

DETERMINAREA PARAMETRILOR ȘI CARACTERISTICILOR MAȘINILOR ELECTRICE DE INDUCȚIE PRIN MĂSURAREA VALORILOR MOMENTANE

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea "Politehnica" din Timișoara
în domeniul INGINERIE ELECTRICĂ
de către

Ing. Marțian Moț

Conducător științific:
Referenți științifici:

acad. Toma Dordea
prof.dr.ing. Aurel Câmpeanu
prof.dr.ing. Radu Munteanu
prof.dr.ing. Marius Biriescu

Ziua susținerii tezei: 28.10.2008

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|------------------------|---|
| 1. Automatică | 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații |
| 2. Chimie | 8. Inginerie Industrială |
| 3. Energetică | 9. Inginerie Mecanică |
| 4. Ingineria Chimică | 10. Știința Calculatoarelor |
| 5. Inginerie Civilă | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 6. Inginerie Electrică | |

Universitatea „Politehnica” din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2008

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221
e-mail: editura@edipol.upt.ro

Cuvânt înainte

Lucrarea de față reprezintă o sinteză a activității de cercetare aplicativă desfășurată de autor în domeniul testării mașinilor electrice de curent alternativ. În acest domeniu, ca și în multe altele, problemele sunt reconsiderate prin prisma dezvoltării actuale a tehnicii de calcul.

Performanțele impresionante ale computerelor actuale – în special viteza de calcul – împreună cu suportul software scris în limbaje de programare performante, au condus în ultimul timp la realizarea unor instrumente de lucru eficiente pentru proiectarea, analiza, comanda, dar și pentru măsurătorile experimentale efectuate asupra mașinilor electrice. Această informatizare completă a permis un salt calitativ important în aceste domenii, obținându-se o precizie remarcabilă în evaluarea și controlul fenomenelor fizice ce au loc în mașina electrică.

Obiectivul principal al lucrării îl constituie implementarea unor metode de determinare experimentală a parametrilor și caracteristicilor mașinilor electrice de curent alternativ prin înregistrarea mărimilor variabile în timp. Pornindu-se de la acest obiectiv, au fost dezvoltate două sisteme computerizate pentru achiziții de date împreună cu pachetele software de analiză și prelucrare a datelor.

Lucrarea prezintă de asemenea câteva exemple de utilizare a celor două sisteme de achiziție în determinarea experimentală a performanțelor unor mașini electrice de mare putere.

Autorul

Moț, Marțian

Determinarea parametrilor și caracteristicilor mașinilor electrice de inducție prin măsurarea valorilor momentane

Teze de doctorat ale UPT, Seria 6, Nr. 10, Editura Politehnica, 2008, 156 pagini, figuri, tabele.

ISSN: 1842-7022

ISBN: 978-973-625-521-2

Cuvinte cheie: sistem de achiziție date, mașina de inducție, parametri, caracteristici, determinări experimentale

Rezumat:

În Capitolul 1, cu caracter de sinteză, se prezintă relațiile de definiție ale principalelor mărimi ce caracterizează funcționarea mașinilor electrice, modelele de circuit și parametrii folosiți în analiza mașinii de inducție, metode clasice și metode speciale de determinare a parametrilor mașinii de inducție, care utilizează determinarea valorilor momentane ale mărimilor de intrare.

Capitolul 2 analizează elementele generale ale Sistemelor de Achiziție și Prelucrare a Datelor. Sunt prezentate două Sisteme de Achiziție și Prelucrare a Datelor pentru Încercarea Mașini Electrice, la care autorul a avut contribuții în ceea ce privește realizarea (pe partea de hardware și software) și verificarea din punct de vedere metrologic. Cele două sisteme sunt realizate în cadrul Laboratorului de Testare a Mașinilor Electrice din Facultatea de Electrotehnică din Timișoara, de către un colectiv de cercetare din care autorul face parte.

Capitolul 3 prezintă utilizarea celor două Sisteme de Achiziție și Prelucrare a Datelor la măsurarea tensiunii la borne și a curentului prin înfășurările mașinii de inducție prin măsurarea valorilor momentane și la determinarea puterilor electrice.

Capitolul 4 analizează câteva metode de măsurare directă și metode de estimare a momentului de rotație la mașina de inducție și prezintă patru exemple de determinare experimentală a caracteristicii mecanice pentru motoare de inducție, de mică și mare putere.

În Capitolul 5 se prezintă utilizări ale Sistemelor de Achiziție și Prelucrare a Datelor pentru studiul parametrilor și a comportării mașinii de inducție.

Capitolul 6 cuprinde concluziile generale și principalele contribuții ale autorului.

Cuprins

Prefață	7
1. Probleme generale privind testarea mașinilor electrice de inducție	9
1.1. Analiza semnalelor periodice. Mărimi caracteristice funcțiilor periodice. Relații de definiție	9
1.2. Modele de circuit în analiza mașinii de inducție și parametrii acestor modele .	12
1.3. Metode clasice de determinare a parametrilor. Determinarea parametrilor din probe de regim staționar.....	17
1.4. Metode speciale de determinare a parametrilor mașinilor de inducție	19
1.5. Concluzii	32
2. Sisteme de achiziție și prelucrare a datelor pentru testarea mașinilor electrice	34
2.1. Elemente generale privind Sistemele de Achiziție și Prelucrare a Datelor.....	35
2.2. Sistemul de Achiziție și Prelucrare a Datelor dedicat pentru încercarea mașinilor electrice – SAPDME1	47
2.3. Sistemul de Achiziție și Prelucrare a Datelor dedicat pentru încercarea mașinilor electrice – SAPDME2 – bazat pe Mediul LabVIEW	61
2.4. Concluzii	76
3. Utilizarea sistemelor de achiziție și prelucrare a datelor pentru măsurare și determinare mărimilor caracteristice mașinilor electrice	78
3.1. Măsurarea tensiunii.....	78
3.2. Măsurarea curentului	80
3.3. Determinarea puterilor	83
3.4. Concluzii	86
4. Măsurarea momentului de rotație la mașina de inducție	87
4.1. Metode de măsurare directă a momentului de rotație al mașinii de inducție...	88
4.2. Metode de estimare a momentului de rotație la mașina de inducție bazate pe probe de regim tranzitoriu.....	91
4.3. Echipament dedicat pentru determinarea cuplului electromagnetic în regim dinamic LEM - Norma D6000	96
4.4. Determinări experimentale.....	101
4.5. Concluzii	117
5. Studii experimentale privind mașina de inducție, utilizând sisteme de achiziție și prelucrare a datelor	118
5.1. Studiul influenței frecvenței asupra parametrilor mașinilor de inducție	118
5.2. Studiul influenței efectului de saturație asupra parametrilor mașinilor de inducție	125
5.3. Realizarea unei sarcini artificiale prin metoda amestecului de frecvență	128
5.4. Concluzii	135
6. Concluzii generale	136
Bibliografie	139
Anexa 1.....	145

Prefață

Cunoașterea parametrilor și a caracteristicilor de funcționare ale mașinilor electrice în general și ale mașinii de inducție în particular este o preocupare constantă, întotdeauna de actualitate, atât a producătorilor cât și a utilizatorilor acestor mașini. Concret, acest lucru se realizează prin măsurarea unor mărimi și apoi, pe baza unor algoritmi, se determină parametrii, sau anumite dependențe ce caracterizează funcționarea acestor mașini.

Evoluția sistemelor de calcul, în special ale celor de tip PC, a adus o evoluție și în tehnica măsurărilor. Folosind traductoare potrivite, mărimile analogice care trebuie măsurate sunt transformate în date numerice, prin intermediul convertoarelor analog/numerice, și astfel sunt puse la „dispoziția” sistemului de calcul, cu ajutorul căruia se pot face prelucrări adecvate în funcție de parametrii și caracteristicile cerute. Astfel, vechile aparate analogice, sau mai noile aparate digitale de măsură sunt înlocuite treptat de sisteme de măsură și prelucrare a datelor, care înglobează și un microprocesor și sunt integrate în jurul unui ordinator, cel mai adesea de tip PC.

Datorită performanțelor excepționale, mereu îmbunătățite, ale acestor noi sisteme de măsurare, este foarte ușor să se măsoare și să se urmărească evoluția în timp a mărimilor care interesează, prin măsurarea valorilor momentane ale mărimii, din variația în timp rezultând apoi valori caracteristice respectivelor mărimi (valoare efectivă, valoare medie, etc.), determinate pe baza relațiilor cunoscute. De asemenea, mărimile măsurate în valori momentane pot sta la baza calcului altor mărimi derivate (putere electrică, moment de rotație, etc.), pe baza relațiilor de definiție, sau pentru trasarea unor caracteristici de funcționare.

Relativ recent s-a impus conceptul de „Instrument Virtual”, care presupune utilizarea unui ordinator electronic pentru simularea unui instrument, sau a mai multor instrumente de măsurare, a unui sistem de măsurare, de testare, sau de înregistrare a datelor. Software-ul care realizează achiziția și prelucrarea datelor are chiar și o interfață grafică ce face ca Instrumentul Virtual să semene cu panoul frontal al aparatului simulat.

Întrucât dinamica de creștere a performanțelor ordinaratoarelor electronice, mai ales în cazul celor de tip PC, este foarte mare, Instrumentul Virtual câștigă tot mai mult teren în fața instrumentelor dedicate, „clasice”.

