	0.8	0.06	0.12	0	0.6	0.07	0.07
	$t_{\text{stab.}f}[\text{s}]$	0.7	0.8	0.7	0.8	0.6	0.65	0.5	0.65

(7.138)

DESCĂRCARE	$f(t)=$	$I_d$	$I_q$	$I_{dr}$	$I_{qr}$	$s$	$n$	$I$	$M_{elmag.}$
<b>BRUSCĂ 100%-0%<math>M_N</math></b>	<i>u. m.</i>	[A]	[A]	[A]	[A]	[1]	[rpm]	[A]	[Nm]
$J_1 = 0.017663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	8.82	-5.58	-5.82	0.63	0.028	1457.1	10.44	20.1
	$f(\infty)$	0	0	0	0	0	1500	0	0
	$f_{\max}$	9.1	6.2	6	3.87	0.054	1584	10	21
	$t_{f_{\max}}[\text{s}]$	0.002	0.03	0	0.03	0.05	0.02	0.03	0.002
	$t_{\text{stab.}f}[\text{s}]$	3	3.1	3	3.1	3.1	3.1	2	3.1
$J_2 = 0.17663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	8.82	-5.58	-5.82	0.63	0.028	1457.1	10.44	20.1
	$f(\infty)$	0	0	0	0	0	1500	0	0
	$f_{\max}$	11.5	3.3	7.8	2.2	0.028	1520	10	26
	$t_{f_{\max}}[\text{s}]$	0.03	0.08	0.02	0.09	0	0.07	0.02	0.02
	$t_{\text{stab.}f}[\text{s}]$	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.65	0.8	0.6
$J_3 = 1.7663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f(0)$	8.82	-5.58	-5.82	0.63	0.028	1457.1	10.44	20.1
	$f(\infty)$	0	0	0	0	0	1500	0	0
	$f_{\max}$	17.7	3.2	11.8	2.4	0.028	1500	15.4	39
	$t_{f_{\max}}[\text{s}]$	0.07	0.11	0.06	0.11	0	0.65	0.06	0.07
	$t_{\text{stab.}f}[\text{s}]$	0.6	0.7	0.7	0.65	0.6	0.65	0.55	0.6

(7.139)

Pentru reversarea din gol respectiv din sarcină nominală a motorului asincron, rezultatele desprinse din evoluțiile timp ale mărimilor din mașina model și mașina reală se prezintă în următoarele două tabele:

<b>REVERSARE DIN GOL</b>	$f(t)=$ <i>u. m.</i>	$I_d$ [A]	$I_q$ [A]	$I_{dr}$ [A]	$I_{qr}$ [A]	$s$ [1]	$n$ [rpm]	$I$ [A]	$M_{elmag.}$ [Nm]
$J_1, J_2, J_3$	$f(0)$	0	0	0	0	2	-1500	0	0
$J_1, J_2, J_3$	$f(\infty)$	0	0	0	0	0	1500	0	0
$J_1 = 0.017663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f_{\max}$	29	62	19	39	2	1500	56	31
$J_2 = 0.17663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		32	62	22	39	2	1500	56	47
$J_3 = 1.7663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		39	62	23	39	2	1500	56.5	52
$J_1 = 0.017663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$t_{f_{\max}} [s]$	0.6	0.01	0.6	0.01	0	0	0.02	0.75
$J_2 = 0.17663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		5.6	0.01	5.6	0.01	0	0	0.02	5.6
$J_3 = 1.7663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		26	0.01	24.7	0.01	0	0	2	25
$J_1 = 0.017663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$t_{\text{stab},f} [s]$	2.8	3	2.8	2.9	3	3	2.9	3.2
$J_2 = 0.17663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		6.4	6.3	6.2	6	6	6.1	6	6.3
$J_3 = 1.7663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		28.2	29	28	27.5	27	27.2	27	27.1

(7.140)

<b>REVERSARE DIN SARCINĂ NOMINALĂ</b>	$f(t)=$ <i>u. m.</i>	$I_d$ [A]	$I_q$ [A]	$I_{dr}$ [A]	$I_{qr}$ [A]	$s$ [1]	$n$ [rpm]	$I$ [A]	$M_{elmag.}$ [Nm]
$J_1, J_2, J_3$	$f(0)$	0	0	0	0	2	-1500	0	0
$J_1, J_2, J_3$	$f(\infty)$	-8.82	-5.58	5.82	0.63	0.028	1457.1	10.44	-20.1
$J_1 = 0.017663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f_{\max}$	28	84	29	39	2	1500	57	60
$J_2 = 0.17663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		31	84	21	39	2	1500	56	48
$J_3 = 1.7663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		32	84	23	39	2	1500	58	53
$J_1 = 0.017663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$t_{f_{\max}} [s]$	0.2	0.04	0.02	0.01	0	0	0.02	0.2
$J_2 = 0.17663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		1.7	0.04	1.7	0.01	0	0	0.02	1.7
$J_3 = 1.7663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		16.6	0.04	16.6	0.01	0	0	1.7	16.8
$J_1 = 0.017663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$t_{\text{stab},f} [s]$	2.7	2.8	2.8	2.8	2.8	3.1	2.2	2.8
$J_2 = 0.17663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		2.4	2.6	2.5	2.5	2.5	2.8	4	2.5
$J_3 = 1.7663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$		17.5	17.6	17.7	17.6	17.4	17.5	14	17.5

(7.141)

Pentru încărcarea bruscă de sarcină de la 25% la 75% din  $M_N$  a motorului asincron, când acesta funcționează la flux statoric controlat și cu influența modificării momentului de inerție axial, rezultatele desprinse din evoluțiile în timp ale mărimilor din mașina model și mașina reală se prezintă în următorul tabel:

$\Psi_s = \text{ct. ÎNCĂRCARE}$	$f(t) =$	$I_d$	$I_q$	$I_{dr}$	$I_{qr}$	$U_s$	$\omega$	$\omega_m$	$\Psi_s$	$\Psi_r$	$I$	$M_{elmag.}$
BRUSCĂ 25%-75% $M_N$	<i>u. m.</i>	[A]	[A]	[A]	[A]	[V]	[rad/s]	[rad/s]	[Wb]	[Wb]	[A]	[Nm]
$J_1, J_2, J_3$	$f(0)$	2.21	-4.81	-1.40	0.01	380.89	314	313.27	1.2	0.998	5.29	5.025
$J_1, J_2, J_3$	$f(\infty)$	6.42	-5.23	-4.21	0.29	388.86	300	297.89	1.2	0.949	8.35	15.075
$J_1 = 0.017663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f_{\max}$	8.3	6.42	5.4	1.1	388.86	314	313.27	1.25	1.03	7.4	19
	$t_{f_{\max}}[\text{s}]$	0.05	0.09	0.04	0.08	0.8	0	0	0.28	0.22	0.05	0.04
	$t_{\text{stab.}f}[\text{s}]$	1	1	1.1	1	0.8	0.8	1.2	2.1	2.05	0.6	1.1
$J_2 = 0.17663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f_{\max}$	6.42	6.42	4.21	1	388.86	314	313.27	1.26	1.05	6	15.075
	$t_{f_{\max}}[\text{s}]$	0.8	0.09	0.8	0.08	0.8	0	0	0.1	0.15	0.03	0.9
	$t_{\text{stab.}f}[\text{s}]$	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1	2	2	0.4	0.9
$J_3 = 1.7663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f_{\max}$	18	12.7	12.4	4.8	388.86	314	313.27	1.4	1.18	18	53
	$t_{f_{\max}}[\text{s}]$	0.2	0.19	0.24	0.2	0.8	0	0	0.24	0.26	0.2	0.22
	$t_{\text{stab.}f}[\text{s}]$	1.7	1.6	1.5	1.67	0.8	0.8	1.3	2.2	2.3	1.6	1.6

(7.142)

Pentru încărcarea bruscă de sarcină de la 25% la 75% din  $M_N$  a motorului asincron, când acesta funcționează la flux rotoric controlat și cu influența modificării momentului de inerție axial, rezultatele desprinse din evoluțiile în timp ale mărimilor din mașina model și mașina reală se prezintă în următorul tabel:

$\Psi_r = \text{ct. ÎNCĂRCARE}$	$f(t) =$	$I_d$	$I_q$	$I_{dr}$	$I_{qr}$	$U_s$	$\omega$	$\omega_m$	$\Psi_s$	$\Psi_r$	$I$	$M_{elmag.}$
BRUSCĂ 25%-75% $M_N$	<i>u. m.</i>	[A]	[A]	[A]	[A]	[V]	[rad/s]	[rad/s]	[Wb]	[Wb]	[A]	[Nm]
$J_1, J_2, J_3$	$f(0)$	3.88	-2.94	-2.55	0.2	214.7	314	311.57	1.2	0.98	5.29	5.025
$J_1, J_2, J_3$	$f(\infty)$	11.24	-5.65	-7.44	1.94	227.84	300	292.71	1.19	0.98	8.35	15.075
$J_1 = 0.017663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f_{\max}$	14	6.6	9.4	2.63	227.84	314	311.57	1.2	0.98	12	17
	$t_{f_{\max}}[\text{s}]$	0.1	0.1	0.06	0.1	0.6	0	0	0	0	0.08	0.06
	$t_{\text{stab.}f}[\text{s}]$	0.7	1	0.7	0.8	0.6	0.8	0.7	0.9	0.9	0.4	0.7
$J_2 = 0.17663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f_{\max}$	11.24	5.65	7.44	1.94	227.84	314	311.57	1.29	1.07	10	15.075
	$t_{f_{\max}}[\text{s}]$	1	1.2	0.8	1.2	0.6	0	0	0.21	0.22	0.09	1
	$t_{\text{stab.}f}[\text{s}]$	1	1.2	0.8	1.2	0.6	0.8	0.9	1	1.1	1	1
$J_3 = 1.7663[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$f_{\max}$	11.5	7.9	7.8	3.05	227.84	314	311.57	1.41	1.19	11	20
	$t_{f_{\max}}[\text{s}]$	0.3	0.21	0.3	0.3	0.6	0	0	0.45	0.5	0.3	0.3
	$t_{\text{stab.}f}[\text{s}]$	6	6.2	6	6.1	0.6	0.8	6.1	6.1	6.1	6	6

(7.143)

Pentru încărcarea bruscă de sarcină de la 25% la 75% din  $M_N$  a motorului asincron, când acesta funcționează la flux statoric controlat și cu influența modificării constantei de timp a reguletoarelor, rezultatele desprinse din evoluțiile în timp ale mărimilor din mașina model și mașina reală se prezintă în următorul tabel:

$\Psi_s = \text{ct. ÎNCĂRCARE}$	$f(t) =$	$I_d$	$I_q$	$I_{dr}$	$I_{qr}$	$U_s$	$\omega$	$\omega_m$	$\Psi_s$	$\Psi_r$	$I$	$M_{el\text{mag}}$
BRUSCĂ 25%-75% $M_N$	<i>u. m.</i>	[A]	[A]	[A]	[A]	[V]	[rad/s]	[rad/s]	[Wb]	[Wb]	[A]	[Nm]
$T_{i1}, T_{i2}, T_{i3}$	$f(0)$	2.21	-4.81	-1.4	0.01	380.89	314	313.27	1.2	0.998	5.29	5.025
$T_{i1}, T_{i2}, T_{i3}$	$f(\infty)$	6.42	-5.23	-4.21	0.29	388.86	300	297.89	1.2	0.949	8.35	15.075
$T_{i1} = 0.01[s]$	$f_{\max}$	10	8.6	6.6	2.35	388.86	314	313.27	1.282	1.075	9	24.3
	$t_{f\max}[s]$	0.06	0.02	0.06	0.02	0.08	0	0	0.03	0.03	0.06	0.06
	$t_{\text{stab},f}[s]$	1.5	1.5	1.4	1.5	0.08	0.08	1.2	2.1	2.4	0.65	1.7
$T_{i2} = 0.1[s]$	$f_{\max}$	8.2	6.7	5.5	1.1	388.86	314	313.27	1.248	1.033	7.6	19.2
	$t_{f\max}[s]$	0.04	0.08	0.04	0.08	0.7	0	0	0.26	0.23	1.1	0.04
	$t_{\text{stab},f}[s]$	1.5	1.5	1.4	1.5	0.7	0.8	1.2	2.1	2.3	0.6	1.65
$T_{i3} = 1[s]$	$f_{\max}$	9.8	5.9	6.5	0.8	388.86	314	315.5	1.2	0.998	8.4	22.4
	$t_{f\max}[s]$	0.05	0.08	0.03	0.08	6	0	0.08	2.5	0	0.05	0.04
	$t_{\text{stab},f}[s]$	1.2	1.5	1.4	1.6	6	6	6	2.5	2.5	0.7	1.6

(7.144)

Pentru încărcarea bruscă de sarcină de la 25% la 75% din  $M_N$  a motorului asincron, când acesta funcționează la flux rotoric controlat și cu influența modificării constantei de timp a reguletoarelor, rezultatele desprinse din evoluțiile în timp ale mărimilor din mașina model și mașina reală se prezintă în următorul tabel:

$\Psi_r = \text{ct. ÎNCĂRCARE}$	$f(t) =$	$I_d$	$I_q$	$I_{dr}$	$I_{qr}$	$U_s$	$\omega$	$\omega_m$	$\Psi_s$	$\Psi_r$	$I$	$M_{el\text{mag}}$
BRUSCĂ 25%-75% $M_N$	<i>u. m.</i>	[A]	[A]	[A]	[A]	[V]	[rad/s]	[rad/s]	[Wb]	[Wb]	[A]	[Nm]
$T_{i1}, T_{i2}, T_{i3}$	$f(0)$	3.88	-2.94	-2.55	0.2	214.7	314	311.57	1.2	0.98	5.29	5.025
$T_{i1}, T_{i2}, T_{i3}$	$f(\infty)$	11.24	-5.65	-7.44	1.94	227.84	300	292.71	1.1	0.98	8.35	15.075
$T_{i1} = 0.01[s]$	$f_{\max}$	15.3	6.5	10.2	2.5	227.84	314	311.57	1.232	1.158	13	20
	$t_{f\max}[s]$	0.15	0.17	0.1	0.18	0.08	0	0	0.05	0.05	0.1	0.13
	$t_{\text{stab},f}[s]$	0.7	0.8	0.7	0.7	0.08	0.08	0.7	2.5	2.4	0.5	0.64
$T_{i2} = 0.1[s]$	$f_{\max}$	13.8	6.6	9.1	2.63	227.84	314	311.57	1.178	1	12	17
	$t_{f\max}[s]$	0.14	0.16	0.08	0.16	1	0	0	0.28	0.15	0.08	0.1
	$t_{\text{stab},f}[s]$	0.7	0.9	0.8	0.8	1	0.8	0.7	2.5	2.4	0.51	0.65
$T_{i3} = 1[s]$	$f_{\max}$	16.1	7.3	10.7	3.2	227.84	314	311.57	1.2	1.085	14	18.6
	$t_{f\max}[s]$	0.1	0.13	0.08	0.16	5.2	0	0	0	0.01	0.06	0.1
	$t_{\text{stab},f}[s]$	5.2	5.2	4.1	5.1	5.2	5.2	5.2	2.3	2	1.6	2

(7.145)

Deoarece rezultatele studiului regimurilor tranzitorii prezentate în acest capitol (regimului întâlnite cel mai frecvent în exploatare precum: porniri, încărcări/descărcări bruște de sarcină, reversări, toate acestea atât la tensiune și frecvență constante cât și la tensiune și frecvență variabile) sunt utile din punctul de vedere al solicitărilor electromagnetice care apar în mașina reală, în cele ce urmează se vor trage concluzii și se vor face interpretări pe baza evoluției în timp (dinamicii) numai a mărimilor reale (la fel ca și în capitolul 6) precum: alunecare, turație (sau viteză), curent real de fază, cuplu electromagnetic, etc.

**În cazul pornirii motorului asincron (cu rotorul în scurtcircuit), se constată următoarele:**

-alunecarea scade de la 1 la 0 într-un timp de 2.5[s] ceea ce implică intrarea în același interval de timp în turația de gol la valoarea de 1500[rpm] (vezi figurile 7.2.5, 7.2.6).

-curentul de fază crește de la 0[A] la 1.8[A] (curentul de gol confirmat de măsurători în laborator) într-un timp de 1.5[s], prezentând un vârf (un maxim) de 56[A] (vezi figura 7.2.7). Faptul că curentul de fază se stabilizează mai devreme decât turația (sau alunecarea) cu 1[s] arată că constantele de timp electromagnetice sunt mai mici decât cele mecanice (lucru care este cunoscut dar întărit de rezultatele obținute cu modelul matematic prezentat în lucrare).

-cuplul electromagnetic prezintă imediat după conectarea la rețea un vârf de 34[Nm], ceea ce reprezintă o solicitare considerabilă și se stabilizează în circa 3[s] asemeni turației (vezi figura 7.2.8).

-așa cum se poate observa din figurile 7.2.17, 7.2.21, curentul de fază real precum și cuplul electromagnetic nu depind de unghiul de poziție  $\theta$  ci numai de alunecare (de încărcare). Deci în regimurile tranzitorii de funcționare ale mașinilor asincrone (în cazul de față cu rotorul în scurtcircuit, caz tratat în lucrare) unghiul de poziție nu are nici o influență asupra dinamicii mărimilor reale din mașină ci numai asupra dinamicii (evoluției în timp) a mărimilor din modelul ortogonal de reprezentare (cum sunt curenții statorici și rotorici după cele două axe ale modelului ortogonal, a se vedea figurile 7.2.9, 7.2.11, 7.2.13, 7.2.15). Cele afirmate mai sus (vis-a-vis de unghiul de poziție) sunt valabile și pentru regimurile staționare și cvasistaționare de funcționare ale mașinii asincrone.

**În cazul încărcării bruște a motorului asincron (cu rotorul în scurtcircuit), se constată următoarele:**

-datorită faptului că valorile proprii ale sistemului de ecuații diferențiale care modelează încărcarea bruscă de sarcină a motorului asincron (pe toată plaja de încărcare și pentru toate cele trei valori ale lui  $J$  considerate în acest capitol, a se vedea relația 7.13 respectiv tabelul 7.12) au toate partea reală negativă, rezultă că sistemul de ecuații 7.5 este stabil.