În domeniul mașinii de inducție, deși unele metode de determinare a parametrilor și a caracteristicilor mașinii sunt cunoscute de mult timp, aplicarea lor în practică a fost uneori dificilă, sau chiar imposibil de realizat cu aparate de măsurare analogice. Apariția sistemelor care permit determinarea valorilor momentane și stocarea unui volum mare de date și dezvoltarea Instrumentației Virtuale face ca aceste metode să revină în actualitate, iar aplicarea lor să implice economii importante de resurse umane și energie, mai ales în cazul mașinilor de putere mare.

În acest context, lucrarea își propune să prezinte structura și performanțele unor Sisteme de Achiziție și Prelucrare a Datelor pentru domeniul mașinilor electrice, precum și câteva exemple de aplicare a metodelor de determinare a parametrilor și caracteristicilor mașinilor de inducție prin măsurarea valorilor momentane ale mărimilor disponibile la bornele mașinii.

Lucrarea cuprinde șase capitole, dezvoltate pe 135 de pagini, conținând 99 referințe bibliografice.

În Capitolul 1, cu caracter de sinteză, se prezintă relațiile de definiție ale principalelor mărimi ce caracterizează funcționarea mașinilor electrice, modelele de

circuit și parametri folosiți în analiza mașinii de inducție, metode clasice și metode speciale de determinare a parametrilor mașinii de inducție, care utilizează determinarea valorilor momentane ale mărimilor de intrare.

Capitolul 2 analizează elementele generale ale Sistemelor de Achiziție și Prelucrare a Datelor. În acest capitol sunt prezentate două Sisteme de Achiziție și Prelucrare a Datelor pentru Încercarea Mașini Electrice (SAPDME1 și SAPDME2) la care autorul a avut contribuții în ceea ce privește realizarea (pe partea de hardware și software) și verificarea din punct de vedere metrologic. Unul dintre sistemele prezentate este conceput și realizat pe platforma LabView, utilizând componente hardware produse de firma National Instrument. Cele două sisteme sunt realizate în cadrul Laboratorului de Testare a Mașinilor Electrice din Facultatea de Electrotehnică din Timișoara, de către un colectiv de cercetare din care autorul face parte.

Capitolul 3 prezintă utilizarea celor două Sisteme de Achiziție și Prelucrare a Datelor la măsurarea tensiunii la borne și a curentului prin înfășurările mașinii de inducție prin măsurarea valorilor momentane și la determinarea puterilor electrice, în regimuri permanente și regimuri tranzitorii.

Capitolul 4 analizează câteva metode de măsurare directă și metode de estimare a momentului de rotație la mașina de inducție, descrie un sistem dedicat determinării momentului electromagnetic la motorul de inducție (Lem Norma D6000) și prezintă patru exemple de determinare experimentală a caracteristicii mecanice pentru motoare de inducție, de mică și mare putere.

În Capitolul 5 se prezintă utilizări ale Sistemelor de Achiziție și Prelucrare a Datelor pentru studiul parametrilor și a comportării mașinii de inducție.

Capitolul 6 cuprinde concluziile generale și principalele contribuții ale autorului.

În afara surselor bibliografice, lucrarea are la bază experiența autorului în domeniul testării mașinilor electrice utilizând Sisteme de Achiziție și Prelucrare a Datelor, acumulată de-a lungul a 20 de ani de activitate, începută la Uzina Constructoare de Mașini Reșița și continuată în Laboratorul de Testare a Mașinilor Electrice D109 de la Facultatea de Electrotehnică din Timișoara, cu aplicații experimentale în industrie în toată această perioadă.

Autorul își exprimă pe această cale mulțumirile pline de respect conducătorului științific, Domnului Acad. Toma Dordea, pentru observațiile riguroase făcute și pentru competența îndrumare de-a lungul perioadei de pregătire și de elaborare a tezei.

Finalizarea acestei lucrări nu ar fi fost posibilă fără încurajările și sugestiile permanente venite din partea Domnului prof.dr.ing. Marius Biriescu și a Domnului dr. ing. Gheorghe Madescu, cărora autorul le mulțumește pentru întreg sprijinul acordat. Autorul mulțumește Domnului prof.dr.ing. Gheorghe Liuba pentru „ucenicia” în Standul de Probă Mașini Electrice al Uzinei Constructoare de Mașini Reșița și pentru ajutorul acordat la realizarea montajelor de alimentare și a testelor efectuate pe mașini electrice de mare putere la care autorul a colaborat pe parcursul activității sale, parte din rezultatele acestor teste fiind prezentate în teză.

Autorul mulțumește tuturor celor care au colaborat de-a lungul anilor, sub o formă sau alta, la realizarea celor două Sisteme de Achiziție și Prelucrare a Datelor destinate încercării mașinilor electrice, aflate în Laboratorul D109.

Pentru cinstea pe care i-au făcut-o prin acceptarea invitației de a face parte din comisia de doctorat, autorul mulțumește Domnului prof.dr.ing. Aurel Câmpeanu și Domnului prof.dr.ing. Radu Munteanu.

Capitolul 1

Probleme generale privind testarea mașinilor electrice de inducție

Consumatorii de energie electrică din sistemul energetic sunt în cea mai mare măsură elemente neliniare de circuit, funcționarea lor conducând la deformarea curbelor de variație a tensiunii și curentului din sistemul energetic. Acest lucru produce efecte perturbatoare asupra mașinilor de inducție concepute pentru a lucra în regim sinusoidal.

Totodată, în mașina de inducție, datorită saturației și repartiției în trepte a inducției de-a lungul pasului polar, apar curenți cu variație nesinusoidală chiar la o alimentare cu tensiune sinusoidală.

Instrumentele uzuale de măsură, care se utilizează pentru determinarea mărimilor electrice ce caracterizează mașinile de inducție, au la bază în majoritatea cazurilor principii valabile doar în condițiile variației sinusoidale a acestor mărimi, ceea ce face ca în condiții reale de funcționare măsurătorile să fie afectate de erori. Aceste erori se transmit mai apoi și în valorile parametrilor ce rezultă pe baza acestor mărimi determinate.

1.1. Analiza semnalelor periodice. Mărimi caracteristice funcțiilor periodice. Relații de definiție

Datorită faptului că alimentarea mașinilor de inducție în sisteme energetice se face în condițiile în care tensiunea și/sau curentul nu au o variație sinusoidală, în primul paragraf se face o trecere în revistă a mărimilor caracteristice ale funcțiilor cu variație periodică nesinusoidală.

Funcțiile periodice sunt acele funcții, variabile alternativ în timp, pentru care $f(t+kT)=f(t)$, în care T - reprezintă perioada funcției, t - timpul, iar k - un număr întreg oarecare. Funcțiile periodice nesinusoidale se pot echivala cu sume de funcții sinusoidale, dacă se cunosc armonicile care intervin, atât ca amplitudine cât și ca fază.

Dacă o funcție este periodică, de perioada T , funcția se poate scrie sub forma unei serii (serie Fourier):

$$f(t) = C_0 + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \sin(k\omega t + \varphi_k), \text{ sau} \quad (1.1)$$
$$f(t) = C_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \sin k\omega t + B_k \cos k\omega t).$$

Coeficienții seriei Fourier pot fi determinați analitic cu relațiile:

$$C_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt; \quad A_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin k\omega t dt; \quad B_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos k\omega t dt \quad (1.2)$$
$$C_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}; \quad \operatorname{tg} \varphi_k = \frac{B_k}{A_k}.$$

În cazul în care variația în timp a funcției este cunoscută sub formă grafică, de exemplu ca în figura 1.1, determinarea parametrilor se face aproximând cu sume integralele din relația (1.2). Perioada se împarte în m părți egale. Notând cu f_n valoarea funcției corespunzătoare diviziunii de numărul n rezultă [73]:

$$C_0 \approx \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m f_n; \quad A_k \approx \frac{2}{m} \sum_{n=1}^m f_n \sin\left(2\pi \frac{nk}{m}\right); \quad B_k \approx \frac{2}{m} \sum_{n=1}^m f_n \cos\left(2\pi \frac{nk}{m}\right). \quad (1.3)$$

Pentru a se putea calcula coeficienții până la rangul N , este necesară o împărțire a perioadei în cel puțin $m=2N$ părți.

Eroarea metodei este cu atât mai mică, cu cât m este mai mare. Practic, pentru curbele întâlnite în tehnică, se obțin aproximații satisfăcătoare pentru $m = (10 \div 20)$ [72].

Din punct de vedere al simetriei, funcțiile periodice se împart în două categorii: funcții pare, pentru care $f(-t) = f(t)$ și funcții impare pentru care $f(-t) = -f(t)$.

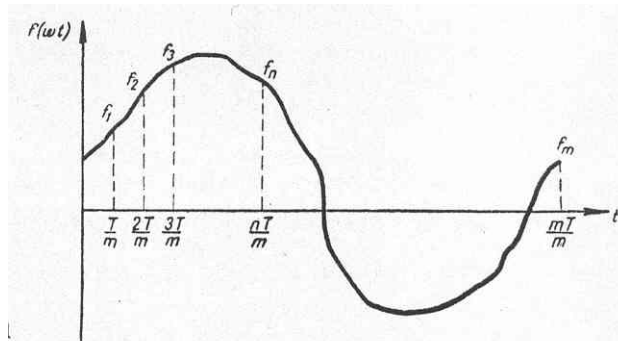


Figura 1.1. Curba de variație în timp a funcției $f(\omega t)$ – explicativă pentru relația (1.3).

Valoarea efectivă a unei funcții nesinusoidale $u=u(t)$ este definită de relația:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt}, \quad (1.4)$$

și se poate calcula în funcție de valorile eficace ale armonicilor de ordinul k , cu relația:

$$U = \sqrt{\sum_k U_k^2}, \quad (1.5)$$

Valoarea medie a unei funcții este, prin definiție:

$$U_{med} = \frac{1}{T} \int_0^T u dt, \quad (1.6)$$

Din relației (1.2) rezultă:

$$U_{med} = U_0. \quad (1.7)$$

Valoarea medie redresată este:

$$U_{med,r} = \frac{1}{T} \int_0^T |u| dt, \quad (1.8)$$

Se definește factorul de formă:

$$F_U = \frac{U}{U_{med,r}}, \quad (1.9)$$

factorul de ondulație:

$$\gamma_U = \frac{\sqrt{U^2 - U_0^2}}{U_0}, \quad (1.10)$$

și coeficientul de distorsiune:

$$\delta_U = \frac{\sqrt{U^2 - U_1^2 - U_0^2}}{\sqrt{U^2 - U_0^2}}. \quad (1.11)$$

Puterea instantanee se definește ca produsul dintre valoarea momentană a tensiunii u și valoarea momentană a curentului i :

$$p = ui. \quad (1.12)$$

Puterea activă este prin definiție valoarea medie pe o perioadă a puterii instantanee:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \, dt. \quad (1.13)$$

Puterea activă în regim nesinusoidal se mai poate calcula și făcând suma puterilor active corespunzătoare fiecărei armonice de tensiune și curent:

$$P = U_0 I_0 + \sum_{k \geq 1} U_k I_k \cos \varphi_k. \quad (1.14)$$

Puterea reactivă în regim nesinusoidal este prin definiție suma puterilor reactive corespunzătoare fiecărei armonici

$$Q = \sum_{k \geq 1} U_k I_k \sin \varphi_k. \quad (1.15)$$

Puterea aparentă se definește ca produsul valorilor efective ale tensiunii și curentului:

$$S = UI = \sqrt{\left(\sum_k U_k \right)^2 \cdot \left(\sum_k I_k \right)^2}. \quad (1.16)$$

Puterea deformată este definită prin relația:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}. \quad (1.17)$$

1.2. Modele de circuit utilizate în analiza mașinii de inducție și parametrii acestor modele

Pentru analiza mașinilor electrice de inducție (MI) se folosesc câteva categorii de modele: modelul de circuit, modelul de câmp și modele combinate câmp-circuit.

Modelul de circuit s-a dezvoltat încă de la începuturile fabricării mașinilor electrice și este utilizat și în prezent în proiectare acestora.

Modelul de circuit este o reprezentare simplificată a mașinii reale, în care parametrii distribuiți ai acesteia sunt înlocuiți cu parametrii concentrați. Parametrii mașinii din modelul de circuit sunt reali, având semnificație fizică.

După cum se demonstrează în [21], pentru situația în care curenții și tensiunile variază sinusoidal ecuațiile mașinii de inducție cu rotor real, scrise în complex, obțin următoarea formă simplificată:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{Z}_1 \underline{I}_1 - \underline{U}_{e1}; & \underline{U}_{e1} &= -\underline{Z}_{1m} \underline{I}_{01} \\ \underline{U}_2 &= -\underline{Z}_2 \underline{I}_2 + \underline{U}_{e2s}; & \underline{U}_{e2s} &= -\frac{s}{k_e} \underline{Z}_{1m} \underline{I}_{01} e^{-j\theta_0}; & \underline{I}_{01} &= \underline{I}_1 + \frac{1}{k_i} \underline{I}_2 e^{j\theta_0}. \end{aligned} \quad (1.18)$$

în care \underline{U}_1 , \underline{U}_2 reprezintă tensiunile statorică respective rotorică; \underline{U}_{e1} , \underline{U}_{e2s} - tensiunile electromotoare induse în stator, respective rotor; \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 impedanțele înfășurărilor statorice, respectiv rotorice; \underline{Z}_{1m} - impedanța de magnetizare; k_e , k_i - raport de transformare al tensiunilor, respective curenților.

Ecuațiile (1.18) pot fi reprezentate grafic în planul complex, obținându-se diagrama fazorială prezentată în figura 1.2.

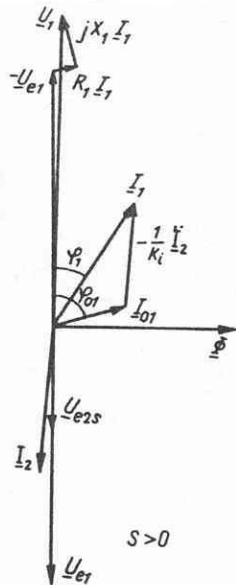


Figura 1.2. Diagrama fazorială a mașinii de inducție în regim de motor ($s > 0$).

Rotorul mașinii reale, în care mărimile rotorice au frecvența de alunecare f_2 , se poate înlocui cu un rotor echivalent, imobil față de stator (în care mărimile rotorice au aceeași frecvență ca și mărimile statorice, f). Rotorul echivalent are aceeași solenație (primește din stator aceeași putere), are același defazaj între tensiunea indusă și curent și are aceeași energie magnetică a câmpului lui magnetic ca și rotorul real.

Alunecarea s are următoarea formulă de definiție:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}, \quad (1.19)$$

în care n_1 – reprezintă viteza de rotație câmpului învârtitor și n – viteza de rotație rotorică.

Pentru $\underline{U}_2=0$, ecuația a treia din (1.18) devine:

$$\underline{U}_{e2s} = s\underline{U}_{e2} = (R_2 + jsX_2)\underline{I}_2, \quad (1.20)$$

de unde rezultă:

$$\underline{U}_{e2} = \left(\frac{R_2}{s} + jX_2 \right) \underline{I}_2 = \underline{Z}_2 \underline{I}_2. \quad (1.21)$$

Ecuatiei (1.20) îi corespunde schema electrică a fazei rotorului real din figura 3.a, iar ecuației (1.21) îi corespunde schema electrică a fazei rotorului echivalent din figura 3.b.

Circuitul electric al rotorului echivalent din figura 3.b are impedanța $\underline{Z}_2 = \frac{\underline{Z}_{2s}}{s} = \frac{R_2}{s} + jX_2$, având aplicată la borne tensiunea \underline{U}_{e2} , prin care se stabilește curentul \underline{I}_2 . Totodată circuitul corespunde unui rotor care are

inductivitatea $L_{2\sigma}$ și rezistența $\frac{R_2}{s}$, având aceeași repartiție a înfășurărilor și

număr de spire ca la rotorul real, ceea ce presupune că cele două rotoare au aceeași solenație și același câmp magnetic. Rotorul echivalent primește aceeași putere electromagnetică de la stator ca și rotorul real, de unde rezultă că cele două rotoare sunt echivalente din punct de vedere energetic.

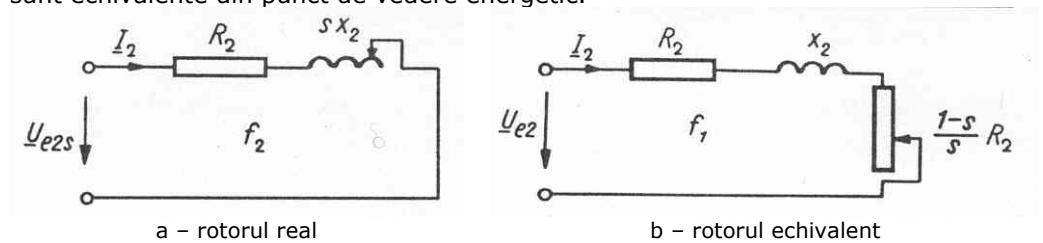


Figura 1.3. Schema fazei rotorice a mașinii electrice

Puterea activă primită de rotorul echivalent $m_2 \frac{R_2}{s} I_2^2$ este egală cu suma dintre puterea disipată pe înfășurarea rotorică $m_2 R_2 I_2^2$ corespunzător celor m_2 faze rotorice (ce reprezintă pierderile pe înfășurările rotorului real) și puterea stereomecanică P_m transmisă arborelui, adică:

$$m_2 \frac{R_2}{s} I_2^2 = P_m + m_2 R_2 I_2^2, \quad (1.22)$$

de unde rezultă puterea stereomecanică transmisă arborelui:

$$P_m = m_2 \frac{1-s}{s} R_2 I_2^2. \quad (1.23)$$

Rezistența $\frac{1-s}{s}R_2$ se numește rezistență de sarcină, deoarece corespunde sarcinii mașinii de inducție. În cazul în care rotorul este în stare de repaus ($s = 1$), rezistența de sarcină e nulă, ceea ce corespunde regimului de scurtcircuit al mașinii de inducție. În cazul în care $s=0$, rezistența $\frac{1-s}{s}R_2 \rightarrow \infty$, rezultând curentul rotoric nul, ceea ce corespunde regimului de funcționare în gol al mașinii de inducție.

Astfel, pe baza rotorului echivalent, imobil, se poate face studiul mașinii cu rotor mobil.