-la încărcarea cu 25% $M_N$ , alunecarea are vârful cel mai pronunțat (0.1) pentru  $J_1 = 0.01766[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ , timpul de stabilizare fiind cel mai mare (3.2[s]). La cealaltă extremă (pentru  $J_3 = 1.766[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ ), alunecarea prezintă un vârf de 0.006 iar timpul de stabilizare este mult mai mic și anume 0.5[s]. Așa cum se poate observa de pe graficul figurei 7.2.77, cealaltă situație prezentată cu  $J_2 = 0.1766[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$  este o situație oarecum de mijloc în sensul că timpii, respectiv vârfurile de șoc sunt medii în raport cu celelalte două situații prezentate anterior.

-la încărcarea cu 50% $M_N$ , 75% $M_N$ , 100% $M_N$  respectiv limita de stabilitate, situația alunecării, comparativ între cele trei cazuri introduse prin  $J_1, J_2, J_3$ , rămâne aceeași, fiind evident că valorile vârfurilor de șoc cresc semnificativ cu încărcarea pentru aceeași valoare a lui  $J$  și timpii de stabilizare sunt cu puțin mai mici pentru încărcări din ce în ce mai mari la valori din ce în ce mai mari ale lui  $J$  (a se vedea figurile 7.2.27, 7.2.35, 7.2.43, 7.2.51, 7.2.59 respectiv tabelele 7.131-7.135).

-și pentru turație sunt valabile aceleași observații de mai sus, în plus adăugându-se faptul că oscilațiile în turație ale motorului asincron cresc în amplitudine cu încărcarea, atingând maximum pentru  $M_{el\text{mag}} = M_{rezistent} = 44.22[\text{Nm}]$  ceea ce înseamnă de 2.2 $M_N$  (vezi figurile 7.2.28, 7.2.36, 7.2.44, 7.2.52, 7.2.60).

-din evoluțiile curentului de fază real (vezi figurile 7.2.29, 7.2.37, 7.2.45, 7.2.53, 7.2.61), rezultă următoarele:

-la încărcări în plaja  $M_{el\text{mag}} = 0[\text{Nm}] \div M_{el\text{mag}} = M_{el\text{mag}N} = 20.1[\text{Nm}]$ , pentru  $J_1$  diferențele între vârfurile de curent care apar (indiferent de încărcare) sunt foarte mici (sub 1[A]). Aceste diferențe se

amplifică însă cu creșterea încărcării peste cuplul nominal până la limita de stabilitate în situația când  $J$  crește de la  $J_1$  la  $J_3$ .

-odată cu creșterea încărcării, întârzierea în curent este aproximativ aceeași, față de mașina sincronă, unde acest fenomen era prezent și care era mai amplu cu creșterea lui  $J$ , deci imediat după încărcare, la mașina asincronă curentul poate prezenta vârfuri mari și poate varia destul de brusc mai ales la sarcini mari.

-la aceeași încărcare, frecvența oscilațiilor și timpul de stabilizare sunt cu atât mai mici cu cât  $J$  este mai mare, spre deosebire de mașina sincronă unde timpii de stabilizare erau mai mari la momente de inerție mai mari).

-cuplul electromagnetic (a cui evoluție se prezintă în figurile 7.2.30, 7.2.38, 7.2.46, 7.2.54, 7.2.62) lasă și el să se desprindă concluzii și interpretări interesante și importante precum următoarele:

-solicitările în cuplu care apar sunt, după cum se desprinde din grafice, foarte mari (mult mai mari decât cuplul nominal) mai ales la sarcini mari. La valori mici ale momentului de inerție axial, înregistrându-se cele mai mari vârfuri de șoc (indiferent de încărcare, mai puțin la limita de stabilitate unde vârful de șoc în cuplu apare pentru  $J_2$ ), acestea pot să ducă în definitiv la torsionarea sau chiar ruperea arborelui mașinii, chiar dacă durata acestora este scurtă (de ordinul milisecundelor). La valori mari ale momentului de inerție axial, chiar dacă solicitările electromagnetice și mecanice sunt puțin mai mici ca amplitudine, acestea având o durată de acțiune mult mai mare și corelate cu fenomenele de rezonanță mecanică care apar pot să ducă la distrugerea mașinii.

-atât solicitările de scurtă durată dar de mare amplitudine și frecvență, cazul încărcărilor bruște mari de sarcină cu momente de inerție de valoare mică, cât și solicitările de amplitudine mai mică dar de durată mai mare (chiar dacă frecvența acestora este și ea mai mică), cazul încărcărilor bruște mici și medii de sarcină cu momente de inerție de valoare mare nu sunt de dorit în funcționarea sistemelor de acționare electrică în regimuri tranzitorii (dinamice) deoarece pot să ducă la distrugerea electromagnetică prin apariția de forțe care prin mișcarea de rotație a rotorului se manifestă ca și forțe centrifuge care smulg înfășurările din crestături, termică prin efect Joule-Lenz (prin încălzirea înfășurărilor și a mașinii în general) și mecanică prin solicitări mecanice în arborele mașinii, în lagăre precum și eventuale fricțiuni la nivelul întrefierului.

-înfășurările (barele) rotorice preiau o parte însemnată din solicitări în raport cu solicitările totale care apar în mașină.

**În cazul descărcării bruște a motorului asincron (cu rotorul în scurtcircuit), se constată următoarele:**

-datorită faptului că valorile proprii ale sistemului de ecuații diferențiale care modelează descărcarea bruscă de sarcină a motorului asincron, pe toată plaja de descărcare și pentru toate cele trei valori ale lui  $J$  considerate în acest capitol (a se vedea relația 7.13), au toate partea reală negativă, rezultă că sistemul este stabil (a se vedea tabelul 7.12).

-la descărcarea de la  $100\%M_N$  la  $0\%M_N$ , alunecarea are vârful cel mai pronunțat (0.054) pentru  $J_1$ , timpul de stabilizare fiind cel mai mare (3.1 [s]). Pentru celelalte trei descărcări de sarcină (pentru  $J_2, J_3$ ), alunecarea prezintă un vârf de aceeași valoare 0.028 iar timpul de stabilizare este mult mai mic și anume 0.6 [s].

-la descărcarea de la  $100\%M_N$  la  $75\%M_N, 50\%M_N$ , respectiv  $0\%M_N$ , situația alunecării, comparativ între cele trei cazuri introduse prin  $J_1, J_2, J_3$ , rămâne aceeași fiind evident că valorile vârfurilor de șoc cresc semnificativ cu descărcarea pentru aceeași valoare a lui  $J$  iar timpii de stabilizare sunt comparabili pentru descărcări din ce în ce mai mari la valori din ce în ce mai mari ale lui  $J$  (a se vedea figurile 7.2.67, 7.2.75, 7.2.83, 7.2.91, respectiv tabelele 7.136-7.139).

-și pentru turație sunt valabile aceleași observații de mai sus, în plus adăugându-se faptul că oscilațiile în turație ale motorului asincron cresc în amplitudine cu descărcarea dar nu sunt atât de mari comparativ cu oscilațiile care apar la încărcare între aceleași tranșe (limite) de încărcare (vezi figurile 7.2.68, 7.2.76, 7.2.84, 7.2.92).

-din evoluțiile curentului de fază real (vezi figurile 7.2.69, 7.2.77, 7.2.85, 7.2.93), rezultă următoarele:

-la descărcări în plaja  $M_{el\text{mag}} = M_{el\text{mag},N} = 20.1 [Nm] \div M_{el\text{mag}} = 0$  pentru orice valoare a lui  $J$ ,

diferențele între vârfurile de curent care apar (indiferent de descărcare) sunt nesemnificative (foarte mici, sub  $0.5[A]$ ) dar distincția apare la timpii de stabilizare (amortizare).

- odată cu creșterea gradului de descărcare, fenomenul de întârziere în curent nu apare iar indiferent de treapta de descărcare, solicitările cele mai mari (ca amplitudine și durată apar pentru momente de inerție mari).

- la aceeași încărcare, frecvența oscilațiilor este cu atât mai mică cu cât  $J$  este mai mare dar pe de altă parte unor frecvențe de oscilație mici corespund timpii de stabilizare mai mari.

- cuplul electromagnetic (a cui evoluție se prezintă în figurile 7.2.70, 7.2.78, 7.2.86, 7.2.94) lasă și el să se desprindă următoarele concluzii și interpretări:

- solicitările în cuplu care apar sunt, după cum se desprinde din grafice (vezi figurile amintite mai sus), sunt foarte mari (depășesc cu mult cuplul nominal al mașinii). Atât la valori mari cât și la valori mici ale momentului de inerție axial, solicitările electromagnetice și mecanice sunt mari ca amplitudine și durată, deci acestea pot să producă deteriorări ale mașinii chiar dacă au o durată de acțiune relativ mică (de ordinul secundelor la valori mari ale lui  $J$  și la descărcări bruște de valori mari) și corelate cu fenomenele de rezonanță mecanică care apar, care pot să ducă la amplificarea oscilațiilor și a timpilor de stabilizare, în timp se poate ajunge la distrugerea mașinii.

- se poate concluziona că descărcările bruște de sarcină la mașina asincronă sunt la fel de periculoase ca încărcările bruște de sarcină, deci trebuie luate în considerare sub aspectul solicitărilor care pot să apară în timp (ca durată de regim tranzitoriu) dar și pe întreaga durată de exploatare (care este de ordinul anilor sau chiar zecilor de ani).

- înfășurările rotorice preiau o parte destul de redusă în raport cu solicitările care apar în mașină, lucru care se explică prin faptul că la mașina asincronă de față (a cărei funcționare se prezintă) colivia rotorică este destul de "slabă".

**În cazul reversării motorului asincron (cu rotorul în scurtcircuit), se constată următoarele:**

- la reversarea din gol, turația (vezi figura 7.2.100) (după cum rezultă și din alunecare, figura 7.2.99) pomește de la  $1500[rpm]$  și schimbă de semn după  $0.7[s](J_1)$ ;  $4[s](J_2)$ ;  $27[s](J_3)$  după care crește, prezentând mici oscilații, până la turația de gol ( $1500[rpm]$ ). La reversarea din sarcină nominală, turația (vezi figura 7.2.108) prezintă oscilații ceva mai mari, în special pentru valori mici ale lui  $J$ , dar schimbă de semn și ajunge la turația nominală ( $1457.1[rpm]$ ) mult mai repede, acest lucru fiind valabil și pentru celelalte mărimi care caracterizează dinamica mașinii reale. Acest lucru se explică prin faptul că înainte de reversare exista un cuplu rezistent de semn opus cuplului electromagnetic iar imediat după momentul reversării cuplul electromagnetic schimbă de semn (având același semn cu cuplul rezistent) și în acest fel cuplul rezistent contribuie alături de cel electromagnetic la accelerarea rotorului până la intrarea în turație. Cu cât sarcina (cuplul rezistent activ) este mai mare respectiv  $J$  este de asemenea mai mare, cu atât reversarea se face mai rapid dar oscilațiile în turație și în curenți sunt mai mari respectiv vârfurile de curent sunt foarte mari (de până la 10 ori curențul nominal, vezi figura 7.2.109) și de asemenea vârfurile de cuplu sunt mari (de 3 – 4 ori cuplul nominal, vezi figura 7.2.110).

- după cum se poate observa din figurile 7.2.101, 7.2.109, atât la reversarea din gol cât și la reversarea din sarcină nominală oscilațiile în curenții de fază au aproximativ aceeași amplitudine (în jur de  $40[A]$ ), aceeași frecvență (evident pentru același  $J$ ), diferențele apărând la timpii de stabilizare care în cazul reversării din gol sunt mai mari.

- aceleași observații de la punctul anterior se pot aplica și evoluției în timp a cuplului electromagnetic (a se vedea figurile 7.2.102, 7.2.110).

- atât la reversarea din gol cât și reversarea din sarcină nominală apar deci solicitări în curent și în cuplu foarte mari (de mare amplitudine și de durată) care pot să pună în pericol buna funcționare a sistemelor de acționare electrică cu mașini asincrone, de aceea cunoașterea acestor solicitări impun: o dimensionare corespunzătoare precum și trasarea condițiilor cadru (a limitărilor solicitărilor) de lucru încă din faza de proiectare.

**În cazul funcționării la frecvență și tensiune variabile a motorului asincron (cu rotorul în scurtcircuit), se constată următoarele:**

- în urma studiului regimului tranzitoriu de încărcare bruscă de sarcină în cazul funcționării la flux

statoric controlat se desprind următoarele concluzii:

-în situația saltului de sacină prescris (de la  $25\%M_N$  la  $75\%M_N$ ), regulatorul PI (vezi figura 7.3.1- regulatorul RU) impune o creștere a tensiunii statorice ca în figura 7.3.6, într-un timp care este mai mare sau mai mic în funcție de constanta de timp a regulatorului și în care frecvența tensiunii statorice (vezi figura 7.3.7) prezintă o scădere.

-la o descreștere de frecvență impusă de regulatorul PI (vezi figura 7.3.1- regulatorul Rf), cele mai ample pulsații în viteză rotorului (vezi figura 7.3.8) apar pentru  $J_1$  iar cele mai mari solitări în curentul de fază atât ca vârfuri de șoc cât și ca durată (vezi figura 7.3.11) apar pentru  $J_3$ .

-atât curentul de fază cât și cuplul electromagnetic (a se vedea figura 7.3.12), fluxul statoric (a se vedea figura 7.3.9) respectiv fluxul rotoric (a se vedea figura 7.3.10) prezintă oscilații mai mari (foarte periculoase) pentru valori mai mari ale lui  $J$ .

-la modificări ale constantei de timp ale reguletoarelor PI (de pe tensiunea statorică și de pe frecvența tensiunii statorice) se produc diferențe substanțiale asupra evoluției în timp a mărimilor ce caracterizează regimul tranzitoriu (vezi figurile 7.3.30-7.3.34) în sensul că solicitările cele mai mici în fluxul statoric și fluxul rotoric sunt pentru  $J_3$  iar cele mai mari pentru  $T_{i1} = 0.01[s]$ ; de asemenea, de data aceasta în curent și în cuplu solicitările sunt maxime pentru  $T_{i1}$  iar minime pentru  $T_{i2} = 0.1[s]$ . În viteza rotorului, solicitările maxime sunt pentru  $T_{i3} = 1[s]$  iar cele minime pentru  $T_{i1}$ . Faptul că nu s-a ajuns ca solicitările maxime și minime în toate mărimile ce caracterizează procesele tranzitorii studiate să corespundă aceleiași valori a constantei de timp, înseamnă că reguletoarele PI de pe tensiunea statorică respectiv frecvența tensiunii statorice nu sunt riguros acordate pentru aplicația considerată, valoarea sau valorile optime (în vederea unor solicitări minime) ale constantelor de timp fiind cu totul altele decât cele considerate în acest exemplu.

-în urma studiului regimului tranzitoriu de încărcare bruscă de sarcină în cazul funcționării la flux rotoric controlat se desprind următoarele concluzii:

-în contrast cu funcționarea la flux statoric controlat, la flux rotoric controlat (vezi figurile 7.3.19-7.3.23) vârfurile de șoc precum și oscilațiile care apar (ca amplitudine și durată) sunt mai mici în special în curent și în cuplu.

-la modificarea constantei de timp a reguletoarelor, nu se constată diferențe substanțiale (vezi figurile 7.3.41-7.3.45) în afară de faptul că oscilațiile mai mici (atât ca amplitudine cât și ca durată).

-în concluzie pentru cazul de față (flux rotoric controlat), soluția aleasă pentru comanda și controlul sistemului de acționare electrică cu mașină asincronă nu este atât de evidentă ca la mașina sincronă deoarece valoarea constantei de timp nu asigură reguletoarelor PI o acordare corespunzătoare din punctul de vedere al minimizării solicitărilor care apar în timpul procesului tranzitoriu, exemplul prezentat fiind un exemplu negativ dar care își are utilitatea lui deoarece arată ce efect are asupra comportării unui sistem de acționare electrică cu mașină asincronă o acordare necorespunzătoare a reguletoarelor.



**Cap8.DETERMINĂRI EXPERIMENTALE ȘI COMPARAREA REZULTATELOR  
 OBȚINUTE PRIN SIMULARE ȘI EXPERIMENTAL**

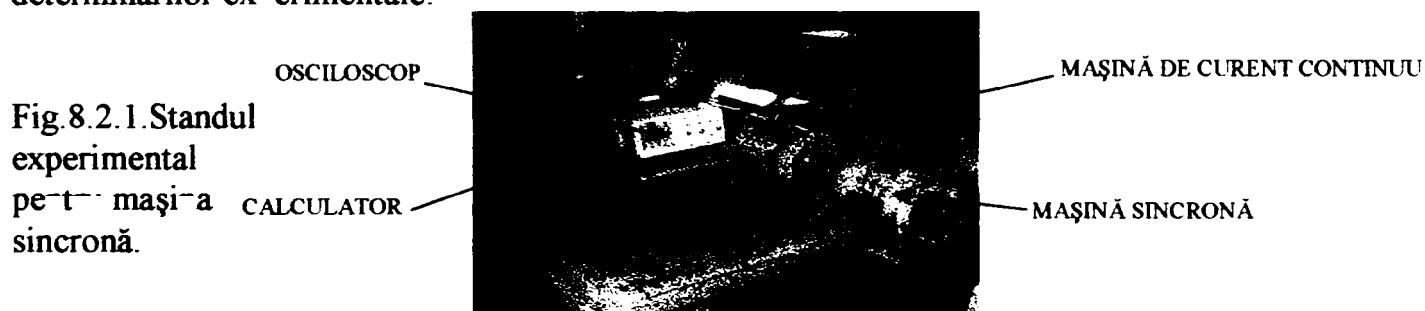
**8.1.Introducere**

Pentru determinările experimentale prezentate în acest capitol, s-a realizat o achiziție de date cu ajutorul unui calculator care preia și reține informațiile de la un osciloscop performant, acest osciloscop măsurând(înregistrând) curentul prin intermediul unui transformator de curent iar informația despre turație obținând-o prin intermediul tensiunii de la bornele indusului unui motor de curent continuu cuplat mecanic cu mașinile considerate în această lucrare.