Ecuțiile mașinii cu rotor echivalent, deduse din (1.18), scrise în mărimi complexe devin:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{Z}_1 \underline{I}_1 - \underline{U}_{e1}; \quad \underline{U}_{e1} = -\underline{Z}_{1m} \underline{I}_{01} \\ \frac{\underline{U}_2}{s} &= -\underline{Z}_2 \underline{I}_2 + \underline{U}_{e2}; \quad \underline{U}_{e2} = -\frac{1}{k_e} \underline{U}_{e1} e^{j\theta_0}; \quad \underline{I}_{01} = \underline{I}_1 + \frac{1}{k_i} \underline{I}_2 e^{j\theta_0}. \end{aligned} \quad (1.24)$$

Cu următoarele notații

$$\begin{aligned} \underline{I}'_2 &= \frac{1}{k_i} \underline{I}_2 e^{j\theta_0}; \quad \underline{R}'_2 = k_e k_i R_2; \quad \underline{U}'_{2e} = k_e \underline{U}_{e2} e^{j\theta_0} = \underline{U}_{e1}; \quad \underline{X}'_2 = k_e k_i X_2 \\ \underline{U}'_2 &= \frac{k_e \underline{U}_2}{s} e^{j\theta_0}; \quad \underline{Z}'_2 = k_e k_i Z_2 = \frac{\underline{R}'_2}{s} + j \underline{X}'_2, \end{aligned} \quad (1.25)$$

în care θ_0 - reprezintă unghiul electric inițial dintre o fază statorică și una rotorică, ecuațiile (1.24) devin:

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_1 \underline{I}_1 - \underline{U}_{e1}; \quad \underline{I}_{01} = \underline{I}_1 + \underline{I}'_2; \quad \underline{U}'_2 = -\underline{Z}'_2 \underline{I}'_2 + \underline{U}_{e1}; \quad \underline{U}_{e1} = \underline{Z}_{1m} \underline{I}_{01}. \quad (1.26)$$

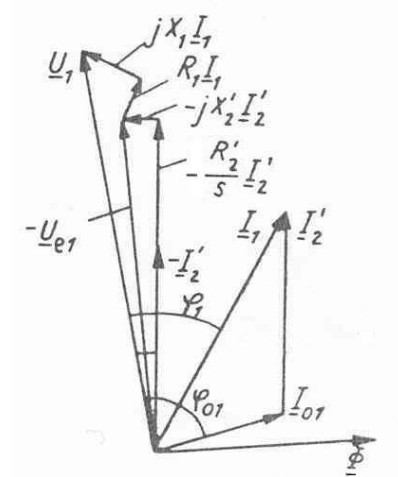
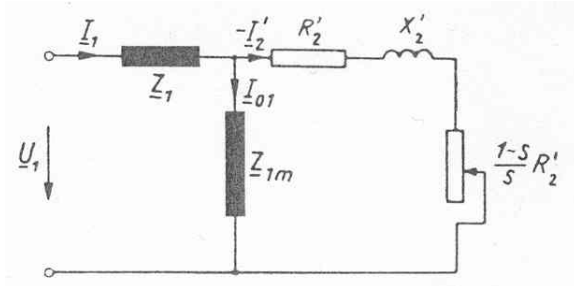
Ecuțiile (1.26) corespund mașinii de inducție cu rotor echivalent, imobil, având același număr de faze, înfășurări și numere de spire în rotor ca și în stator.

Parametrii și mărimile electrice rotorice corespunzătoare acestei mașini sunt reduse la stator, iar ecuațiile (1.26) sunt ecuațiile mașinii de inducție, scrise cu mărimi reduse.

Aceste ecuații se pot rezolva considerând cunoscuți parametri mașinii și tensiunile \underline{U}_1 și \underline{U}'_2 iar ca necunoscute mărimile \underline{I}_1 , \underline{I}'_2 , \underline{I}_{10} , \underline{U}_{e1} , care se obțin după cum urmează [21]:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \frac{(\underline{Z}_{1m} - \underline{Z}'_2) \underline{U}_1 + \underline{Z}_{1m} \underline{U}'_2}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_{1m} + \underline{Z}'_2 (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{1m})} = \frac{\underline{C}_2 \underline{U}_1 + \underline{U}'_2}{\underline{Z}_1 + \underline{C}_1 \underline{Z}'_2}; \\ \underline{U}_{e1} &= \frac{\underline{Z}_{1m} (\underline{Z}'_2 \underline{U}_1 - \underline{Z}_1 \underline{U}'_2)}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_{1m} + \underline{Z}'_2 (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{1m})} = \frac{\underline{Z}'_2 \underline{U}_1 - \underline{Z}_1 \underline{U}'_2}{\underline{Z}_1 + \underline{C}_1 \underline{Z}'_2} \\ \underline{I}_{01} &= \frac{\underline{Z}'_2 \underline{U}_1 - \underline{Z}_1 \underline{U}'_2}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_{1m} + \underline{Z}'_2 (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{1m})} = \frac{\underline{Z}'_2 \underline{U}_1 + \underline{Z}_1 \underline{U}'_2}{\underline{Z}_{1m} (\underline{Z}_1 + \underline{C}_1 \underline{Z}'_2)}; \\ \underline{I}'_2 &= -\frac{\underline{Z}_{1m} \underline{U}_1 + (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{1m}) \underline{U}'_2}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_{1m} + \underline{Z}'_2 (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{1m})} = -\frac{\underline{U}_1 - \underline{C}_1 \underline{U}'_2}{\underline{Z}_1 + \underline{C}_1 \underline{Z}'_2} \end{aligned} \quad (1.27)$$

în care $\underline{C}_1 = 1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_{1m}}$, iar $\underline{C}_2 = 1 + \frac{\underline{Z}_2'}{\underline{Z}_{1m}}$.



a – schema echivalentă în **T** a mașinii de inducție.

b – diagrama tensiunilor.

Figura 1.4.

Pentru mașinile de inducție ce au înfășurările rotorice scurtcircuitate ($\underline{U}_2 = 0$), impedanța echivalentă \underline{Z}_e , determinată din relația $\underline{U}_1 = \underline{Z}_e \underline{I}_1$ se poate pune sub forma:

$$\underline{Z}_e = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_{1m} \underline{Z}_2'}{\underline{Z}_{1m} + \underline{Z}_2'} \tag{1.28}$$

relație căreia îi corespunde schema echivalentă în **T** reprezentată în figura 1.4.

Expresia impedanței echivalente \underline{Z}_e din relația (1.28), utilizând constanta complexă $\underline{C}_1 = 1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_{1m}}$, se poate pune sub forma:

$$\frac{1}{\underline{Z}_e} = \frac{1}{\underline{C}_1 \underline{Z}_{1m}} + \frac{1}{\underline{C}_1 \underline{Z}_{1m} + \underline{C}_1^2 \underline{Z}_2'} \tag{1.29}$$

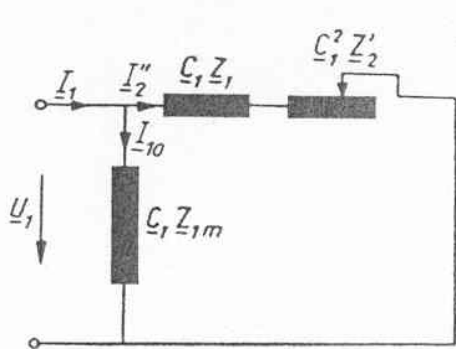
care corespunde schemei în **L** a mașinii de inducție, schemă reprezentată în figura 1.5.a.

Rezultă conform [21]:

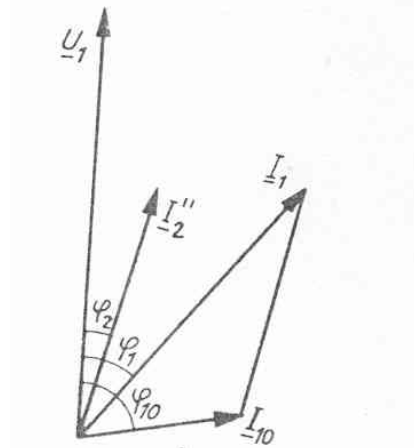
$$\underline{I}_{10} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{1m}} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{C}_1 \underline{Z}_{1m}}; \underline{I}_2'' = -\frac{\underline{U}_1 + (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{1m}) \underline{U}_2'}{\underline{C}_1 \underline{Z}_1 + \underline{C}_1^2 \underline{Z}_2'} \tag{1.30}$$

$$\underline{U}_1 = \underline{C}_1 \underline{Z}_{1m} \underline{I}_{10} = (\underline{C}_1 \underline{Z}_1 + \underline{C}_1^2 \underline{Z}_2'') \underline{I}_2''; \underline{I}_1 = \underline{I}_{10} + \underline{I}_2''$$

Aceste ecuații reprezentate grafic în planul complex constituie diagrama în complex pentru schema în **L** a mașinii de inducție. Diagrama fazorială este prezentată în figura 1.5.b.



a - schema echivalentă în L a mașinii de inducție;



b - diagrama tensiunilor și curenților.

Figura 1.5.

1.3. Metode clasice de determinare a parametrilor. Determinarea parametrilor din probe de regim staționar

Circuitul electric echivalent al mașinii de inducție este modelul cel mai des utilizat pentru analiza și sinteza acestei mașini. Parametrii schemei echivalente se determină prin calcul, sau prin măsurare.

Determinarea experimentală a parametrilor se face, de regulă, dintr-o probă de funcționare în gol și una de funcționare în scurtcircuit (cu rotor blocat).

În cazul mașinii de inducție cu colivie în rotor, singurul parametru care se măsoară direct este rezistența electrică a înfășurărilor statorului; ceilalți parametri se determină indirect, conform metodelor cunoscute.

1.3.1. Proba de funcționare în gol

La funcționarea în gol a mașinii de inducție, pentru $s=0$, curentul rotoric devine nul. Ecuațiile (1.26) ale mașinii de inducție devin:

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_1 \underline{I}_1 - \underline{U}_{e1}; \quad \underline{I}_{01} = \underline{I}_1; \quad \underline{U}_{e1} = \underline{Z}_{1m} \underline{I}_{01}. \quad (1.31)$$

Pentru regimul de funcționare în gol a mașinii de inducție rezultă schema echivalentă simplificată prezentată în figura 1.6, în care s-a considerat $s=0$, $X_1 = \omega L_1$; $X_m = \omega L_m$; $\omega = 2\pi f$, cu notațiile:

R_1 - rezistența electrică a înfășurării statorice;

R_m - rezistența electrică echivalentă pierderilor în fier;

X_1 - reactanța de dispersie corespunzătoare unei faze statorice;

L_1, L_m - inductivități.