În acest capitol se prezintă determinările experimentale ale curentului de fază, turației respectiv cuplului electromagnetic pentru sincronizarea motorului sincron respectiv pentru pornirea în gol a motorului asincron, considerându-se că aceste determinări sunt suficiente pentru verificarea veridicității modelului matematic prezentat și utilizat în lucrare.

**8.2.Mașina sincronă**

În figura 8.2.1 se prezintă standul experimental cu care s-a lucrat în vederea realizării determinărilor experimentale:



unde elementele din figură sunt interconectate ca în figura 8.2.2:

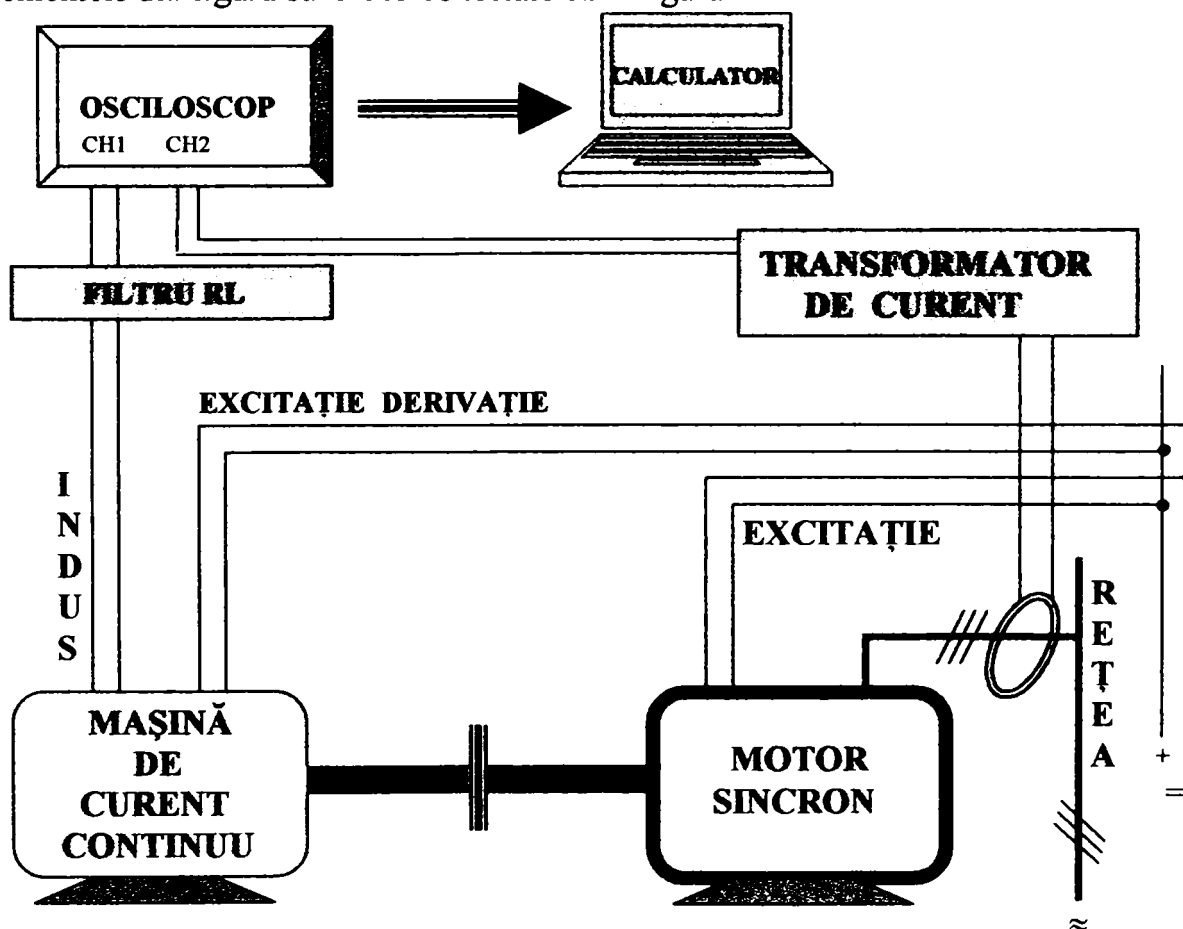
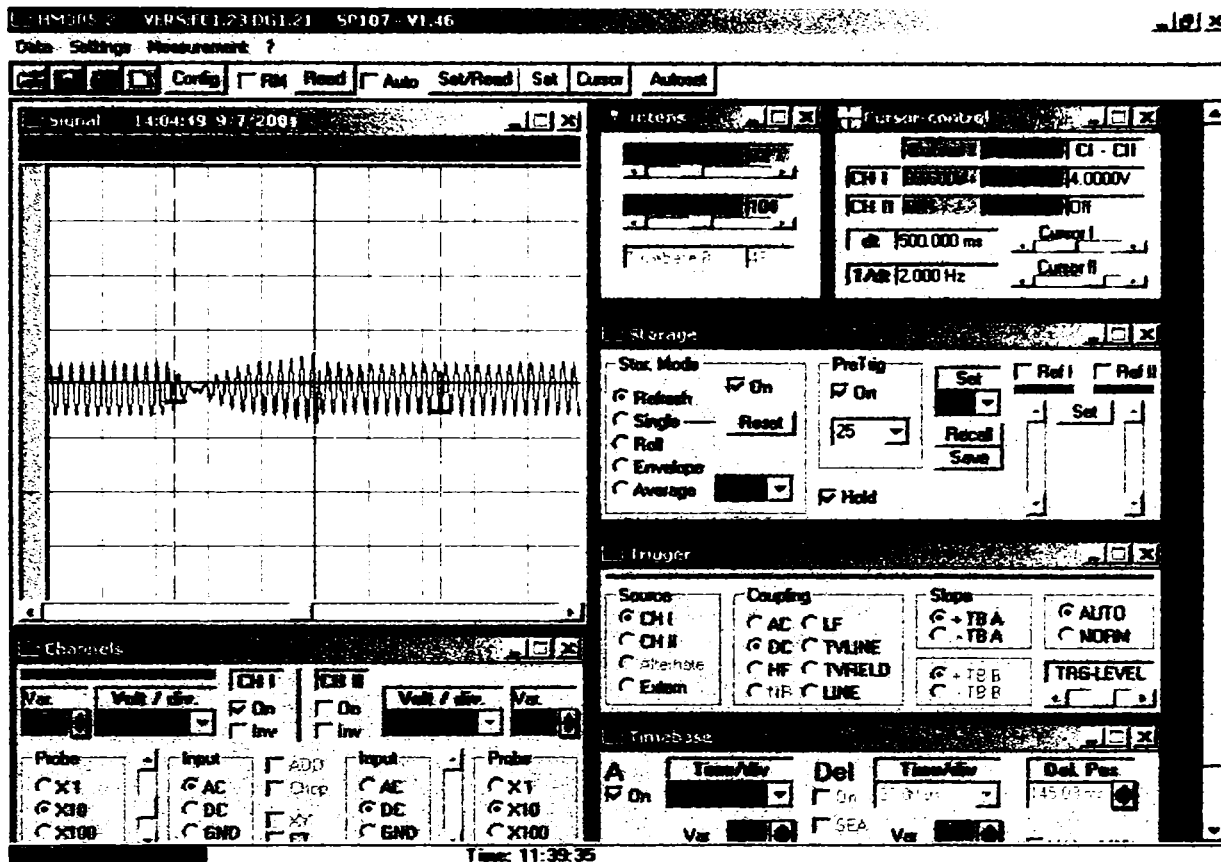


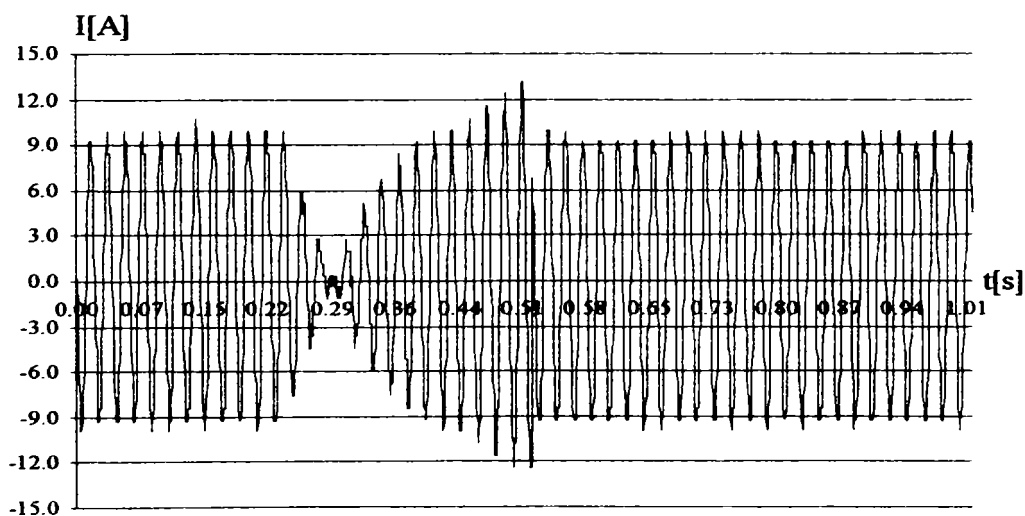
Fig.8.2.2. Schema electrică a standului experimental la mașina sincronă.

Cu ajutorul unui transformator de curent care aduce o fracțiune din curent la intrarea în osciloscop apoi această variație a curentului de fază este înregistrată de un calculator conectat cu osciloscopul se determină următoarea evoluție în timp a curentului de fază la sincronizarea motorului sincron:



**Fig.8.2.3.Înregistrarea curentului de fază la sincronizarea motorului sincron.**

iar după prelucrarea numerică a semnalului cu ajutorul programului Mathematica, rezultă următoarea variație:



**Fig.8.2.4.Variația în timp a curentului de fază la sincronizarea motorului sincron.**

Cu ajutorul tensiunii induse în indusul mașinii de curent continuu aceasta fiind adusă printr-un filtru la intrarea în osciloscop apoi această variație este înregistrată de un calculator conectat cu osciloscopul, în acest fel determinându-se următoarea evoluție în timp a tensiunii induse (proporțională linear cu turația mașinii sincrone) la deconectarea motorului sincron:

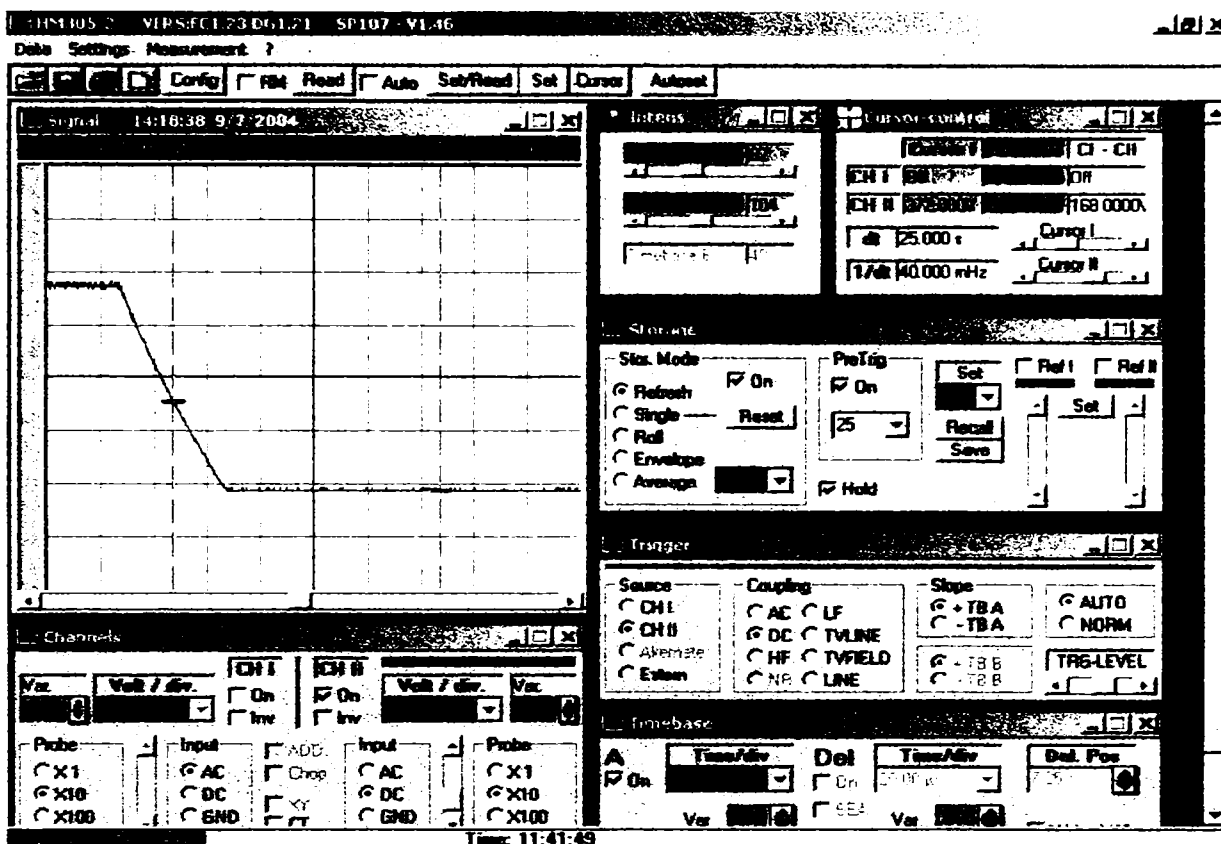


Fig.8.2.5.Înregistrarea turației la deconectarea motorului sincron.

iar după prelucrarea numerică a semnalului cu ajutorul programului Mathematica, rezultă pentru turație următoarea variație:

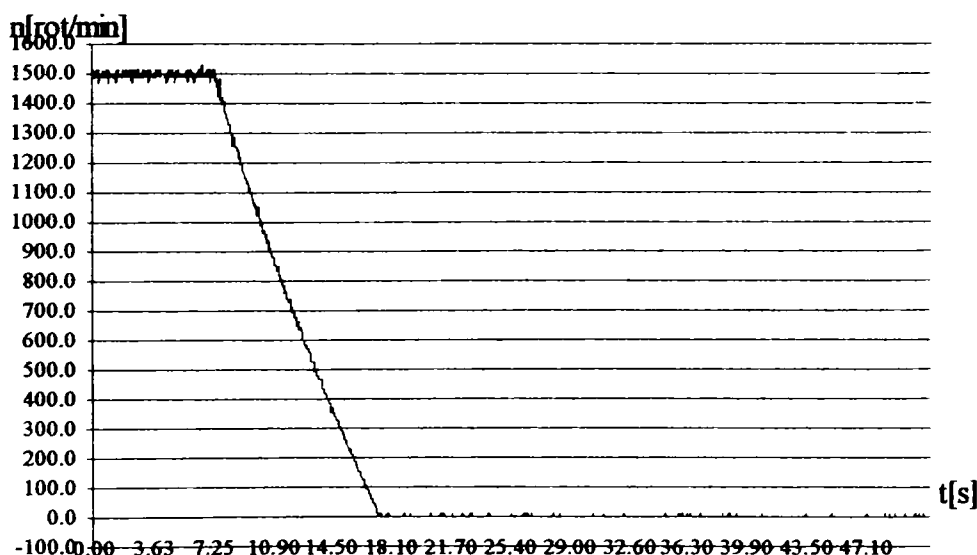


Fig.8.2.6.Variația în timp a turației la deconectarea de la rețea a motorului sincron.

8.3.Mașina asincronă

În figura 8.3.1 se prezintă standul experimental cu care s-a lucrat în vederea realizării determinărilor experimentale:

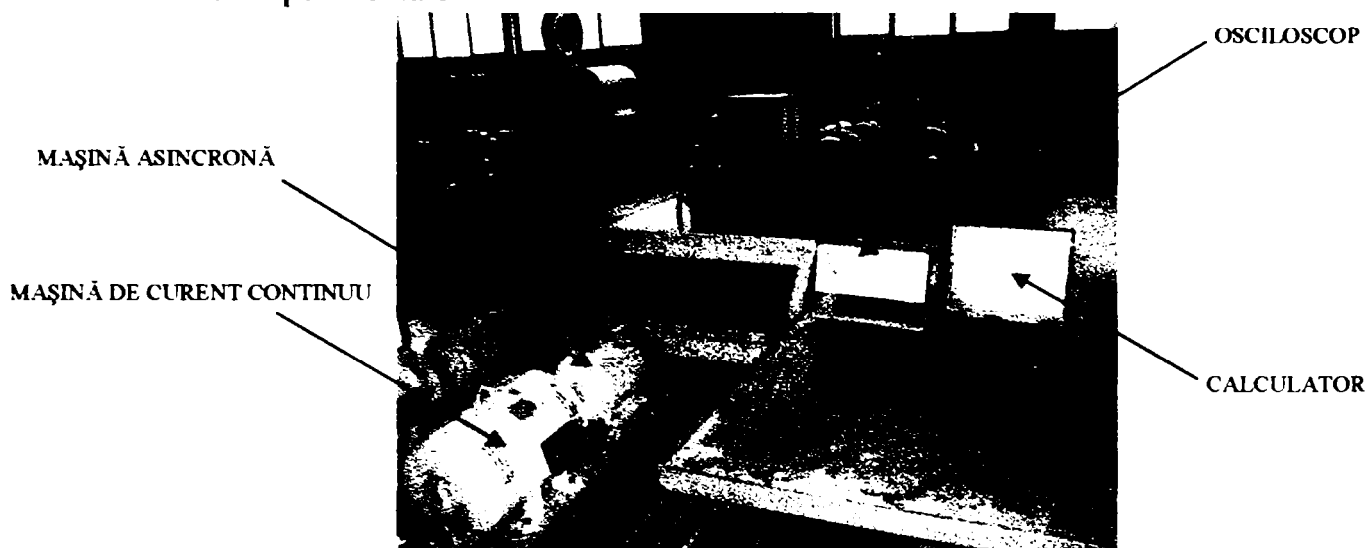


Fig 8.3.1.Standul experimental pentru mașina asincronă.

unde elementele din figură sunt interconectate ca în figura 8.3.2:

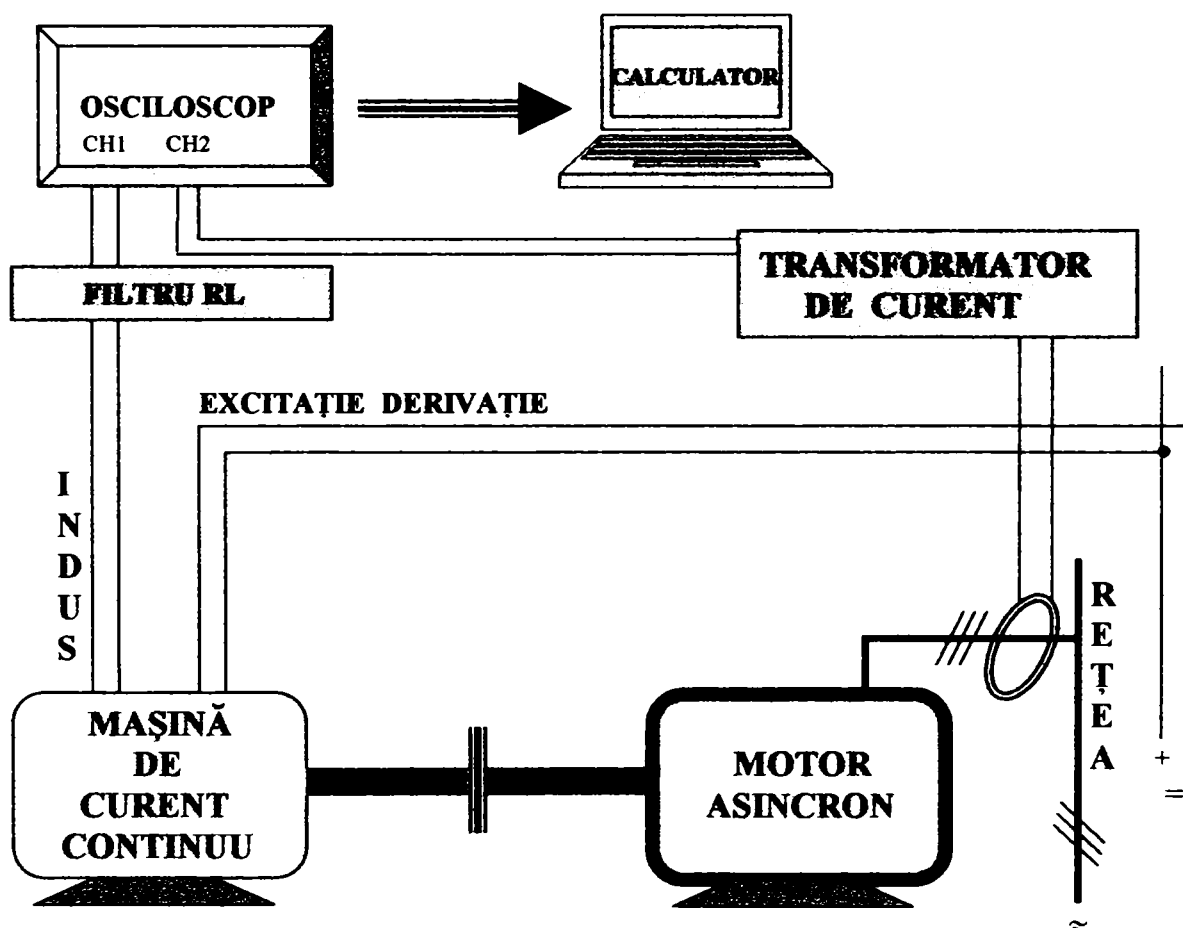


Fig.8.3.2. Schema electrică a standului experimental la mașina asincronă.

Cu ajutorul unui transformator de curent care aduce o fracțiune din curent la intrarea în osciloscop apoi această variație a curentului de fază este înregistrată de un calculator conectat cu osciloscopul se determină următoarea evoluție în timp a curentului de fază la pornirea motorului asincron:

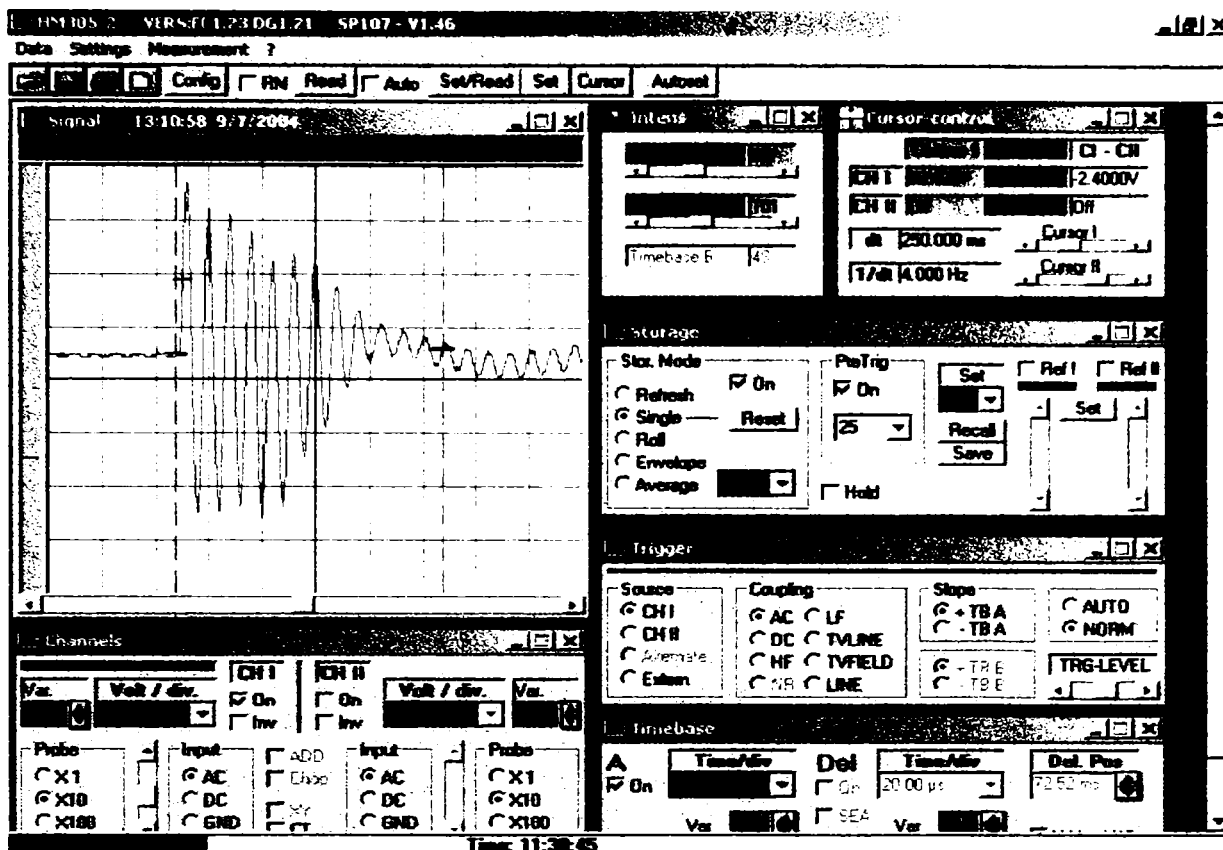


Fig.8.3.3.Înregistrarea curentului de fază la pornirea motorului asincron.

iar după prelucrarea numerică a semnalului cu ajutorul programului Mathematica, rezultă următoarea variație:

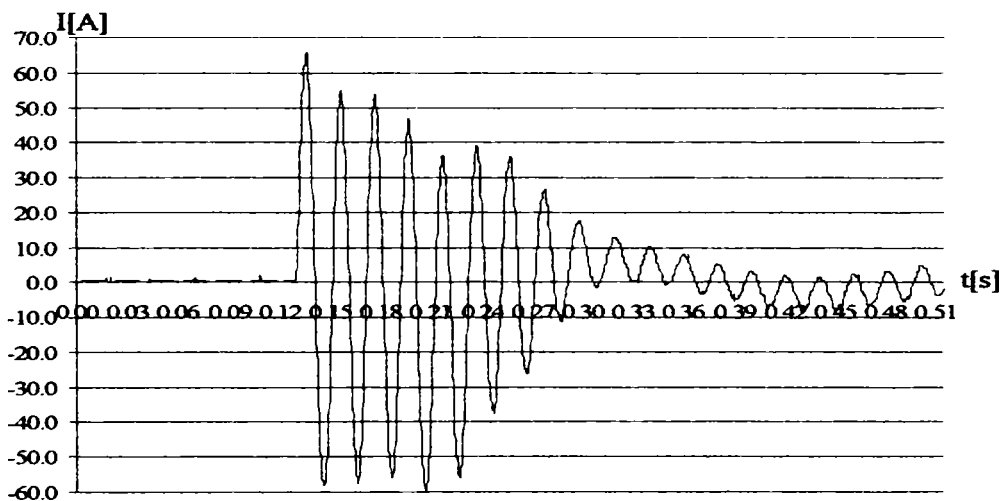


Fig.8.3.4. Variația în timp a curentului de fază la pornirea motorului asincron.

Cu ajutorul tensiunii induse în indusul mașinii de curent continuu aceasta fiind adusă printr-un filtru la intrarea în osciloscop apoi această variație este înregistrată de un calculator conectat cu osciloscopul, în acest fel determinându-se următoarea evoluție în timp a tensiunii induse (proporțională liniar cu turația mașinii asincrone) la pornirea motorului asincron:

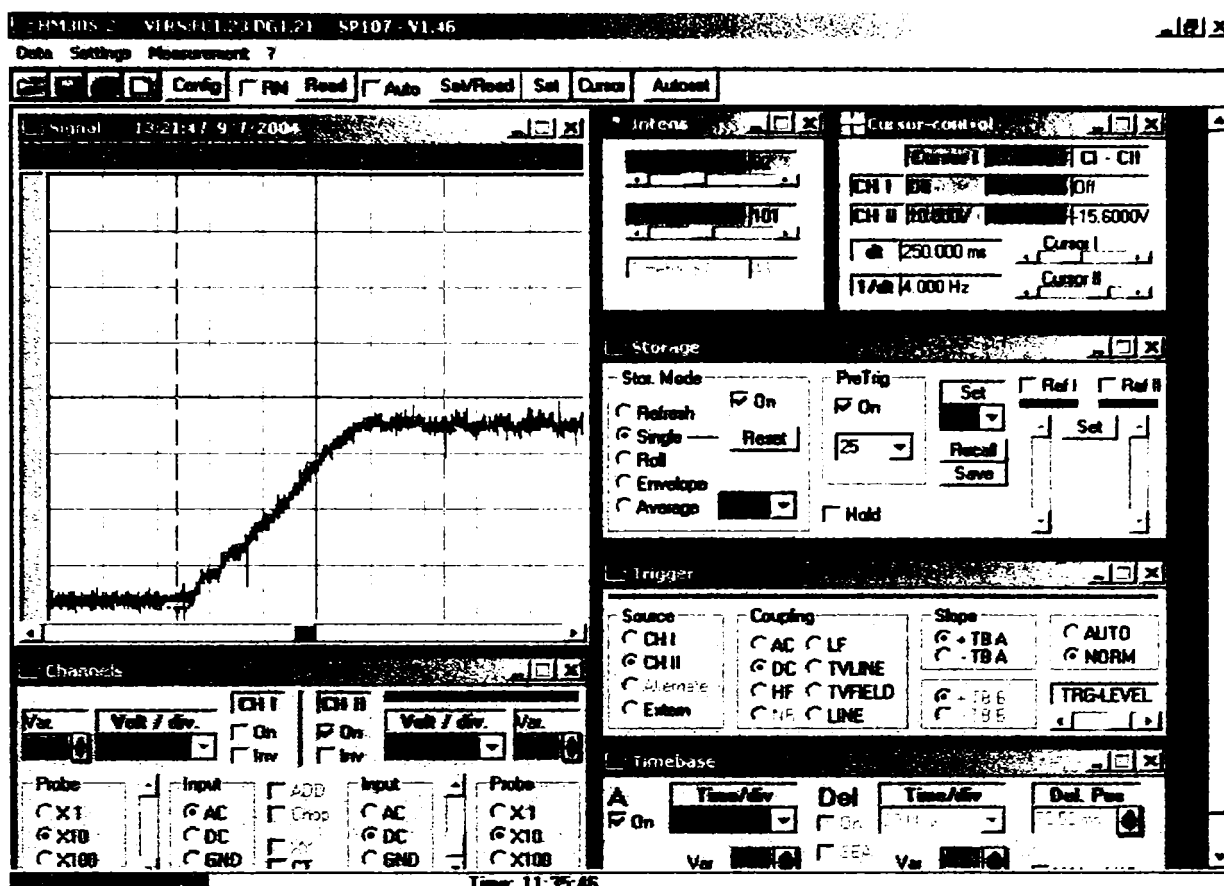


Fig.8.3.5.Înregistrarea turației la pornirea motorului asincron.

iar după prelucrarea numerică a semnalului cu ajutorul programului Mathematica, rezultă pentru turație următoarea variație:

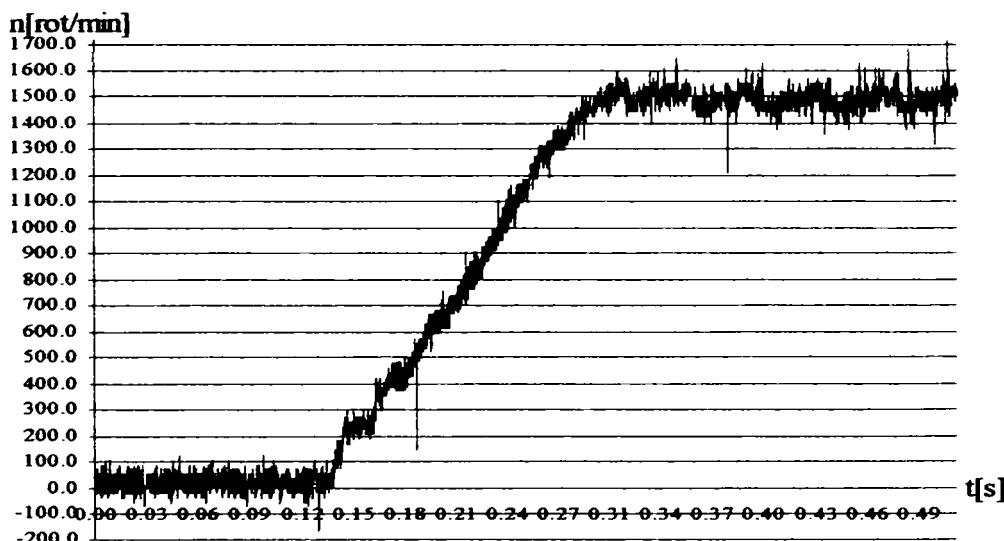


Fig.8.3.6.Variația în timp a turației la conectarea la rețea a motorului asincron.

Tot cu ajutorul tensiunii induse în indusul mașinii de curent continuu aceasta fiind adusă printr-un filtru la intrarea în osciloscop apoi această variație este înregistrată de un calculator conectat cu osciloscopul, în acest fel determinându-se următoarea evoluție în timp a tensiunii induse (proporțională liniar cu turația mașinii asincrone) la deconectarea motorului asincron:

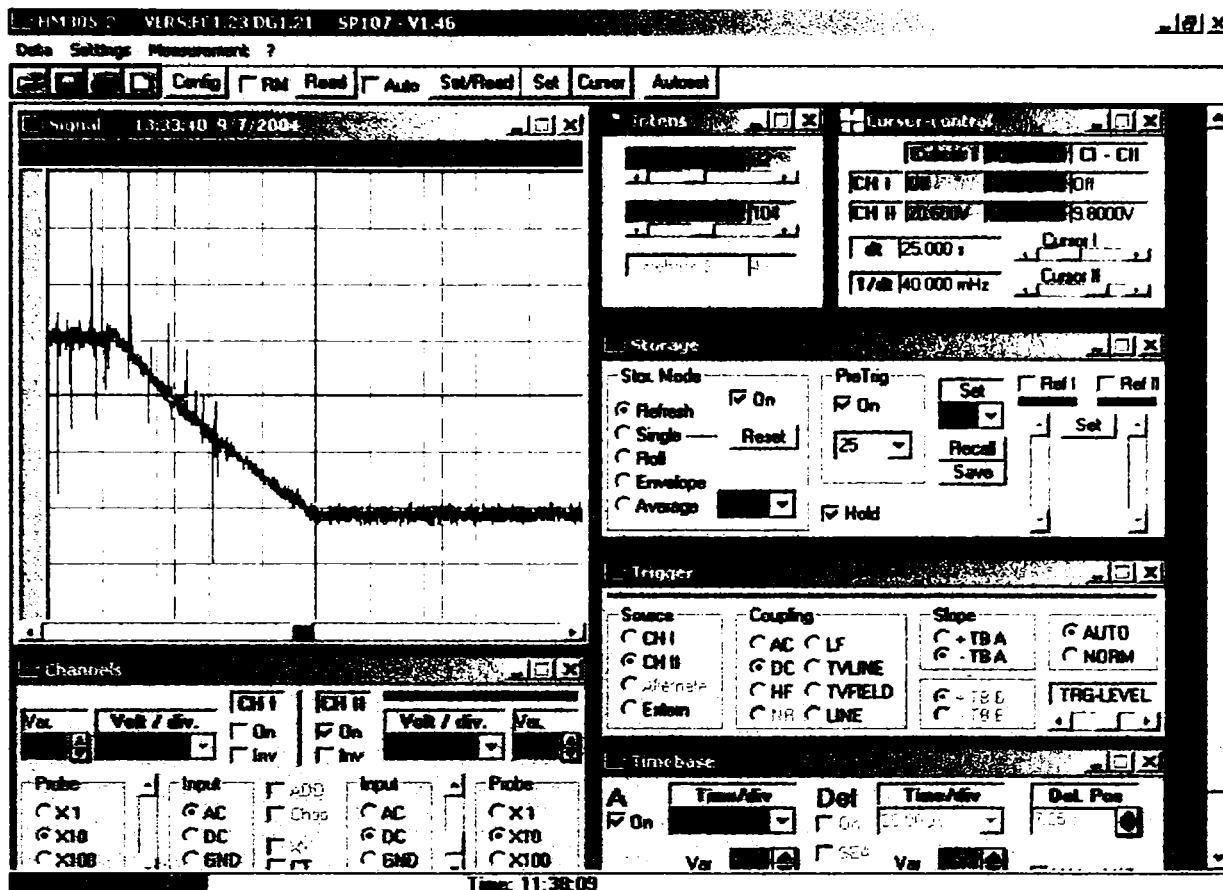


Fig.8.3.7.Înregistrarea turației la deconectarea motorului asincron.