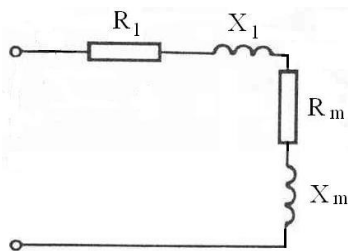


Figura 1.6. Schema echivalentă pentru funcționarea în gol a mașinii de inducție

Impedanța echivalentă corespunzătoare schemei din figura 1.6 este:

$$\underline{Z}_0 = R_0 + jX_0 = (R_1 + R_m) + j(X_1 + X_m) \quad (1.32)$$

în care R_0, X_0 - reprezintă rezistența respectiv reactanța pentru funcționare în gol.

Rezistența electrică a înfășurării statorice se poate măsura direct. Pentru determinarea celorlalți parametri din schema echivalentă la funcționare în gol a mașinii de inducție se măsoară tensiunea de alimentare statorică U_0 , curentul absorbit la funcționare în gol I_0 și puterea activă totală absorbită de la rețea, la funcționarea în gol P_0 . Cu aceste mărimi măsurate se pot calcula parametrii schemei echivalente:

$$R_0 = \frac{P_0}{3I_0^2}; \quad Z_0 = \frac{U_0}{I_0}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}. \quad (1.33)$$

Rezultă

$$R_m = R_0 - R_1. \quad (1.34)$$

În [5], pag. 27-31 se prezintă o metodă de determinare a reactanței de dispersie statorică X_1 din măsurători experimentale efectuate pe mașina de inducție cu rotorul scos.

La funcționarea în gol real a mașinii de inducție, alunecarea s_0 a rotorului este diferită de zero, fiind cuprinsă între zero și alunecarea nominală, adică $0 < s_0 < s_N$. Din acest motiv, pentru determinarea mai exactă a parametrilor este necesară antrenarea rotorului la turația de sincronism.

1.3.2. Proba de funcționare în scurtcircuit

Pentru alunecarea $s=1$, întrucât reactanța de magnetizare este mult mai mare decât impedanța rotorică, neglijând curentul de magnetizare, ecuațiile (1.26) se scriu:

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_1 \underline{I}_1 - \underline{U}_{e1}; \quad \underline{I}_1 = -\underline{I}'_2; \quad \underline{Z}'_2 \underline{I}'_2 = \underline{U}_{e1}; \quad (1.35)$$

Pentru acest regim rezultă schema echivalentă din figura 1.7, în care s-a considerat $s=1$, $X'_2 = \omega L'_2$, folosind notațiile:

R'_2 - rezistența electrică a înfășurării rotorice redusă la înfășurarea statorului;

X'_2, L'_2 - reactanța respectiv inductivitatea de dispersie rotorică raportată la înfășurarea statorului.

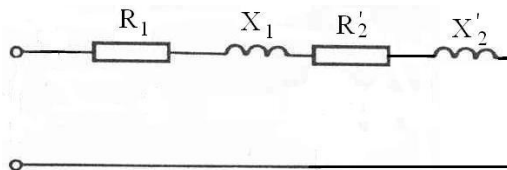


Figura 1.7. Schema echivalentă pentru proba cu rotorul blocat a mașinii de inducție.

Impedanța echivalentă schemei din figura 1.7, numită impedanța de scurtcircuit este:

$$\underline{Z}_{SC} = R_{SC} + jX_{SC} = (R_1 + R'_2) + j(X_1 + X'_2) \quad (1.36)$$

Pentru determinarea parametrilor din schema echivalentă la funcționare în scurtcircuit a mașinii de inducție, se măsoară tensiunea de alimentare statorică U_{SC} , curentul absorbit la funcționare în scurtcircuit I_{SC} , și puterea activă totală absorbită de la rețea, la funcționarea în scurtcircuit P_{SC} , cu ajutorul cărora se pot calcula parametrii schemei echivalente:

$$R_{SC} = \frac{P_{SC}}{3I_{SC}^2}; \quad Z_{SC} = \frac{U_{SC}}{I_{SC}}; \quad X_{SC} = \sqrt{Z_{SC}^2 - R_{SC}^2}. \quad (1.37)$$

Conform [5], pag. 187-190, raportul X_1 / X'_2 se poate calcula dacă se cunosc datele de proiectare ale mașinii. Dacă nu se cunosc datele de proiectare se pot adopta următoarele valori pentru acest raport:

- $X_1 / X'_2 = 1$ pentru motoare cu rotor bobinat, sau cu efect de refulare neglijabil;
- $X_1 / X'_2 = 0,67$, sau $X_1 / X'_2 = 0,43$, în funcție de forma creștăturii rotorului, cu efect de refulare mai pronunțat

Dacă se cunoaște suma celor două reactanțe pentru mașina reală, ipoteza egalității celor două reactanțe conduce la erori mici.

1.4. Metode speciale de determinare a parametrilor mașinilor de inducție

În ultima perioadă, pentru determinarea unor parametri ai mașinilor electrice se folosesc tot mai frecvent datele obținute din măsurători efectuate asupra mașinilor supuse unor regimuri tranzitorii statice. Exploatarea acestor regimuri tranzitorii pentru determinarea parametrilor mașinilor electrice este posibilă cu precădere datorită facilităților oferite de sistemele de achiziție de date, care permit înregistrarea mărimilor variabile în timp și prelucrarea acestora on-line, sau off-line. Aceste regimuri se aplică în special la mașina sincronă, dar se pot aplica și la mașina de inducție.

Caracteristica esențială a acestor regimuri tranzitorii statice constă în faptul că rotorul mașinii este în stare de repaus.

1.4.1. Determinarea inductivităților (reactanțelor) mașinii de inducție din probe de stingeri de curent

În probele de stingeri de curent starea inițială dinaintea declanșării regimului tranzitoriu corespunde alimentării înfășurărilor mașinii în curent continuu.

Se consideră mașina în caz general cu simetrie biaxială în coordonate d,q. Ecuațiile curenților în coordonate d,q,0, funcție de curenții fazelor i_a, i_b, i_c , sunt [4]:

$$\begin{aligned} i_d &= \frac{2}{3} \left[i_a \cos \gamma + i_b \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ i_q &= -\frac{2}{3} \left[i_a \sin \gamma + i_b \sin \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \sin \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ i_0 &= \frac{1}{3} (i_a + i_b + i_c), \end{aligned} \quad (1.38)$$

în care i_0 reprezintă componenta curentului de nul.

Pentru determinarea reactanței longitudinale se consideră schema de montaj din figura 1.8. a.

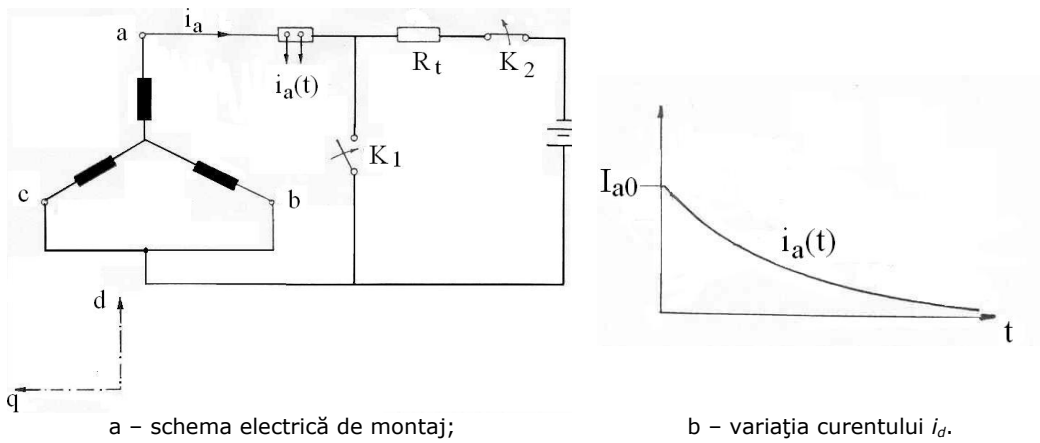


Figura 1.8. Regimul tranzitoriu longitudinal

Conform schemei din figura 1.8.a regimul tranzitoriu longitudinal static (cu rotorul imobil) se obține închizând întreruptorul K_1 , urmată de deschiderea lui K_2

(pentru protejarea sursei de curent continuu E). Rezistența R_t are rol de limitare a curentului (rezistență tampon).

Pentru regimul considerat condițiile inițiale sunt: $\gamma = 0$, $i_b = i_c = -\frac{i_a}{2}$,
 $i_a(0) = I_{a0}$.

Cu acestea, ecuațiile (1.38) devin:

$$\begin{aligned} i_d &= \frac{2}{3} \left[i_a + \frac{i_a}{2} \cos\left(-\frac{2\pi}{3}\right) - \frac{i_a}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \right] = i_a \\ i_q &= -\frac{2}{3} \left[-\frac{i_a}{2} \sin\left(-\frac{2\pi}{3}\right) - \frac{i_a}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \right] = 0 \\ i_0 &= \frac{1}{3} \left(i_a - \frac{i_a}{2} - \frac{i_a}{2} \right) = 0. \end{aligned} \quad (1.39)$$

Se constată că în acest caz avem acces la curentul echivalent după axa **d** care este chiar curentul fazei **a** considerate, pe care îl putem măsura direct.