iar după prelucrarea numerică a semnalului cu ajutorul programului Mathematica, rezultă pentru turație următoarea variație:

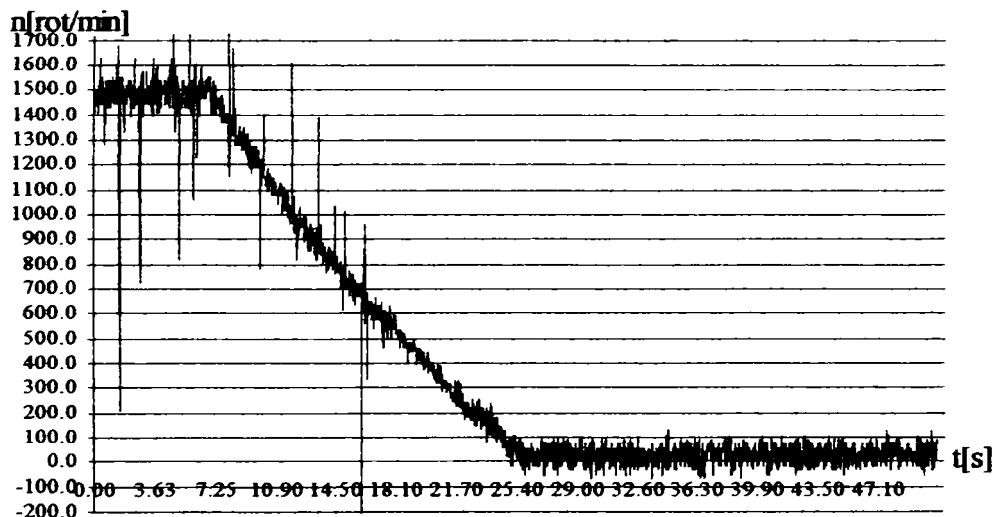


Fig.8.3.8. Variația în timp a turației la deconectarea de la rețea a motorului asincron.

În cele ce urmează se va prezenta o metodă de determinare a cuplului electromagnetic al motorului asincron în regimul tranzitoriu de pornire, pornind de la ecuația mișcării, care este o ecuație diferențială de ordinul I.

Ecuația de mișcare, pentru regimul de mers în gol, are forma următoare:

$$\underbrace{M_{elmag}(t)}_{\text{cuplul electromagnetic}} - \underbrace{M_{frecari}(t)}_{\text{cuplul de frecari}} = \underbrace{J}_{\text{momentul de inerție axial}} \cdot \underbrace{\frac{d\Omega(t)}{dt}}_{\text{accelerata unghiulara}} \quad (8.1)$$

Pentru a determina cuplul electromagnetic, în prealabil trebuie determinat cuplul de frecări, prin deconectarea de la rețea a mașinii derivarea numerică a vitezei unghiulare mecanice la oprirea rotorului(imediat după deconectare  $M_{elmag} = 0[Nm]$ ):

$$M_{frecari}(t) = -J \frac{d\Omega_o(t)}{dt} \quad (8.2)$$

unde  $\Omega_o(t)$  are forma celei din figura 8.3.8(turația la oprire).

Cuplul electromagnetic devine(din 8.1, 8.2):

$$M_{elmag}(t) = -J \frac{d\Omega_o(t)}{dt} + J \frac{d\Omega_p(t)}{dt} = J \left[ \frac{d\Omega_p(t)}{dt} - \frac{d\Omega_o(t)}{dt} \right] \quad (8.3)$$

unde  $\Omega_p(t)$  are forma celei din figura 8.3.6 (turația la pornire).

Cunoscându-se deci viteza rotorului la pornire și la oprire(sunt cunoscute tabelar, prin achiziție de date), în condițiile în care momentul de inerție axial este constant și cunoscut, prin derivare numerică se rezolvă ecuația mișcării(sub forma 8.3), care este o ecuație ordinară de ordinul I cu variabila independentă timpul, rezultând pentru mașina asincronă considerată în lucrare evoluția în timp a cuplului electromagnetic la pornire de forma următoare:

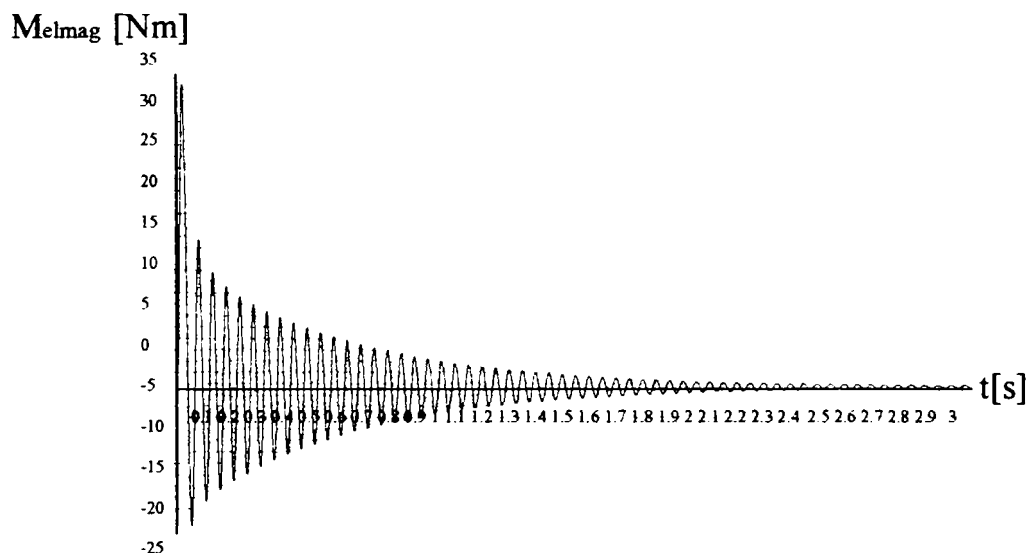


Fig.8.3.9.Variația în timp a cuplului electromagnetic al motorului asincron la pornire.

#### 8.4.Concluzii

- după cum se observă din figurile 6.2.33 respectiv 8.2.4 diferențele care apar în evoluția curentului real de fază la sincronizarea motorului sincron sunt foarte mici cu excepția vârfului de circa 46[A] din curba simulată care nu apare pe cea obținută experimental, acest vârf fiind datorat procesului de calcul.
- din figurile 7.2.7, 8.3.4 se observă că diferențele dintre evoluția în timp a curentului de fază real la pornirea motorului asincron simulată și cea obținută experimental sunt mici; deasemenea din figurile 7.2.6, 8.3.6 se observă că diferențele dintre evoluția în timp a turației respectiv cuplului electromagnetic(vezi figurile 7.2.8, 8.3.9) la pornirea motorului asincron simulată și cea obținută experimental sunt și ele mici.
- rezultând deci aceste diferențe mici(de sub 5%) între evoluțiile în timp ale mărimilor obținute prin simulare și cele obținute experimental, se poate afirma cu certitudine că modelul matematic realizat, prezentat și utilizat în această lucrare este validat.



## Cap9.CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

### 9.1.Concluzii generale

Tema tezei de doctorat este de importanță deosebită în domeniul sistemelor de acționare electrică la modul general și la sistemele de acționare electrică cu mașini de curent alternativ sincrone și asincrone în special. Importanța temei lucrării de față reiese din faptul că ocupă un loc deosebit în cercetările care se fac pe plan internațional atât prin seriozitatea și profunzimea studiilor făcute până în prezent în domeniul proceselor dinamice din sistemele de acționare electrică cu mașini de curent alternativ sincrone și asincrone cât și din faptul că această temă a atras și atrage un număr mare de cercetători din toată lumea[B1, B2, B3, B4, C3, O2].

Aducerea de contribuții la această tematică și la problemele practice care se ridică este o necesitate în contextul evoluției respectiv noilor cerințe ale sistemelor de acționare din diverse puncte de vedere precum: performanțe deosebite, fiabilitate ridicată, funcționare optimală din punct de vedere energetic, etc.

Tema propusă în această lucrare de doctorat prezintă o importanță deosebită sub aspect teoretic (soluționarea ei presupune aparate(modele) matematice complexe care de cele mai multe ori sunt greu de analizat cu toate resursele matematice care ne stau la dispoziție la ora actuală) în sensul că soluționarea problemelor complexe care apar implică instrumente și metode specifice de abordare care la rândul lor pot să deschidă, pe parcursul abordării și soluționării temei propuse, în mod direct prin analogie sau prin extrapolare, în domenii conexe sau chiar diferite, noi direcții de cercetare științifică. Deasemenea tema propusă are o importanță practică deosebită prin cunoașterea comportării sistemelor de acționare electrică cu mașini de curent alternativ sincrone și asincrone în procese dinamice atât sub aspectul fenomenelor (electromagnetice, mecanice, etc) care însoțesc aceste procese tranzitorii cât și sub aspectul cunoașterii solicitărilor care apar.

Toate aceste informații despre comportarea sistemelor de acționare electrică cu mașini sincrone și asincrone în diverse regimuri tranzitorii întâlnite în exploatare contribuie la o bună dimensionare a acestora încă din faza de proiectare, pentru ca acestea să facă față unor solicitări deja cunoscute și evaluate dinainte cu ajutorul simulărilor numerice. Deasemenea cunoașterea în prealabil a acestor solicitări, care ar putea să apară și eventual să distrugă sau cel puțin să pună în pericol siguranța și buna funcționare a sistemelor de acționare electrică, recomandă sau nu utilizarea sistemului de acționare respectiv într-o situație sau alta în funcție de condițiile și regimurile de funcționare. Cunoașterea comportării sistemelor de acționare electrică cu mașini de curent alternativ și nu numai, în procese dinamice, ajută deasemenea, în acord cu noile tendințe pe plan mondial în domeniul sistemelor de acționare electrică precum și în alte domenii, la a recomanda un anumit sistem de acționare electrică, în condiții de funcționare impuse și simulate anterior (deci cunoscute înainte de punerea în funcțiune) pentru o singură aplicație dată, așa-numitele sisteme de acționare electrică dedicate, sisteme ce sunt concepute să funcționeze optimal(din punct de vedere tehnico-economic) numai pentru o aplicație anume[B14, B17].

În continuare, se prezintă concluziile generale asupra tezei de doctorat, prezentate în corelare pentru fiecare capitol în parte.

**În capitolul 1** se face o introducere a lucrării unde se face o încadrare bibliografică a temei propuse și apoi o prezentare sumară vis-a-vis de conținutul tezei de doctorat din care rezultă (prin care se justifică) necesitatea abordării temei propuse [B1, B14, D1, D2, D4, K2, K3, S1].

**În capitolul 2** se face o prezentare a stadiului actual la nivel național și internațional (cu trimitere la bibliografia din domeniu, în limitele cunoscute de autor) al utilizării modelului ortogonal al mașinilor electrice la studiul regimurilor tranzitorii [D3, D4].

**În capitolul 3** se face o analiză matematică a ecuațiilor mașinilor sincronă și asincronă cu rotorul în scurtcircuit, în urma acestei analize desprinzându-se următoarele concluzii:

- Ecuațiile modelului ortogonal, sub aspect matematic, așa cum rezultă din paragraful 3.1, prezintă simplitate și coerență, avantaje care fac ca modelul ortogonal să fie deosebit de util în vederea unei reprezentări cât mai simple și în același timp cât mai exhaustive și fidele a mașinii electrice fizice (reale) [D3, D4];
- În urma celor arătate în paragraful 3.2, se poate concluziona că din punctul de vedere al problemei Cauchy, sistemele de ecuații diferențiale obținute din scrierea matricială a ecuațiilor mașinii (sincrone și asincrone) sunt bine analizate și sub aspectul existenței, unicității și stabilității soluției, aparatul matematic este complet și bine conturat [I2, M1, O1, R2, S2];
- Din paragrafele 3.3 și 3.4 se desprinde concluzia că pornind de la matricea formată din coeficienții derivatelor sistemului de ecuații diferențiale, pe baza expresiei (literale) a determinantului acestei matrici, se poate găsi domeniul parametrilor mașinilor electrice sincrone (la care domeniul parametrilor este un domeniu volumic- *cub unitate*) și asincrone (la care domeniul parametrilor este un domeniu suprafață- *pătrat unitate*) [B2];
- Din paragraful 3.5 se poate conchide că între mașina reală (fizică) și model trebuie să existe anumite relații de legătură, absolut necesare, relații prezentate sintetic în figurile 3.5.2 respectiv 3.5.3 [B1, B3, B4, B14].

**În capitolul 4** se prezintă metode de determinare a parametrilor sistemelor de acționare electrică cu mașini sincrone [B4, B15, B18], se prezintă deasemenea un exemplu concret de determinare a parametrilor pentru o mașină sincronă dată (vezi relația 4.1), pe baza căruia se desprind următoarele concluzii:

- *Determinarea parametrilor de regim tranzitoriu ai mașinii sincrone din probe în axele  $d$  și  $q$* , după cum se poate observa din cele prezentate în paragraful 4.1, este o metodă laborioasă care implică atât o parte experimentală (probe în axele  $d$  respectiv  $q$ ) cât și o parte de calcul (soluționarea unui sistem algebric de nouă ecuații, puternic neliniar) care uneori ridică probleme deosebite. Avantajul principal al acestei metode stă în faptul că probele în cele două axe se fac static (fără a pune în mișcare rotorul mașinii sincrone, lucru care ar fi practic imposibil la mașinile sincrone de putere mare);
- *Determinarea parametrilor mașinii sincrone pe baza datelor de catalog și a geometriei mașinii* este o metodă care implică doar partea de calcul (care nu prezintă probleme deosebite) fiind potrivită situației în care sunt cunoscute datele de catalog (inclusiv constantele de timp) respectiv dimensiunile geometrice ale mașinii;

- *Determinarea parametrilor mașinii sincrone în regim staționar din probele de gol respectiv scurtcircuit* este de această dată o metodă care implică partea experimentală, partea de calcul fiind extrem de simplă;
- În funcție de situație, oricare dintre cele trei metode prezentate își găsește utilitatea, în raport cu avantajele și dezavantajele pe care le prezintă respectiv posibilitatea practică de aplicare. Un criteriu fundamental însă de a alege o metodă sau alta este precizia cu care sunt determinați parametrii mașinii. Pentru mașina sincronă considerată în această lucrare se poate trage concluzia că parametrii mașinii, determinați pe baza celor trei metode prezentate mai sus prezintă foarte mici diferențe (acceptabile ținând cont de erorile de calcul). Drept referință se consideră rezultatele obținute prin prima metodă, argumentul fiind că această metodă de determinare a parametrilor îmbină atât o parte experimentală consistentă de unde se culeg multe informații cât și o parte deasemenea consistentă de calcul care în condițiile unui aparat matematic solid se pretinde a fi destul de precisă;
- *Determinarea momentului de inerție axial* se face pe baza metodelor clasice cunoscute în literatura de specialitate și prezentate în paragraful 4.4[S1]. De obicei în ultimul timp, valoarea momentului de inerție axial este dată de firma constructoare.

**În capitolul 5** se prezintă determinarea parametrilor sistemelor de acționare electrică cu mașini asincrone cu rotorul în scurtcircuit, se prezintă deasemenea un exemplu concret de determinare a parametrilor pentru o mașină asincronă dată, pe baza căruia se desprind următoarele concluzii:

- *Determinarea parametrilor mașinii asincrone pe baza datelor de catalog și a probelor de mers în gol* este o metodă simplă care implică atât partea experimentală (mers în gol la tensiunea nominală) care nu ridică probleme deosebite (nici chiar la mașinile de putere mare unde pornirea în gol se face cu tensiune variabilă pentru a evita șocurile de putere în rețea și în mașină) cât și partea de calcul (care nici ea nu prezintă dificultăți) fiind potrivită situației în care sunt cunoscute datele de catalog ale mașinii[V1];
- *Determinarea momentului de inerție axial* se face pe baza metodelor clasice cunoscute în literatura de specialitate și prezentate în paragraful 4.4., cu mențiunile făcute în paragraful 5.2[S1].

**În capitolele 6 și 7** se face un studiu asupra comportării sistemelor de acționare electrică cu mașini sincrone și asincrone cu rotor în scurtcircuit în diverse regimuri tranzitorii uzual întâlnite în exploatare (cum sunt porniri, încărcări/descărcări de sarcină, reversări, toate acestea cu influența modificării parametrilor acționării cum sunt: momentul de inerție axial, cuplul rezistent, constante de timp ale reguletoarelor, etc), în condițiile funcționării atât la tensiune și frecvență constante cât și la tensiune și frecvență variabile. Rezultatele studiului arată că solicitările electromagnetice și mecanice (mari, de cele mai multe ori inadmisibile) care apar în aceste regimuri pot fi cunoscute cu destulă precizie în vederea luării măsurilor de limitare sau de exploatare care se impun[C3, B2, D5, O2].

**În capitolul 8** se dau câteva rezultate experimentale care comparate cu cele obținute prin simulare permit concluzia ca modelul matematic realizat, analizat matematic, prezentat și utilizat este valid, adică rezultatele obținute prin aplicarea lui sunt foarte apropiate de realitate[C3, O2].

Cu siguranță, atât modelul matematic cât și rezultatele obținute nu sunt perfecte dar sunt perfectibile în sensul că această lucrare în ansamblul ei nu se dorește decât (sigur cu contribuțiile originale de rigoare, utile celorlalți cercetători) o problematizare a temei propuse și în același timp o provocare pentru a se aduce noi contribuții în această direcție, în domeniul sistemelor de acționare electrică cu mașini de curent alternativ sincrone și asincrone și nu numai.

## 9.2.Contribuții personale

1.Analiza și sistematizarea literaturii de specialitate care vizează tema tezei de doctorat în vederea utilizării pe cât posibil, în sfera de cunoștințe și de informare acumulate de autor în timpul avut la dispoziție, a cât mai multor contribuții anterioare, pentru a avea un punct de plecare de actualitate(a se vedea bibliografia, capitolul 10 ).

2.Analiza și sistematizarea literaturii de specialitate care vizează utilizarea modelului ortogonal de reprezentare a mașinilor electrice de curent alternativ sincrone și asincrone(vezi capitolul 2).

3.Abordarea matematică a ecuațiilor mașinilor sincronă și asincronă scrise pe baza modelului ortogonal și construirea unui model matematic propriu(a se vedea capitolul 3 ):

- Scrierea ecuațiilor matriciale ale mașinilor sincrone și asincrone într-o formă preferată de autor, formă în care se pot pune în evidență anumite proprietăți matematice ale matricilor(a se vedea relațiile 3.3, 3.4, 3.14, 3.15, 3.16).
- Determinarea prin analiză matematică a domeniului de existență a parametrilor mașinilor sincrone respectiv asincrone în corelare cu realitatea fizică în ceea ce privește relațiile care se stabilesc între parametri precum și ordinul de mărime al acestora(a se vedea figurile 3.3.1, 3.4.1 respectiv relațiile 3.10, 3.11, 3.45).
- Studiul stabilității și existenței soluției sistemelor de ecuații diferențiale care se obțin prin explicitarea scrierii matriciale a ecuațiilor mașinilor(a se vedea paginile 5-11).

4.Sistematizarea informațiilor legate de modalitățile de echivalare: mașină model-mașină reală(a se vedea paragraful 3.5).

5.Analiza și sistematizarea literaturii matematice de specialitate respectiv a resurselor existente până la ora actuală în domeniul soluționării sistemelor de ecuații diferențiale:

- Softuri de specialitate: Maple, Scientific Work Places, Mathematica.
- Metode numerice de soluționare(a se vedea pagina 8).
- Aplicarea diverselor posibilități de analiză a stabilității sistemelor de ecuații diferențiale, a condițiilor de existență a soluției, a erorilor de calcul care intervin și a reprezentărilor grafice ale soluției(a se vedea paragraful 3.2).

6.Analiza și sistematizarea metodelor de determinare a parametrilor acționărilor electrice cu mașini de curent alternativ sincrone și asincrone și aplicarea acestor metode pentru sistemele de acționare electrică cu mașinile sincronă și asincronă considerate în lucrare(vezi capitolele 4 și 5).

7.Aplicarea modelului matematic conceput de autor pentru simularea funcționării în regim tranzitoriu a acționărilor electrice cu mașini sincrone și asincrone(vezi capitolele 6 și 7):

- Funcționare la tensiune și frecvență constante:
  - Regimul tranzitoriu de pornire(a se vedea paragrafele 6.2.1 respectiv 7.2.1).
  - Regimul tranzitoriu datorat încărcării bruște de sarcină între diverse trepte de sarcină, studiindu-se și influența modificării momentului de inerție axial asupra procesului tranzitoriu(a se vedea paragrafele 6.2.2 respectiv 7.2.2).
  - Regimul tranzitoriu datorat descărcării bruște de sarcină între diverse trepte de sarcină, studiindu-se și influența modificării momentului de inerție axial asupra procesului tranzitoriu(a se vedea paragrafele 6.2.3 respectiv 7.2.3).

- Regimul tranzitoriu datorat încărcării bruște de sarcină la limita de stabilitate în funcționare cu modificarea momentului de inerție axial(vezi subparagrafele 6.2.2.5 respectiv 7.2.2.5).
- Regimul tranzitoriu datorat reversării din gol respectiv de la sarcina nominală a motorului sincron respectiv asincron(a se vedea subparagrafele 6.2.4 respectiv 7.2.4).
- Funcționare la tensiune și frecvență variabile:
  - Analiza și sistematizarea strategiilor de comandă și control vectorial(vezi subparagrafele 6.3.1 respectiv 7.3.1).
  - Aplicarea modelului matematic la flux statoric respectiv rotoric controlat în cazul încărcării bruște de sarcină(a se vedea paragrafele 6.3 respectiv 7.3).
    - ✓ Studiul modificării momentului de inerție axial al acționării asupra procesului tranzitoriu ca vârfuri de șoc, momentele de timp când apar acestea precum și ca durată a procesului tranzitoriu în întregime(vezi subparagrafele 6.3.2, 6.3.3, 7.3.2 respectiv 7.3.3).
    - ✓ Studiul modificării constantelor de timp ale reguletoarelor PI asupra procesului tranzitoriu ca durată și amplitudine a solicitărilor(ca vârfuri de șoc, momentele de timp când apar acestea precum și ca durată a procesului tranzitoriu în întregime) (vezi subparagrafele 6.3.4, 6.3.5, 7.3.4 respectiv 7.3.5).

8.Verificarea și validarea modelului matematic utilizat prin determinări experimentale cu ajutorul unui sistem de achiziție de date(a se vedea capitolul 8).

9.Desprinderea unor concluzii practice cu privire la solicitările electromagnetice care apar în diverse regimuri tranzitorii(dinamice) atât din punctul de vedere al vârfurilor de șoc respectiv al momentelor de timp și situațiilor când acestea apar, cât și din punctul de vedere al duratei proceselor tranzitorii, în vederea dimensionării corespunzătoare încă din fază de proiectare a mașinilor electrice cât și a unei exploatări corespunzătoare, în diverse aplicații(vezi paragrafele 6.4 respectiv 7.4).

10.Direcțiile de cercetare deschise de această lucrare de doctorat sunt importante, precum:

- Extinderea modelului matematic în vederea punerii în evidență a influenței fenomenului de saturație magnetică a miezului magnetic(direcție abordată de autor dar care nu a făcut obiectul acestei teze de doctorat).
- Completarea și adaptarea modelului matematic în vederea studiului regimurilor tranzitorii (dinamice) în acționările electrice cu mașini de curent alternativ sincrone și asincrone considerând regimul nesinusoidal(deformant) în alimentarea mașinilor de curent alternativ, regim care de fapt este regimul real de alimentare al acestora.
- Luarea în considerare a întregii complexități a proceselor care au loc într-o mașină electrică în regimuri dinamice cu referire, pe lângă procesele de natură electromagnetică prezentate în lucrarea de față, la alte procese precum: procese termice, procese mecanice(vibrații, oscilații, zgomot) și alte procese care întregesc complexitatea fenomenologică existentă într-un sistem de acționare electrică în regimuri dinamice.

## 10.BIBLIOGRAFIE

- [A1] Atanasiu, G. –Maşini electrice, Litografia U.T. Timișoara, 1994
- [A2] Adkins, B. –The general theory of electrical machines,  
John Wiley, New York , 1959
- [B1] Babescu, M. –Maşini electrice -Modelul ortogonal,  
Editura Politehnica Timișoara, 2000
- [B2] Babescu, M. –Maşini electrice -analiza matematică a regimurilor tranzitorii,  
Păunescu, D. Editura Politehnica Timișoara, 2001
- [B3] Babescu, M. –Maşina asincronă-modelare-identificare-simulare,  
Editura Politehnica Timișoara, 2002
- [B4] Babescu, M. –Maşina sincronă-modelare-identificare-simulare,  
Editura Politehnica Timișoara, 2003
- [B5] Babescu, M. –Maşini electrice-regimuri tranzitorii,  
Păunescu, D. Academia Română, Filiala Timișoara  
**Giurgiu, V.** 24-25 Mai 2001
- [B6] Babescu, M. –Short-circuit regime of asynchronous generator,  
Păunescu, D. Conf.Inter.Electroenergetică 4th , Proc.Power Systems VI,F1-2,  
**Giurgiu, V.** ISSN1582-7194, p.21-22, Timișoara, 2001
- [B7] Babescu, M. –Asynchronous generator,  
Păunescu, D. Proc.11th National Conference on Electric Drives,  
**Giurgiu, V.** p.328-331, 10-12 Oct. 2002,Galați  
Gozan, G.
- [B8] Babescu, M. –Electric machines,orthogonal model, transient regimes,  
Păunescu, D. Proc.11th National Conference on Electric Drives,  
**Giurgiu, V.** p.331-334, 10-12 Oct. 2002,Galați
- [B9] Babescu, M. –Catalogue data based calculation of torque - speed  
curves induction motors with rotor skin effect  
Bul.șt.I.P.Timișoara ,Tom 26 , F2, 1981, p 59-64
- [B10] Babescu, M. –Maşini electrice, Ed. Tehnică București, 1996
- [B11] Babescu, M. –Determination of the parameters of the orthogonal  
model in use in the theory of electrical machines,  
Bul.Șt.U.P.Timișoara ,Tom 42 , F2 , 1997 , p 39-47
- [B12] Babescu, M. –Generatoare electrice ,Ed. Politehnica,Timișoara ,1998
- [B13] Barbu, V. –Ecuatii diferențiale, Ed. Junimea, Iași 1985
- [B14] Boldea, I. –Analiza unitară a mașinilor electrice,  
Atanasiu ,G. Ed. Academiei RSR, București, 1983

- [B15] Boldea, I. –Parametrii mașinilor electrice,  
Ed. Academiei, București, 1991
- [B16] Boldea, I. –Unified treatment of core losses and saturation in the  
Nasar, S.A. orthogonal-axis model of electric machines,  
IEE Proceedings, Vol. 134, Pt.B, No. 6, November, 1987
- [B17] Boldea, I. –Transformatoare și mașini electrice, EDP, București, 1994
- [B18] Biriescu, M. –Mașini electrice rotative, Ed. de Vest, Timișoara, 1997
- [B19] Blondel, A. –Components de la theorie des alternateurs a deux reactions  
RGE, 12 203-205, 1922
- [B20] Barret, Ph. –Regimes transitoires des machines tournantes electriques,  
Ed.Eyrolles, Paris, 1982
- [B21] Brown, J.E. –A method of including the effects of main path saturation  
Kovacs, K.P. in the generalized equations of ac machines,  
Vas, P. IEE , 1983 , PAS-102 , (1) p. 96-103
- [B22] Bălă, C. –Mașini electrice, EDP, București, 1979
- [B23] Barton, T.H. –The generalized theory electric machines,  
Tutorial course –october 1985, Toronto, Canada
- [C1] Câmpeanu, A. –Mașini electrice - Probleme fundamentale,  
Ed. Scrisul Românesc, Craiova, 1988
- [C2] Câmpeanu, A. –Mașini în acționări electrice,  
Iancu, V. Editura Scrisul Românesc, Craiova, 1996
- [C3] Rădulescu, M. –Introducere în dinamica mașinilor electrice de curent  
Câmpeanu, A. alternativ, Ed. Academiei Române București, 1998
- [D1] Dordea, T. –Mașini electrice – EDP București , 1970
- [D2] Dordea, T. –Proiectarea și construcția mașinilor electrice ,  
Litografia U.P. Timișoara, 1981
- [D3] Dordea, T. –La theorie des deux axes pour les machines electriques  
a enroulement repartis par zones, Rev. Roum. Sci. Techn.  
Electrotechn. et Energ., 38, Bucharest, 1993, p. 235-255
- [D4] Dordea, T. –Beitrag zur Zweiachsentheorie der elektrischen  
Maschinen ,Archiv fur  
Elektrotechnik, 50, 6, 362 – 371 (1966)
- [D5] Drăgănescu, O. –Încercările mașinilor electrice rotative,  
Ed.Tehnică București, 1987

- [D6] Davidovici, I. –Parametrii mașinilor electrice de curent alternativ,  
Ed.Tehnică București, 1968
- [D7] De Sabata, I. –Bazele electrotehnicii (vol 1 și 2 ),  
Litografia IPT, Timișoara, 1980
- [D8] De Melo, P. –Validation of synchronus machine models derivation  
Hannet, H. of model parametrs from tests, IEE,Trans., p.100,2, 1981
- [F1] Feete, M. –Modeling of syncronus machines for stability studies,  
Univ.of Paderborn, Dept. of el.eng., 1995
- [F2] Fransua, A. –Mașini și sisteme de acționări electrice,  
Ed.Tehnică București, 1978
- [H1] Halanay, A. –Teoria calitativă a ecuațiilor diferențiale,  
Ed.Academiei RPR, București, 1963
- [I1] Ionică, T. –Overvoltages Study on Transformer Turn Of,  
Băjan, L. Conf.Inter.Electroenergetică 5th , Proc.Power Systems  
Svoboda, M. Tom48(62),F1-2, ISSN1582-7194, p.283-286,  
Giurgiu, V. Timișoara, 6-7Nov, 2003
- [I2] Ixaru, L. Gr. –Numerical Methods for Differential Equations and  
Applications, Ed.Academiei Bucharest, D. Reidel  
Publishing Company, 1984
- [J1] Jerve, G. –Încercările mașinilor electrice rotative,  
Ed.Tehnică, București, 1972
- [K1] Kelemen, A. –Sisteme de reglare cu orientare după câmp ale mașinilor  
Imecs, M. de curent alternativ, Ed.Academiei București, 1989
- [K2] Kelemen, A. –Acționări electrice, EDP, București, 1979
- [K3] Kovaks, P. –Analiza regimurilor tranzitorii la mașinile electrice,  
Ed.Tehnică, București, 1980
- [L1] Leonard, W. –Control of electrical drives, Springer-Verlag, Berlin, 1985
- [L2] Levi, E. –Field – oriented control of induction machines  
in the presence magnetic saturation, EMPS, 16, 1989
- [L3] Lipo, T. –State-variable steady-state analysis of a Cornell,  
E controlled curent induction motor drive,  
IEEE, Trans IA, 16.1975
- [L4] Leonard, W. –Adjustable-speed a.c. drives,  
Proc.IEEE, Vol. 76 nr.4, 04(1988)



- [M1] Moszyński, K. –Metode numerice de rezolvare a ecuațiilor diferențiale ordinare, Ed. Tehnică, București 1973
- [M2] Manolea, Gh. –Acționări electromecanice -Tehnici de analiză teoretică și experimentală, Ed. Universitatea Craiova, 2003
- [M3] Manolea, Gh. –Sisteme automate de acționare electromecanică, Ed. Universitatea Craiova, 2004
- [N1] Nasar, SA. –Electric machines-dinamic and control, Boldea, I. CRC Press, Inc.USA, 1993
- [N2] Novac, I. –Mașini electrice, Litografia IPT, Timișoara, 1975
- [N3] Năslău, P. –Metode numerice, Ed. Politehnica, Timișoara, 1998
- [N4] Nicolaide, A. –Mașini electrice, Ed.Scrisul Românesc, Craiova, 1975
- [N5] Nedelcu, V. –Teoria conversiei electromecanice, Ed.Tehnică București, 1982
- [N6] Novac, I.. –Mașini și acționări electrice, EDP, București, 1980 Babescu, M.
- [O1] Olariu, V. –Ecuații diferențiale și cu derivate parțiale, Stănășilă, T. Ed. Tehnică, București 1982
- [O2] Ong, C.M. –Dynamic Simulation of electric machines, Prentice Hall PTR, New Jersey 07458, 1998
- [P1] Park, R.H. –Two reaction theory of synchronus machines, (I +II) Trans, A, IEE 48, 716,727(1929) and 52 (1933)
- [P2] Petcu, D. –MAPLE, un standard pentru matematică cu ajutorul calculatorului, Tip. Univ.de Vest, Timișoara, 1997
- [P3] Philippov, A. –Recueil de problèmes d'équations différentielles, Editions MIR, Moscou 1976
- [R1] Richter, R. –Mașini electrice, vol I, II, III, IV, Ed.Tehnică, București, 1959
- [R2] Rus, Ioan A –Ecuații diferențiale, EDP, București 1982 Pavel, P.
- [R3] Rădulescu, M. –Analiza numerică a câmpului electromagnetic, Mândru, Gh Ed. Dacia Cluj-Napoca, 1986
- [S1] Seracin, E. –Tehnică acționărilor electrice, Popovici, D. Ed.Tehnică, București, 1985
- [S2] Stepanov, V.V. –Curs de ecuații diferențiale, Ed. Tehnică, București 1955
- [S3] Stepina, I. –Raunzeiger als grundlage der theorie der elektrischen maschinen, ETZ, A, Bd.88, 1967, H3

- [S4] Şora, C. –Bazele electrotehnicii – EDP Bucureşti, 1982
- [S5] Şora, I. –Micromotorul cu poli ecranati,  
Babescu, M. Ed. Tehnică, Bucureşti, 1979
- [S6] Seracin, E. –Utilajul electromecanic al întreprinderilor industriale,  
EDP Bucureşti 1973
- [S7] Seracin, E. –Acţionări electrice, Litografia IPT, vol I, 1980
- [S8] Seracin, E. –Acţionări electrice, Litografia IPT, vol II, 1980
- [S9] Seracin, E. –Acţionări electrice, IP Traian Vuia Timişoara, 1980
- [S10] Seracin, E. –Beitrag zur optimalen Berechnung der Hauptdaten  
elektrischer Antriebe.ELEKTRIE, 50, 9/10/11,  
Berlin, 1996
- [T1] Thaler, G. –Electric machines dynamics and steady state,  
John Wiley, New York, 1966
- [T2] Takeda, Y. –Determination of synchronous machine parameters  
Adkins, B allowing for unequal mutual inductances,  
Proc.IEE, 121, 1974, p1501-1504
- [T3] Toulomi, O. –Synchronous machine parameter identification,  
Multitude scale tehniue, vol 30/06/1994
- [T4] Tunsoiu, Gh. –Acţionări electrice, EDP Bucureşti, 1982  
Seracin, E.  
Saal, C.
- [V1] Viorel, I.A. –On the parameter identification of induction motor,  
Hedeş, C. HC. Electromotion 1997, Cluj-Napoca p 138-142  
Ciorba, R.
- [W1] White, D.C. –Electromechanical energy conversion,  
Woodson, A.N. John Wiley, New York, 1959
- [Y1] Yamamura, S. –A.c. motors for high performance applications,  
Marcel Dekker, New York, 1986

## 11.ANEXE

A

## A1.Rezistența înfășurării statorice și a înfășurării de excitație.

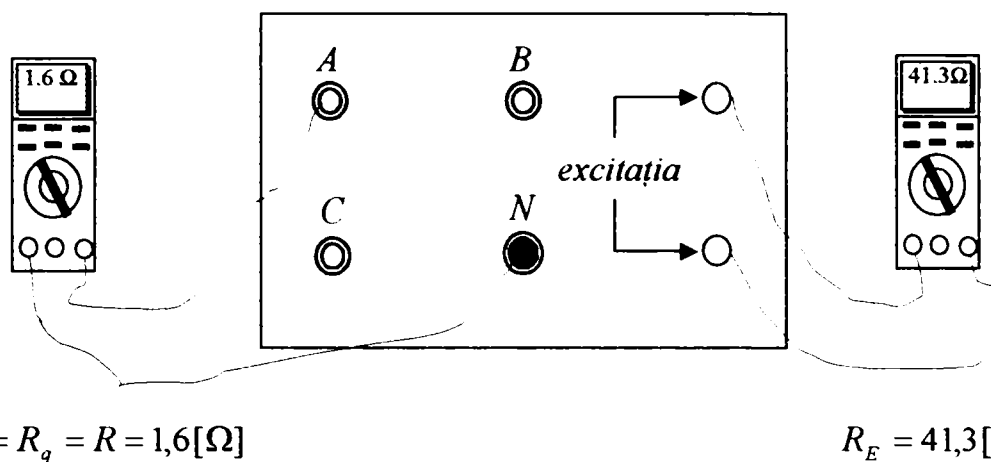


Fig.A1.1.Măsurarea directă a rezistenței înfășurării statorice și a înfășurării de excitație[B1, B4].