Scriind ecuația tensiunilor în mașină

$$u_d = R_1 i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega \frac{d\Psi_q}{dt}, \quad (1.40)$$

pentru condițiile inițiale date în regimul considerat (rotorul în repaus $\omega = 0$ și $u_d = 0$), rezultă următoarea formă a ecuației:

$$0 = R_1 i_d + \frac{d\Psi_d}{dt}. \quad (1.41)$$

Integrând relația (1.41) se obține:

$$0 = R_1 \int_0^\infty i_d dt + \Psi_d|_0^\infty. \quad (1.42)$$

Cum $\Psi_{d\infty} = 0$ și $\Psi_{d0} = L_d I_{a0}$ rezultă:

$$R_1 \int_0^\infty i_d dt - L_d I_{a0} = 0, \quad (1.43)$$

deci inductivitatea longitudinală se poate calcula cu relația:

$$L_d = R_1 \int_0^\infty \frac{i_d}{I_{a0}} dt. \quad (1.44)$$

Printre avantajele aplicării acestei metode la calculul inductivității pot fi amintite următoarele: nu trebuie luate în considerare pierderile și nu se pune problema armonicilor care apare la determinarea reactanțelor în curent alternativ.

Pentru mașina cu întrefier constant inductivitatea longitudinală L_d este egală cu inductivitatea transversală L_q ; acestea sunt egale cu suma dintre inductivitatea de dispersie L_σ și inductivitatea mutuală (de magnetizare) L_m :

$$L_d = L_q = L_\sigma + L_m. \quad (1.45)$$

La mașinile electrice cu simetrie biaxială se fac încercări de stingere de curent pentru axa longitudinală și pentru axa transversală. Datorită simetriei cilindrice, la mașina de inducție nu contează axa după care se face stingerea curentului. Prin neglijarea influenței deschiderii creștăturii nu contează nici poziția rotorului [86] față de stator.

1.4.2. Determinarea parametrilor mașinii de inducție din probe de răspuns la impuls treaptă

Modelul analitic al mașinii de inducție este reprezentat de sistemul de ecuații, în care de regulă sunt considerați cunoscuți parametrii mașinii și tensiunile la bornele înfășurărilor, iar curenții prin înfășurări sunt considerați necunoscuți.

Problema se poate pune și în alt fel: sunt considerați cunoscuți în sistemul de ecuații tensiunile aplicate la bornele înfășurărilor și curenții prin înfășurări urmând să se determine parametrii. Numărul de parametri introduși ca necunoscute în sistemul de ecuații trebuie să fie egal cu numărul de ecuații, pentru a avea un sistem determinat de ecuații.

Determinarea parametrilor prin această metodă poate fi aplicată în felul următor: pentru un model fizic (real) al motorului se înregistrează tensiunea aplicată la bornele înfășurărilor și curenții prin înfășurări, ca răspuns al sistemului. Introducând în sistemul de ecuații aceste mărimi cunoscute, prin rezolvarea sistemului de ecuații se pot determina parametrii necunoscuți.

Metoda prezentată în [76] este potrivită a fi folosită pentru estimarea parametrilor motorului de inducție, fără cuplarea acestuia la sarcină.

În figura 1.9 este prezentată schema electrică echivalentă fără considerarea pierderilor în fier și pierderilor suplimentare, pentru o mașină nesaturată și simetrică, în care se consideră inductivitatea $L_{\sigma}^* = L_{1\sigma} + L_{2\sigma}$, în care $L_{1\sigma}$ - reprezintă inductivitatea de dispersie statorică, iar $L_{2\sigma}$ inductivitatea de dispersie rotorică, redusă la stator.

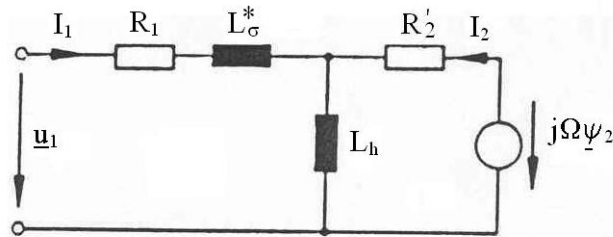


Figura 1.9. Schema electrică echivalentă în Γ a mașinii de inducție.

Ecuațiile mașinii cu rotorul în scurtcircuit sunt:

$$\underline{u}_1 = R_1 \underline{i}_1 + (L_h + L_{\sigma}^*) \frac{d\underline{i}_1}{dt} + L_h \frac{d\underline{i}_2}{dt} \tag{1.46}$$

$$0 = R_2' \underline{i}_2 + L_h \frac{d(\underline{i}_1 + \underline{i}_2)}{dt} - j\Omega \underline{\psi}_2 \tag{1.47}$$

Pentru determinarea parametrilor, înfășurările mașinii de inducție se conectează conform schemei din figura 1.10.

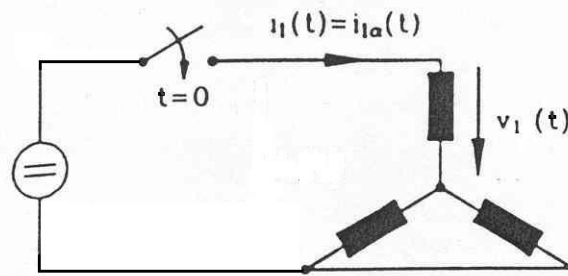


Figura 1.10. Schema electrică de montaj pentru încercarea mașinii de inducție în proba de răspuns la impuls treaptă.

Deoarece mașina are rotorul în stare de repaus ($\Omega = 0$), ecuațiile (1.46) și (1.47) devin:

$$\underline{u}_1 = R_1 \dot{i}_1 + (L_h + L_\sigma^*) \frac{d\dot{i}_1}{dt} + L_h \frac{d\dot{i}_2}{dt} \quad (1.48)$$

$$0 = R_2 \dot{i}_2 + L_h \frac{d\dot{i}_1}{dt} + L_h \frac{d\dot{i}_2}{dt}. \quad (1.49)$$

Prin scăderea ecuației (1.49) din ecuația (1.48) rezultă:

$$\underline{u}_1 - R_1 \dot{i}_1 - L_h \frac{d\dot{i}_1}{dt} - L_\sigma^* \frac{d\dot{i}_1}{dt} = -R_2 \dot{i}_2 - L_h \frac{d\dot{i}_1}{dt}, \quad (1.50)$$

apoi

$$\underline{u}_1 - R_1 \dot{i}_1 - L_\sigma^* \frac{d\dot{i}_1}{dt} = -R_2 \dot{i}_2, \quad (1.51)$$

de unde rezultă curentul rotoric:

$$\dot{i}_2 = \frac{R_1}{R_2} \dot{i}_1 - \frac{1}{R_2} \underline{u}_1 + \frac{L_\sigma^*}{R_2} \frac{d\dot{i}_1}{dt}. \quad (1.52)$$

Înlocuind expresia curentului rotoric în ecuația (1.48), rezultă:

$$\underline{u}_1 = R_1 \dot{i}_1 + (L_h + L_\sigma^*) \frac{d\dot{i}_1}{dt} + L_h \frac{R_1}{R_2} \frac{d\dot{i}_1}{dt} - \frac{L_\sigma^*}{R_2} \frac{d\underline{u}_1}{dt} + \frac{L_\sigma^* L_h}{R_2} \frac{d^2 \dot{i}_1}{dt^2}. \quad (1.53)$$

Prin integrare, ecuația (1.53) se poate scrie sub următoarea formă:

$$\int_0^\infty \underline{u}_1 dt = R_1 \int_0^\infty \dot{i}_1 dt + (L_h + L_\sigma^*) \dot{i}_1 + L_h \frac{R_1}{R_2} \dot{i}_1 - \frac{L_\sigma^*}{R_2} \underline{u}_1 + \frac{L_\sigma^* L_h}{R_2} \frac{d\dot{i}_1}{dt}. \quad (1.54)$$

Rezultă

$$\frac{d\dot{i}_1}{dt} = C_0 \underline{u}_1 + C_1 \int \underline{u}_1 dt + C_2 \dot{i}_1 + C_3 \int \dot{i}_1 dt \quad (1.55)$$

în care s-a notat

$$C_0 = \frac{1}{L_\sigma^*}; \quad C_1 = \frac{1}{L_\sigma^*} \cdot \frac{R_2'}{L_h}; \quad C_2 = \frac{1}{L_\sigma^*} \cdot \left(\frac{L_1}{L_h} \cdot R_2' - R_1 \right); \quad C_3 = -\frac{R_1 \cdot R_2'}{L_\sigma^* \cdot L_h}. \quad (1.56)$$

În figura 1.11.a se prezintă semnalul treaptă de tensiune (variația tensiunii u_1) aplicat la bornele mașinii, a cărei faze sunt conectate conform schemei din figura 1.10; în figura 1.11.b este prezentată variația curentului din circuit.

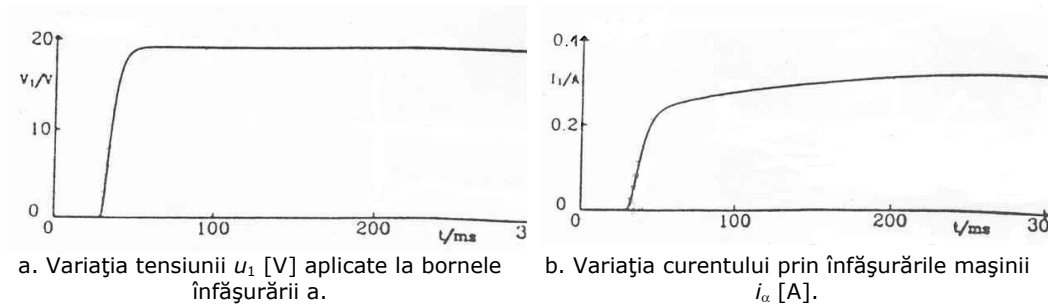


Figura 1.11. Tensiunea aplicată și funcția răspuns al curentului.