## A2.Inductanțele proprii ale înfășurării statorice și a înfășurării de excitație.

Considerând cazul general al unei înfășurări de rezistență  $R$  și inductanță  $L$  parcursă de un curent  $i$ , în vederea determinării inductanței proprii prin metoda stingerii curentului[B1, B4], se folosește montajul:

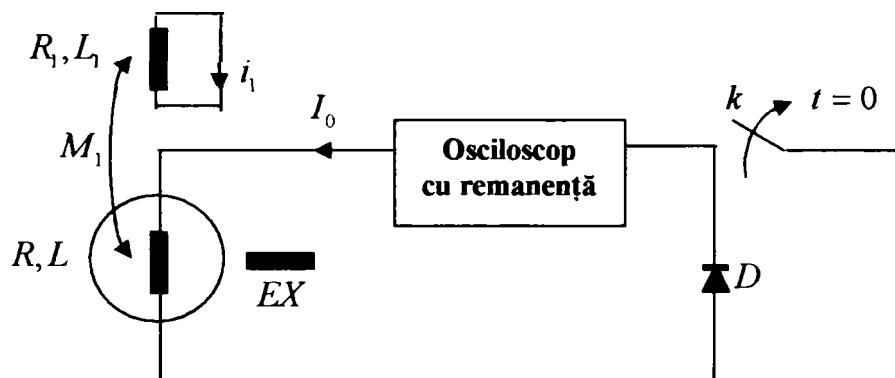


Fig.A2.1.Determinarea inductanței proprii.

Ecuția pentru circuitul cu parametrii  $R, L$  se scrie sub forma:

$$Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + M \frac{di_1(t)}{dt} = 0 \quad (\text{a.1})$$

și prin integrare se obține:

$$\int_0^{\infty} Ri(t)dt + \underbrace{Li(t)|_0^{\infty}}_{-LI_0} + \underbrace{Mi_1(t)|_0^{\infty}}_0 = 0 \Rightarrow L = \frac{R \int_0^{\infty} i(t)dt}{I_0} \quad (\text{a.2})$$

La deschiderea întrerupătorului  $k$ , curentul care parcurge înfășurarea se stinge ca în figura A.2.2.

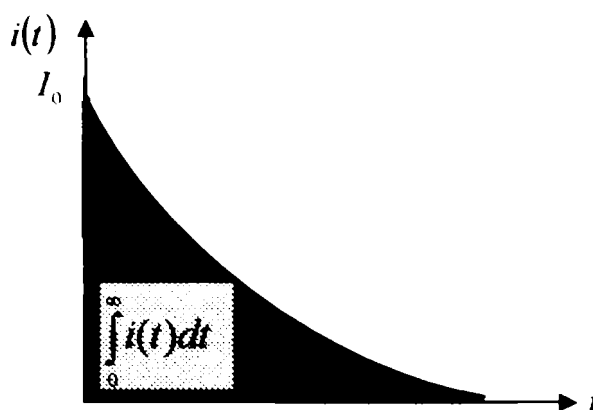


Fig. A2.2. Determinarea inductanței proprii prin metoda stingerii curentului.

Precizare:

Înfășurarea cu parametrii  $R_1, L_1$ , cuplată magnetic cu înfășurarea la care se face referire nu influențează valoarea inductanței proprii.

### A2.1. Inductanțele proprii $L_d$ și $L_q$ ale înfășurării statorice.

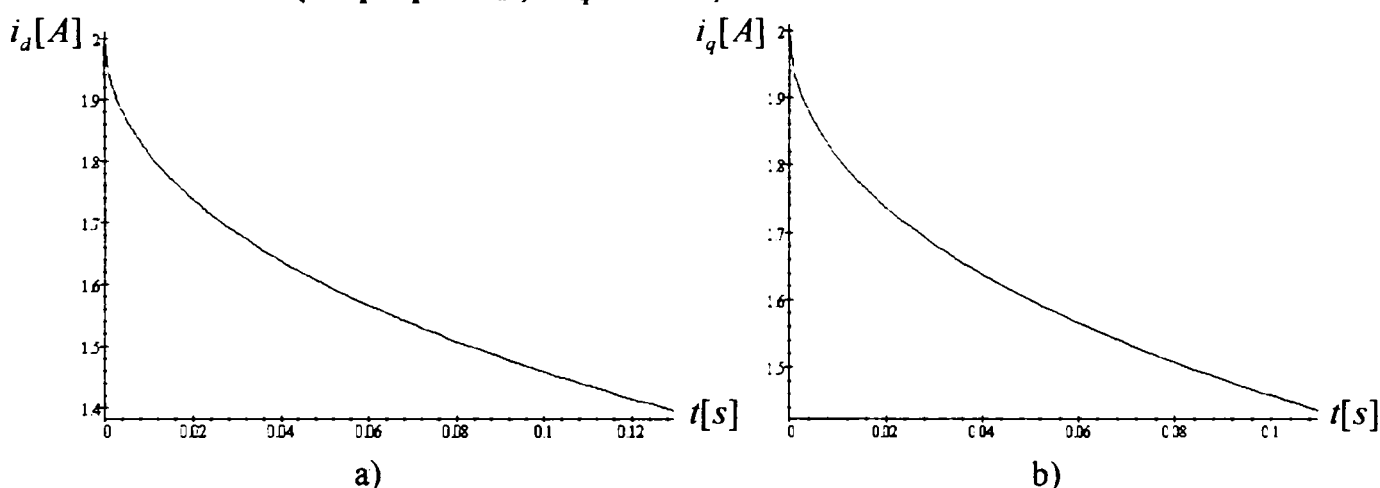


Fig. A2.3. Determinarea inductanțelor proprii ale înfășurărilor statorice.

a) inductanța proprie  $L_d$  ; b) inductanța proprie  $L_q$

$$L_d = \frac{R_d \int_0^{0.14} i_d(t) dt}{I_0} = \frac{1,6 \cdot 0,102599}{2} = 0,08[H]; L_q = \frac{R_d \int_0^{0.12} i_q(t) dt}{I_0} = \frac{1,6 \cdot 0,088453}{2} = 0,07[H] \quad (a.3)$$

### A2.2. Inductanța proprie $L_E$ a înfășurării de excitație.

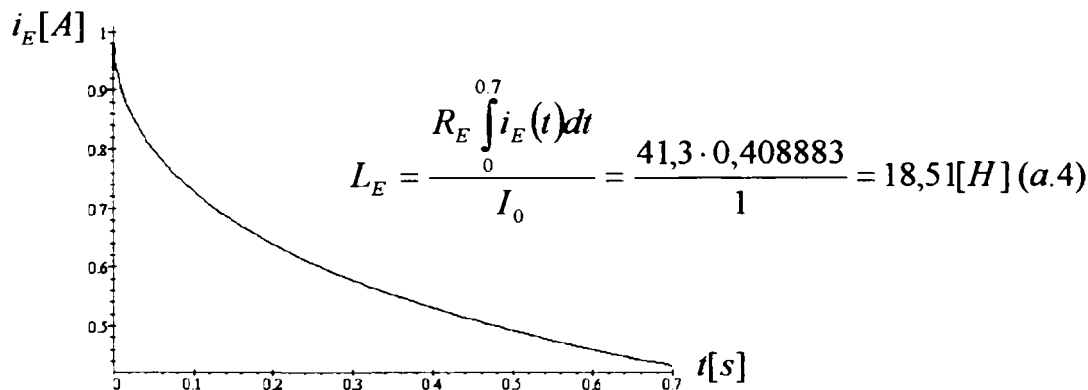


Fig. A2.4. Determinarea inductanței proprii a înfășurării de excitație.

## B

**B1. Calculul reluctanței magnetice.**

Se calculează reluctanța magnetică a circuitului magnetic prezentat în figura B1.1, cu relațiile:

$$R_m = R_{m1} + 2R_{m2} + R_{m3}; \Phi \cdot R_m = N \cdot I; R_m = \frac{N \cdot I}{\Phi} \quad (\text{b.1})$$

unde:  $R_{m1}, R_{m2}$  și  $R_{m3}$  sunt reluctanțele magnetice ale rotorului, întrefierului și statorului.

Circuitul magnetic al rotorului și statorului fiind realizat din material feromagnetic cu permeabilitate de ordinul  $10^3$ , reluctanțele  $R_{m1}$  și  $R_{m3}$  se neglijează. Reluctanța magnetică  $R_{m2}$  se calculează analizând figura B1.1.

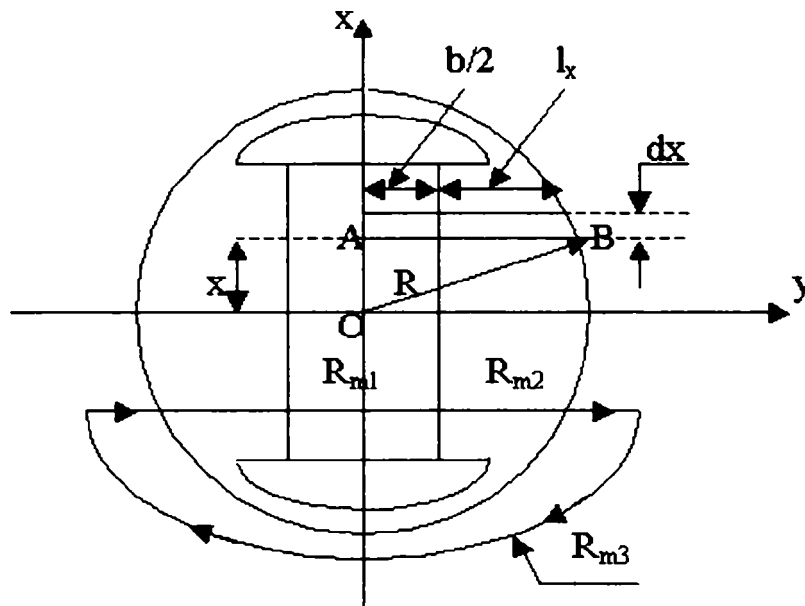


Fig B1.1. Explicativă privind calcularea reluctanței magnetice  $R_{m2}$ .

Pentru circuitul magnetic din figura B1.1, legea circuitului magnetic la  $\mu_{Fe} \rightarrow \infty$  se scrie sub forma:

$$\begin{aligned} \oint_{\Gamma} \vec{H} \cdot d\vec{l} &= N \cdot I \\ 2H_x \cdot l_x &= N \cdot I \\ \frac{B_x}{\mu_0} 2l_x &= N \cdot I \\ B_x &= \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{2l_x} \end{aligned} \quad (\text{b.2})$$

Aplicând teorema lui Pitagora în triunghiul OAB din figura B1.1, rezultă:

$$l_x = \sqrt{R^2 - x^2} - \frac{b}{2}, \quad (\text{b.3})$$

iar inducția magnetică va avea expresia:

$$B_x = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{2 \left( \sqrt{R^2 - x^2} - \frac{b}{2} \right)}. \quad (\text{b.4})$$

**B2.Determinarea expresiei fluxului magnetic.**

Fluxul magnetic  $\Phi$  este definit de relația:

$$\int_{S_r} \vec{B} \cdot \vec{ds} = \Phi, \quad (\text{b.5})$$

unde:  $ds = l_{MS} \cdot dx$ .

Derivând expresia fluxului rezultă:

$$d\Phi = B_x \cdot l_{MS} \cdot dx,$$

$$\Phi = 2 \int_0^a B_x l_{MS} dx = 2 l_{MS} \int_0^a \frac{\mu_0 N I}{2 \left( \sqrt{R^2 - x^2} - \frac{b}{2} \right)} dx = \mu_0 \cdot N \cdot I \cdot l_{MS} \int_0^a \frac{dx}{\sqrt{R^2 - x^2} - \frac{b}{2}}. \quad (\text{b.6})$$

Notăm cu  $I_{12} = \int_0^a \frac{dx}{\sqrt{R^2 - x^2} - \frac{b}{2}}$  și calculăm integrala făcând substituția:

$$x = R \sin \alpha,$$

$$dx = R \cos \alpha \cdot d\alpha,$$

$$x = 0 \Rightarrow \alpha_1 = 0,$$

$$x = a \Rightarrow \alpha_2 = \arcsin \frac{a}{R}. \quad (\text{b.7})$$

Fără limitele de integrare, integrala devine:

$$I_{12} = \int \frac{R \cos \alpha}{R \cos \alpha - \frac{b}{2}} d\alpha, \quad (\text{b.8})$$

În relația (b.8)  $\cos \alpha$  se exprimă în funcție de tangenta unghiului pe jumătate, astfel:

$$\cos \alpha = \frac{1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}} = \frac{1 - t^2}{1 + t^2} \quad (\text{b.9})$$

În relația (b.9) s-a făcut substituția:

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = t$$

$$\alpha = 2 \arctg t \quad (\text{b.10})$$

$$d\alpha = \frac{2}{1+t^2} dt,$$

Cu substituțiile (b.9) și (b.10) integrala se poate scrie:

$$I_{12} = \int \frac{R \cdot \frac{1-t^2}{1+t^2}}{R \cdot \frac{1-t^2}{1+t^2} - \frac{b}{2}} \cdot \frac{2 \cdot dt}{1+t^2} = 2 \int \frac{1-t^2}{\left( \frac{1-t^2}{1+t^2} - \frac{b}{2R} \right) (1+t^2)^2} dt =$$

$$= 2 \int \frac{1-t^2}{\frac{2R(1-t^2)-b(1+t^2)}{2R(1+t^2)}(1+t^2)^2} dt = 4R \int \frac{1-t^2}{(1+t^2)[(2R-b)-(2R+b)t^2]} dt. \quad (b.11)$$

Expresia de sub integrală (b.11) se poate scrie sub forma:

$$\begin{aligned} & \frac{1-t^2}{[2R-b-(2R+b)t^2](1+t^2)} = \frac{1-t^2}{(2R+b)\left(\frac{2R-b}{2R+b}-t^2\right)(1+t^2)} = \\ & = \frac{1}{2R+b} \cdot \frac{t^2-1}{\left(t-\sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}}\right)\left(t+\sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}}\right)(1+t^2)} = \\ & = \frac{1}{2R+b} \left[ \frac{A}{t-\sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}}} + \frac{B}{t+\sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}}} + \frac{C+D \cdot t}{1+t^2} \right] \end{aligned} \quad (b.12)$$

În expresia (b.12) aducând la același numitor în paranteză și utilizând metoda identificării coeficienților, rezultă:

$$\begin{aligned} t^2-1 &= \left( At + A\sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}} \right) (1+t^2) + \left( Bt - B\sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}} \right) (1+t^2) + \left( t^2 - \frac{2R-b}{2R+b} \right) (C+Dt) \\ &= At + At^3 + A \cdot \sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}} + At^2 \cdot \sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}} + Bt + Bt^3 - B \cdot \sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}} - \\ & - Bt^2 \cdot \sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}} + Ct^2 + Dt^3 - C \frac{2R-b}{2R+b} - Dt \frac{2R-b}{2R+b} \end{aligned} \quad (b.13)$$

În relația (b.13) grupând convenabil termenii rezultă următorul sistem de ecuații:

$$\begin{cases} A+B+D=0 \\ A \cdot \sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}} - B \cdot \sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}} + C = 1 \\ A+B-D \frac{2R-b}{2R+b} = 0 \\ A \cdot \sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}} - B \cdot \sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}} - C \cdot \frac{2R-b}{2R+b} = -1 \end{cases} \quad (b.14)$$