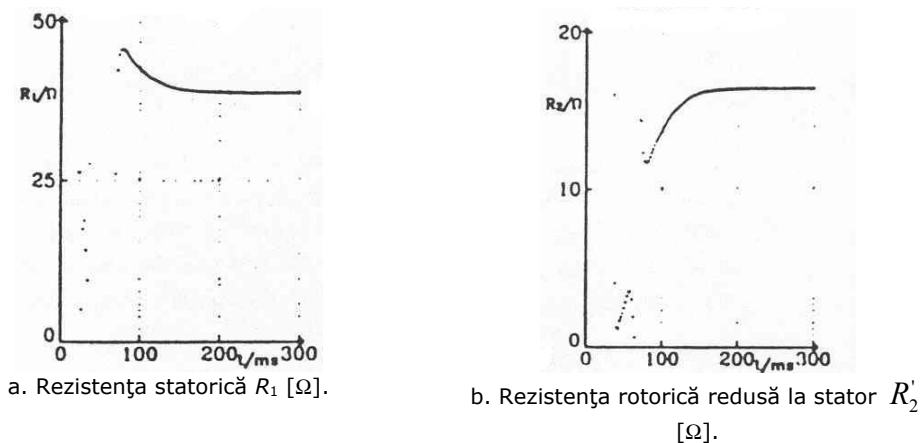
Înregistrând variația tensiunii u_1 și a curentului i_1 ca funcții de timp, pot fi estimați parametrii C_i ($i=0, 1, 2, 3$) prin prelucrarea valorilor în concordanță cu relația (1.56).

Pentru că sunt patru parametri necunoscuți și o singură ecuație, se iau 4 valori pentru perechile u_1 i_1 , de unde rezultă 4 ecuațiile de tip (1.56) care formează un sistem. Acest sistem de ecuații permite determinarea constantelor C_i și apoi a parametrilor R_1 R'_2 , L_h și L'_σ .

$$L'_\sigma = \frac{1}{C_0}; L_h = \left(\frac{C_3 \cdot C_0}{C_1^2} - \frac{1}{C_0} - \frac{C_2}{C_1} \right); R_1 = -\frac{C_3}{C_1}; R'_2 = \left(\frac{C_3}{C_1} - \frac{C_1}{C_0^2} - \frac{C_2}{C_0} \right). \quad (1.57)$$

Se repetă acest procedeu pentru următoarele 4 puncte ale curbelor $u_1(t)$ și $i_1(t)$ determinând un nou set de valori pentru parametrii mașinii. Procedeu se repetă până la epuizarea valorilor înregistrate experimental.

Sunt prezentați în figura 1.12 parametrii estimați ai mașinii de inducție în funcție de timp, pentru o mașină de inducție cu următoarele mărimi nominale: tensiunea 380 V; curentul 0,87 A; frecvența 50 Hz; puterea activă 250 W; turația 1380 rpm. Parametrii estimați tind spre o valoare fixă după aproximativ 200 ms [76].



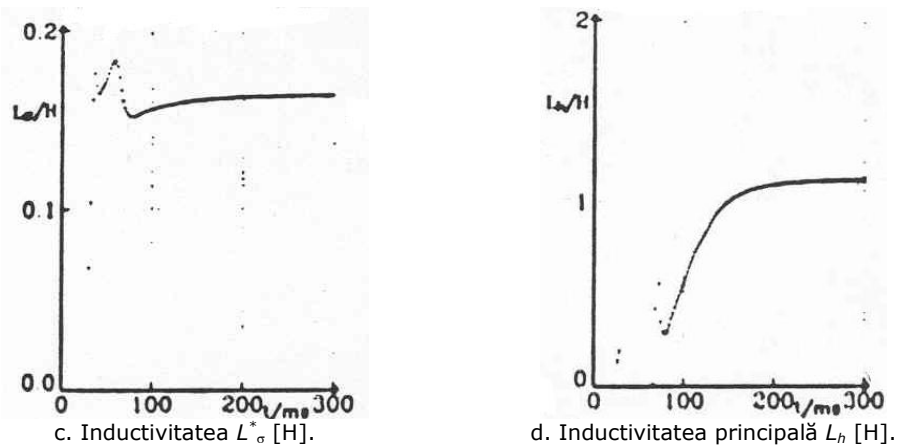


Figura 1.12. Variația parametrilor estimați ai mașinii de inducție funcție de timp.

1.4.3. Determinarea parametrilor motorului de inducție folosind datele de catalog

De obicei, pentru motoarele de inducție sunt disponibile următoarele date de catalog: P_n - puterea nominală [W]; U_n - tensiunea nominală de fază [V]; I_n - curentul nominal [A]; n_n - viteza de rotație nominală a arborelui motorului [rot/min]; s_n - alunecarea nominală; $\cos\varphi_n$ - factorul de putere nominal; η_n - randamentul nominal; raportul m_k dintre cuplul de rotație critic de răsturnare M_k și cuplul de rotație nominal M_n ; raportul m_p dintre cuplul de rotație la pornire M_p (cu rotorul blocat) și cuplul de rotație nominal; raportul i_p dintre curentul de pornire I_p (cu rotorul blocat) și curentul nominal; p - numărul de perechi de poli.

Cel mai simplu mod de a estima parametrii motoarelor de inducție (rezistențe și reactanțe) este pe baza datelor de catalog.

Folosind schema echivalentă din figura 1.13.a, sunt stabilite mărimile care vor fi corelate cu datele de catalog și anume: alunecarea critică (maximă) s_k și cuplul de rotație critic (maxim) M_k [31]:

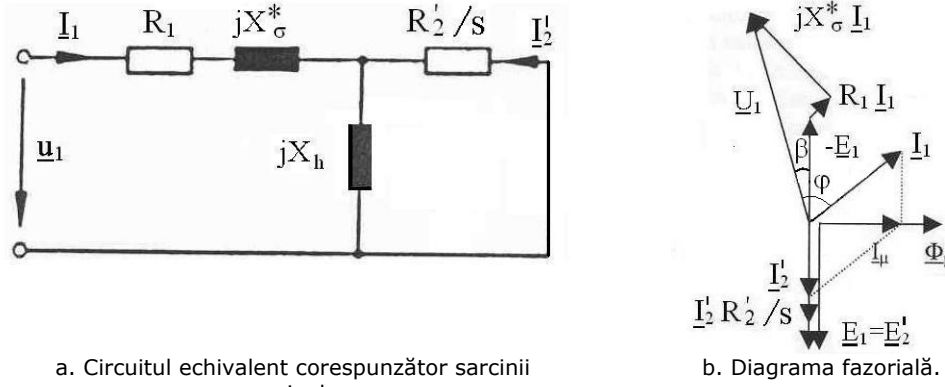
$$s_k = \frac{c_1 R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_\sigma^{*2}}} \quad (1.58)$$

$$M_k = \frac{3U_1^2}{2c_1\Omega_1 \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_\sigma^{*2}} \right)} = \frac{3U_1^2}{2c_1\Omega_1 \left(R_1 + c_1 \frac{R_2'}{s_k} \right)}, \quad (1.59)$$

în care s-a notat:

$$c_1 = 1 + \frac{X_\sigma^*}{X_h}. \quad (1.60)$$

Se poate considera cu o bună aproximație $c_1 = 1$. Diagrama fazorială este reprezentată în figura 1.13.b.



a. Circuitul echivalent corespunzător sarcinii nominale.
 b. Diagrama fazorială.
Figura 1.13. Circuitul echivalent și diagrama fazorială pentru determinarea parametrilor folosind datele de catalog

În schema din figura 1.13.a se consideră reactanța de dispersie statorică și rotorică (combinată) (X_{σ}^*) ca fiind suma dintre reactanța de dispersie statorică ($X_{1\sigma}$) și reactanța de dispersie rotorică redusă la stator ($X'_{2\sigma}$): $X_{\sigma}^* = X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}$

Din triunghiul curenților rezultă expresiile curentului rotoric redus la stator I'_{2n} , respectiv curentul de magnetizare $I_{\mu n}$, pentru punctul nominal de funcționare. În regim nominal de funcționare unghiul β se poate neglija:

$$I'_{2n} = I_{1n} \cos \varphi_{1n}; \quad I_{\mu n} = I_{1n} \sin \varphi_{1n}. \tag{1.61}$$

Se poate calcula alunecarea critică, folosind expresia Kloss:

$$s_k = s_n \left(m_k + \sqrt{m_k^2 - 1} \right); \quad s_n = \frac{(n_1 - n_n)}{n_1}. \tag{1.62}$$

Ținând cont de relația (1.61) se poate determina rezistența rotorică redusă la stator:

$$R'_2 = \frac{s_n P_n}{3(1 - s_n)(I_{1n} \cos \varphi_{1n})^2}. \tag{1.63}$$

Din expresia cuplului maxim (1.59) rezultă rezistența înfășurării statorice:

$$R_1 = \frac{3U_{1n}^2(1 - s_n)}{2c_1 m_k P_n} - \frac{c_1 R'_2}{s_k}. \tag{1.64}$$

Reactanța de dispersie combinată rezultă conform expresiei:

$$X_{\sigma}^{*2} = \left(\frac{c_1 R'_2}{s_k} \right)^2 - R_1^2. \tag{1.65}$$

Având calculat curentul de magnetizare (1.61) se poate calcula reactanța totală statorică X_s și reactanța de magnetizare X_h :

$$X_s = \frac{U_{1n}}{I_{1n}} = X_\sigma^* + X_h; \quad X_h = X_s - X_\sigma^*. \quad (1.66)$$

Toți parametrii rotorici din schema echivalentă pot fi considerați constanți, deoarece pentru frecvențe rotorice $f_r \leq 10$ Hz (pentru alunecări cuprinse între 0 și alunecarea nominală s_n) se poate neglija efectul pelicular. După calculul parametrilor R_1 și R_2' se poate face o iterație pentru calculul mai exact al alunecării maxime și al parametrilor X_s și X_σ^* .