Din cea de-a treia ecuație a sistemului (b.14) rezultă relația:

$$A+B = D \frac{2R-b}{2R+b} \quad (b.15)$$

care introdusă în prima ecuație a sistemului (b.14) conduce la:

$$D \frac{2R-b}{2R+b} + D = 0, \text{ adică } D = 0, \quad (b.16)$$

Se formează astfel următorul sistem de ecuații:

$$\begin{cases} A + B = 0 \Rightarrow A = -B \\ 2A \cdot \sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}} + C = 1 \\ 2A \cdot \sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}} - C \frac{2R-b}{2R+b} = -1 \end{cases} \cdot (-1) \quad (b.17)$$

din care rezultă: 
$$C = \frac{2R+b}{2R} \quad (b.18)$$

Introducem relația (b.18) în cea de-a treia ecuație a sistemului (b.17) și avem:

$$\begin{aligned} 2A \cdot \sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}} - \frac{2R+b}{2R} \cdot \frac{2R-b}{2R+b} &= -1 \\ 2A \cdot \sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}} - 1 + \frac{b}{2R} &= -1 \\ A &= \frac{-b}{4R \cdot \sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}}} \end{aligned} \quad (b.19)$$

Cum:  $A = -B$ , rezultă:

$$B = \frac{b}{4R \cdot \sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}}} \quad (b.20)$$

Cu expresiile constantelor  $A, B, C, D$ , astfel determinate, integrala (b.11) devine:

$$\begin{aligned} I_{1,2} &= \frac{4R}{2R+b} \int \left( -\frac{b}{4R \cdot \sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}}} \cdot \frac{1}{t - \sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}}} + \frac{b}{4R \cdot \sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}}} \cdot \frac{1}{t + \sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}}} + \frac{2R+b}{2R} \cdot \frac{1}{1+t^2} \right) dt = \\ &= \frac{b}{\sqrt{4R^2 - b^2}} \left( \int \frac{dt}{t + \sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}}} - \int \frac{dt}{t - \sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}}} \right) + 2 \int \frac{dt}{1+t^2} = \\ &= \frac{b}{\sqrt{4R^2 - b^2}} \ln \left| \frac{t + \sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}}}{t - \sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}}} \right| + 2 \operatorname{arctgt} = \\ &= \alpha + \frac{b}{\sqrt{4R^2 - b^2}} \ln \left| \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}}}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - \sqrt{\frac{2R-b}{2R+b}}} \right| \end{aligned} \quad (b.21)$$



Din substituția făcută:

$$x = R \sin \alpha \Rightarrow \alpha = \arcsin \frac{x}{R} \Rightarrow$$

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{1 - \sin^2 \frac{\alpha}{2}}} = \frac{\sin \left( \frac{1}{2} \arcsin \frac{x}{R} \right)}{\sqrt{1 - \sin^2 \left( \frac{1}{2} \arcsin \frac{x}{R} \right)}} = \frac{\frac{x}{2R}}{\sqrt{1 - \left( \frac{x}{2R} \right)^2}} = \frac{x}{\sqrt{4R^2 - x^2}}. \quad (\text{b.22})$$

Cu relația (b.22) integrala devine:

$$I_{12} = \arcsin \frac{x}{R} + \frac{b}{\sqrt{4R^2 - b^2}} \ln \left| \frac{\frac{x}{\sqrt{4R^2 - x^2}} + \sqrt{\frac{2R - b}{2R + b}}}{\frac{x}{\sqrt{4R^2 - x^2}} - \sqrt{\frac{2R - b}{2R + b}}} \right|, \quad (\text{b.23})$$

Ținând cont de limitele de integrare  $x = 0$  și  $x = a$ , avem:

$$I_{12} = \arcsin \frac{a}{R} + \frac{b}{\sqrt{4R^2 - b^2}} \ln \left| \frac{\frac{a}{\sqrt{4R^2 - a^2}} + \sqrt{\frac{2R - b}{2R + b}}}{\frac{a}{\sqrt{4R^2 - a^2}} - \sqrt{\frac{2R - b}{2R + b}}} \right|, \quad (\text{b.24})$$

Introducând relația (b.24) în expresia fluxului magnetic (b.6), rezultă:

$$\Phi = \mu_0 N I I_{MS} \cdot \left[ \arcsin \frac{a}{R} + \frac{b}{\sqrt{4R^2 - b^2}} \ln \left| \frac{\frac{a}{\sqrt{4R^2 - a^2}} + \sqrt{\frac{2R - b}{2R + b}}}{\frac{a}{\sqrt{4R^2 - a^2}} - \sqrt{\frac{2R - b}{2R + b}}} \right| \right] \quad (\text{b.25})$$

Inductanța înfășurării de amortizare se deduce din relațiile:

$$\begin{aligned} \Phi \cdot R_{m2} &= N \cdot I, \\ R_{m2} &= \frac{N \cdot I}{\Phi}, \\ L_{\varnothing} &= \frac{N^2}{R_{m2}}. \end{aligned} \quad (\text{b.26})$$

C

## C1.Rezistența înfășurării statorice.

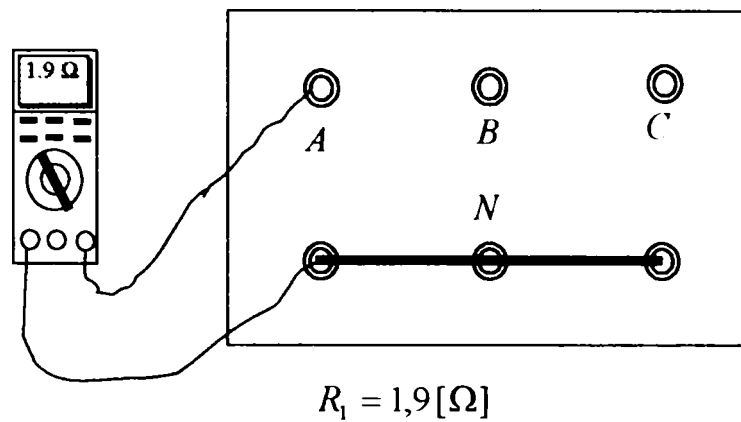


Fig.C1.1.Măsurarea directă a rezistenței înfășurării statorice[B1, B3].

**D**

**D.Determinarea parametrilor rotorului echivalent.**

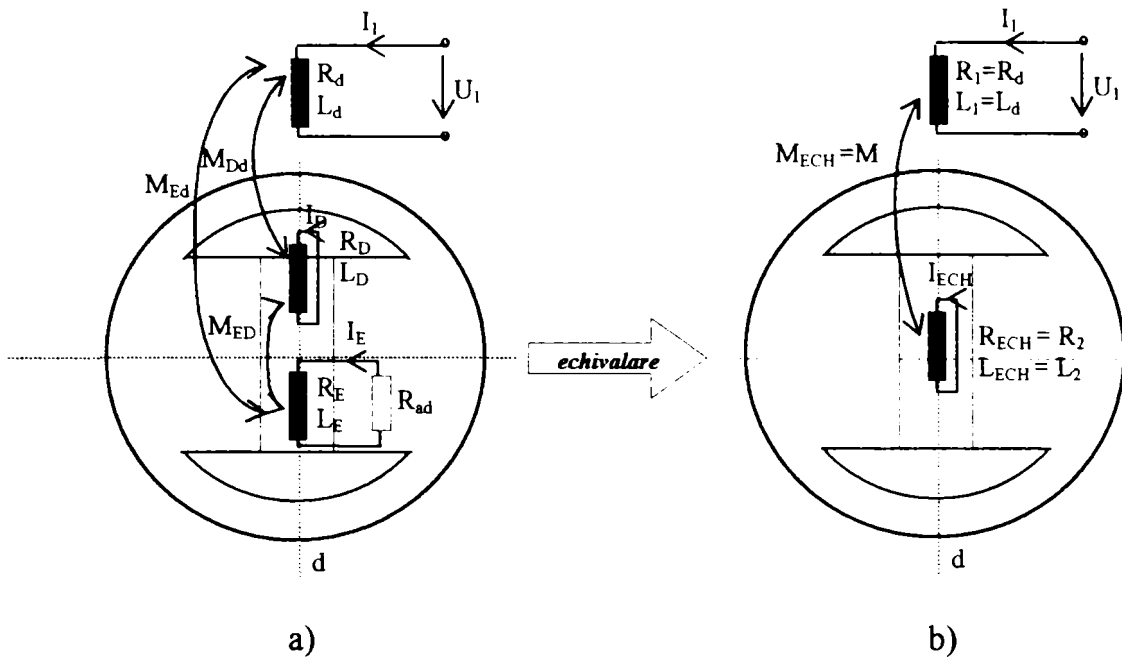


Fig.D.1.Echivalarea rotorului motorului sincron.

În cazul pornirii în asincron a motorului sincron, când excitația este scurtcircuitată printr-o rezistență adițională,  $R_{ad} = 10R_E$  (a se vedea figura D.1.a), schema electrică echivalentă este următoarea:

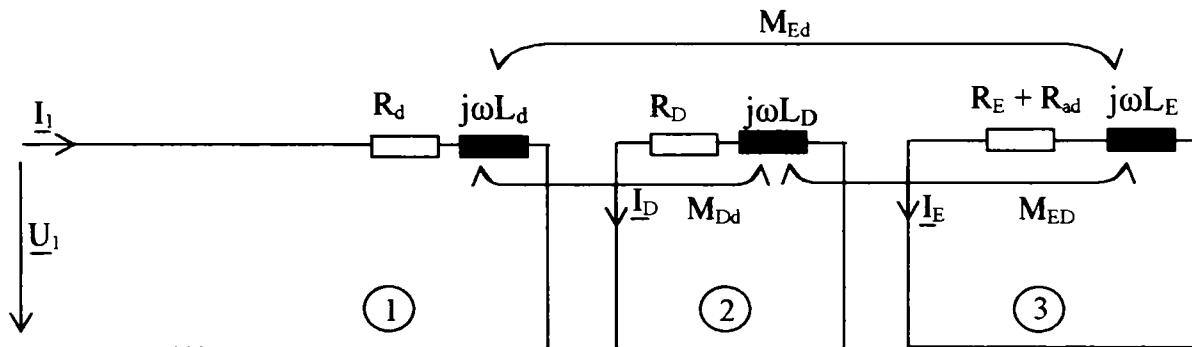


Fig.D.2.Schema electrică de calcul, cu excitația în scurtcircuit.

Pentru circuitele 1,2 și 3 se pot scrie ecuațiile:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{I}_1(R_d + j\omega L_d) - j\omega M_{Dd}\underline{I}_2 - j\omega M_{dE}\underline{I}_E \\ 0 = (R_D + j\omega L_D)\underline{I}_2 + j\omega M_{ED}\underline{I}_E - j\omega M_{Dd}\underline{I}_1 \\ 0 = (R_E + R_{ad} + j\omega L_E)\underline{I}_E + j\omega M_{ED}\underline{I}_2 - j\omega M_{dE}\underline{I}_1 \end{cases} \quad (d.1)$$

și se obțin curenții  $\underline{I}_2$  și  $\underline{I}_E$  în funcție de curentul  $\underline{I}_1$ :

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{I}_1 [j\omega M_{Dd}R_E + \omega^2(-M_{Dd}L_E + M_{ED}M_{dE})]}{(R_E + R_{ad})R_D + \omega^2(M_{ED}^2 - L_E L_D) + j\omega(L_E R_D + L_D(R_E + R_{ad}))} \quad (d.2)$$

$$\underline{I}_E = \frac{\underline{I}_1 [j\omega M_{dE} R_D + \omega^2 (-M_{Ed} L_D + M_{ED} M_{Dd})]}{(R_E + R_{ad}) R_D + \omega^2 (M_{ED}^2 - L_E L_D) + j\omega (L_E R_D + L_D (R_E + R_{ad}))} \quad (d.3)$$

Impedanța circuitului alimentat la tensiunea  $\underline{U}_1$  este:

$$\underline{Z}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} = \frac{R_d (R_E + R_{ad}) R_D + \omega^2 (M_{ED}^2 R_d + M_{dE}^2 R_D + M_{Dd}^2 (R_E + R_{ad}) - L_E L_D R_d - L_E L_d R_D - L_D L_d (R_E + R_{ad})) + j\omega [L_E R_D R_d + L_D (R_E + R_{ad}) R_d + L_d (R_E + R_{ad}) R_D + \omega^2 (M_{ED}^2 - L_E L_D)]}{(R_E + R_{ad}) R_D + \omega^2 (M_{ED}^2 - L_E L_D) + j\omega (L_E R_D + L_D (R_E + R_{ad}))} + \frac{\omega^2 (M_{ED}^2 L_d + M_{Dd}^2 L_E + M_{dE}^2 L_D - L_E L_D L_d - 2M_{ED} M_{dE} M_{Dd})}{j\omega (L_E R_D + L_D (R_E + R_{ad}))} \quad (d.4)$$

și se poate aduce la forma:

$$\underline{Z}_1 = R_1^* + j\omega L_1^* \quad (d.5)$$

unde  $R_1^*$ ,  $L_1^*$  sunt cunoscuți prin intermediul parametrilor mașinii sincrone determinați în prealabil în capitolul 4.

Corespunzător figurii D.1 b, se prezintă următoarea schemă electrică echivalentă:

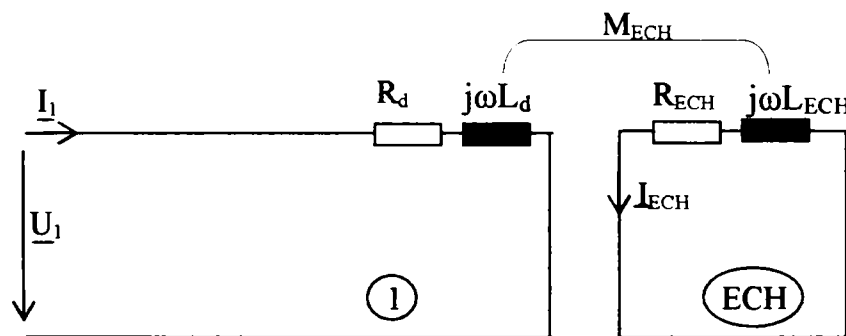


Fig.D.3. Schema electrică echivalentă celei din fig.D.2.

Pentru circuitele 1 și ECH se pot scrie ecuațiile:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{I}_1 (R_d + j\omega L_d) - j\omega M_{ECH} \underline{I}_{ECH} \\ 0 = (R_{ECH} + j\omega L_{ECH}) \underline{I}_{ECH} - j\omega M_{ECH} \underline{I}_1 \end{cases} \quad (d.6)$$

de unde, cu  $\underline{I}_{ECH}$  din cea de-a doua ecuație înlocuit în prima ecuație, rezultă:

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_{1ECH} \quad (d.7)$$

unde

$$\underline{Z}_{1ECH} = R_1^{**} + j\omega L_1^{**} \quad (d.8)$$

Din condiția

$$\underline{Z}_{1ECH} = R_1^{**} + j\omega L_1^{**} = \underline{Z}_1 = R_1^* + j\omega L_1^* \quad (d.9)$$

rezultă că prin identificarea părților reale și imaginare și prin egalarea lor, se obțin primele două ecuații, în vederea determinării parametrilor motorului sincron la pornire în asincron, și anume:

$$\begin{cases} R_1^* = R_1^{**} \\ L_1^* = L_1^{**} \end{cases} \quad (d.10)$$

Pentru că avem două ecuații cu trei necunoscute:  $R_{ECH}$ ,  $L_{ECH}$  și  $M_{ECH}$ , mai este nevoie de încă o legătură independentă între parametrii motorului sincron la sincronism și parametrii motorului sincron în regimul de pornire, în asincron(cei trei enumerați mai sus).

A treia ecuație independentă rezultă din condiția de egalitate a puterii active în rotor, în condițiile în care, așa cum sa poate observa din schemele electrice, puterea activă în stator este aceeași în ambele situații(s-a lucrat la același  $\underline{U}_1$  și  $\underline{I}_1$ ):

$$R_D \cdot I_2^2 + (R_E + R_{ad})I_E^2 = R_{ECH} I_{ECH}^2 \quad (d.11)$$

Pe baza celor trei ecuații din relațiile (d.10,d.11), se poate scrie următorul sistem de ecuații:

$$\begin{cases} R_1^* = R_1^{**} \\ L_1^* = L_1^{**} \\ R_D \cdot I_2^2 + (R_E + R_{ad})I_E^2 = R_{ECH} I_{ECH}^2 \end{cases} \quad (d.12)$$

unde curentul echivalent  $\underline{I}_{ECH}$  este(din cea de-a doua ecuație din d.6):

$$\underline{I}_{ECH} = \frac{j\omega M_{ECH} \underline{I}_1}{R_{ECH} + j\omega L_{ECH}} \quad (d.13)$$

sau în modul:

$$I_{ECH} = |\underline{I}_1| \frac{\omega M_{ECH}}{\sqrt{R_{ECH}^2 + (\omega L_{ECH})^2}} \quad (d.14)$$

Pe baza scrierii literale(d.12) a sistemului de ecuații algebrice, în vederea determinării parametrilor rotorici pentru regimul de pornire, se rezolvă următorul sistem de trei ecuații cu trei necunoscute:

$$\begin{cases} 0,8 \cdot \frac{2R_{ECH}^2 + 123245R_{ECH}M_{ECH}^2 + 197192L_{ECH}^2}{R_{ECH}^2 + 98596L_{ECH}^2} = 3,6846 \\ 25,12 \cdot \frac{R_{ECH}^2 + 98596L_{ECH}^2 - 1232450L_{ECH}M_{ECH}^2}{R_{ECH}^2 + 98596L_{ECH}^2} = 2,5935 \\ 7.952 \cdot 0,345^2 + (41.3 + 413) \cdot 0,02897^2 = R_{ECH} \cdot \frac{98596M_{ECH}^2}{R_{ECH}^2 + 98596L_{ECH}^2} \end{cases} \quad (d.15)$$

Se obține următoarea soluție:

$$\begin{cases} R_{ECH} = R_2 = 1,5662[\Omega] \\ L_{ECH} = L_2 = 0,0539[\Omega] \\ M_{ECH} = M = 0,06245[\Omega] \end{cases} \quad (d.16)$$

care verifică condiția:

$$M^2 = 0,0039 < L_1 L_2 = 0,08 \cdot 0,0539 = 0,004312 \quad (d.17)$$

Coefficientul global de dispersie este:

$$\sigma = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 L_2} = \frac{0,004312 - 0,0039}{0,004312} = 0,09556 \quad (d.18)$$