Impedanța totală pentru punctul nominal de funcționare se calculează cu relația [31]:

$$\underline{Z} = \frac{U_1}{\underline{I}_1} = \frac{U_{1n} \cos \varphi_{1n}}{I_{1n}} + j \frac{U_{1n} \sin \varphi_{1n}}{I_{1n}}, \quad (1.67)$$

în care componentele active și reactive ale impedanței se calculează utilizând formulele:

$$\frac{U_{1n} \cos \varphi_{1n}}{I_{1n}} = R_1 + \frac{X_h^2 \frac{R_2'}{s_n}}{\left(\frac{R_2'}{s_n}\right)^2 + X_h^2}, \quad (1.68)$$

$$\frac{U_{1n} \sin \varphi_{1n}}{I_{1n}} = X_\sigma^* + \frac{X_h \left(\frac{R_2'}{s_n}\right)^2}{\left(\frac{R_2'}{s_n}\right)^2 + X_h^2}, \quad (1.69)$$

Dacă rezistențele R_1 și R_2' sunt cunoscute, rezultă reactanțele X_σ^* și X_h [31]:

$$X_h = \frac{\frac{R_2'}{s_n} \sqrt{\frac{U_{1n} \cos \varphi_{1n}}{I_{1n}} - R_1}}{\sqrt{\frac{R_2'}{s_n} - \frac{U_{1n} \cos \varphi_{1n}}{I_{1n}} + R_1}}, \quad (1.70)$$

$$X_\sigma^* = \frac{U_{1n} \sin \varphi_{1n}}{I_{1n}} - \frac{X_h \left(\frac{R_2'}{s_n}\right)^2}{\left(\frac{R_2'}{s_n}\right)^2 + X_h^2}. \quad (1.71)$$

Pentru calculul parametrilor mașinii de inducție din datele de catalog se cunosc și formule empirice, bazate pe experiența în construcția motoarelor de inducție [91].

De exemplu, estimarea valorii tensiunii electromotoare indusă, statorică E_s și a curentului rotoric nominal I_{2n} se poate face cu relațiile:

$$E_s = \left(0,97 - \frac{0,08}{\sqrt[3]{P_n}} \right) U_n ; \quad (1.72)$$

$$I_{2n} = \frac{1,015 P_n}{3 E_s (1 - s_n)} . \quad (1.73)$$

Rezistența rotorică se poate calcula cu formula:

$$R_2 = \frac{s_n M_n}{I_{2n}^2} ; \quad (1.74)$$

Se poate considera pentru început că rezistența statorică este egală cu rezistența rotorică:

$$R_1 = R_2 . \quad (1.75)$$

Reactanța de dispersie statorică corespunzătoare sarcinii nominale este:

$$X_{1\sigma} = \frac{U_n - E_s - I_n R_1 \cos \varphi_n}{I_n \sin \varphi_n} \left(0,97 - \frac{0,08}{\sqrt[3]{P_n}} \right) U_n . \quad (1.76)$$

Alunecarea critică este:

$$s_k = \frac{m_k + \sqrt{m_k^2 - 1 - 2s_n(1 - m_k)}}{1 + 2s_n(1 - m_k)} s_n . \quad (1.77)$$

Rezultă reactanța rotorică:

$$X_{2\sigma} = R_2 \sqrt{\left(\frac{1}{s_k} \right)^2 - 1} - X_{1\sigma} . \quad (1.78)$$

Pentru curentul de funcționare în gol se poate folosi ecuația:

$$I_0 = I_n \left[-1,4525 \ln(P_n) + k(p) \right] . \quad (1.79)$$

în care $k(p)$ este o constantă a cărei valoare, dependentă de numărul de perechi de poli p , este dată în tabelul 1.1 [91].

Tabelul 1.1. Dependența constantei $k(p)$ de numărul de perechi de poli p .

p	1	2	3	4	5	6	7	≥ 8
$k(p)$	33,8	36,7	40,4	46,0	50,8	53,8	56,5	58,8

Valoarea reactanței de magnetizare se poate estima cu relația:

$$X_h = \frac{\sqrt{U_n^2 - (I_0 R_1)^2}}{I_0} - X_{1\sigma} . \quad (1.80)$$

1.4.4. Determinarea parametrilor mașinii de inducție prin metoda erorilor

Modelul analitic al motorului de inducție este reprezentat de sistemul de ecuații al circuitului echivalent, în care se consideră cunoscuți parametrii motorului

și tensiunile aplicate înfășurărilor. Prin rezolvarea sistemului de ecuații se determină curenții din înfășurările motorului de inducție, în regim staționar, sau regim dinamic. În regim dinamic se obțin curenții, prin rezolvarea sistemului de ecuații, ca funcții reale de timp $i(t)$. Pentru rezolvarea sistemului de ecuații se folosesc metode matematice analitice, sau numerice.

Funcțiile variabile în timp ale curenților care rezultă ca soluții din rezolvarea sistemului de ecuații depind direct de parametrii motorului introduși în ecuații (parametri considerați cunoscuți). Cu alte cuvinte, cu cât valorile parametrilor sunt cunoscute cu mai multă precizie, cu atât curenții obținuți sunt mai apropiați de cei reali.

Aceeași problemă poate fi privită sub un alt aspect și anume: într-un model real (fizic) al unui motor de inducție la care nu se cunosc parametrii, se pot înregistra experimental valorile tensiunilor aplicate la bornele înfășurărilor și ale curenților prin înfășurări, ca funcții de timp. Curenții trebuie considerați reali, întrucât modelul a fost real (intervin doar erorile de măsurare).

Ținând seama de cele prezentate mai sus, se poate imagina următoarea metodă de determinare a parametrilor motorului de inducție. În modelul matematic al motorului de inducție se introduc seturi de parametri (valori oarecare) cu ajutorul cărora se determină din sistemul de ecuații curenții ca funcție de timp. Aceste funcții vor avea valori mai mult sau mai puțin apropiate de valorile măsurate experimental pe modelul fizic. Este evident că, la limită, când valorile funcțiilor calculate se suprapun peste valorile înregistrate experimental (sunt egale cu acestea) înseamnă că setul de parametri introduși în model este corect, adică parametrii respectivi au valori apropiate de cele reale. Acesta este principiul metodei.

Pentru punerea în aplicare sunt necesare câteva explicații suplimentare.

În cazuri reale, întotdeauna există posibilitatea de a aprecia valorile fiecărui parametru din modelul fizic, valori cuprinse între anumite limite. Aceste limite pot fi luate destul de largi întrucât timpul de calcul, prin folosirea ordinaratoarelor performante, este redus. Între aceste limite (minim și maxim) se consideră un număr oarecare de pași, suficient de mare, pentru fiecare parametru. Fiecare set de parametri se formează prin considerarea câte unei valori din fiecare interval. Dacă timpul de calcul nu este inacceptabil de mare, pot fi luate în considerare toate combinațiile posibile.

Funcțiile rezultate din calcul se vor nota cu indice c , iar funcțiile determinate experimental se vor nota cu indicele m . Pe lângă tensiune și curent se mai poate lua în considerare atât turația, cât și cuplul, care se poate de asemenea înregistra din experiment și calcula pe model.

Pentru a compara soluția calculată cu soluția înregistrată din experiment se urmărește găsirea unui criteriu obiectiv. Suprapunerea totală a celor două funcții (calculată și înregistrată) e greu de obținut și din acest motiv s-a propus o funcție criterială care să reprezinte suma erorilor, adică a diferențelor dintre valoarea calculată și valoarea înregistrată, pe un interval oarecare de timp. Setul de valori care minimizează această sumă reprezintă parametrii cei mai apropiați de valorile lor reale. Cu alte cuvinte, s-a obținut o metodă de determinare prin încercări a parametrilor.

Expresia funcției criteriale care trebuie minimizată diferă de la autor la autor, cum se va vedea în continuare.

Funcția obiectiv S poate fi considerată sub forma următoare [15]:

$$S = \sum_{i=1}^n (I_{mi} - I_{ci})^2. \quad (1.81)$$

unde I_{mi} și I_{ci} reprezintă valoarea măsurată, respectiv valoarea calculată a curentului, pentru același moment de timp.

În figura 1.14 se prezintă schema de principiu a procesului estimării parametrilor prin metoda erorilor. Parametrii motorului se ajustează până la minimizarea funcției obiectiv S . Pentru o anumită tensiune aplicată la bornele motorului de inducție rezultă o valoare măsurată I_{mi} din experimentul la care este supus motorul de inducție real și o valoare calculată I_{ci} din modelul motorului de inducție. Pe baza acestor valori se calculează funcția obiectiv. Urmează o ajustare a parametrilor motorului, după care se calculează o nouă valoare pentru I_{ci} , de unde rezultă o nouă valoare pentru funcția obiectiv. Se repetă acest ciclu până când se obține un minim pentru funcția obiectiv, ceea ce corespunde unui set de parametri „optimizați”, care se apropie cel mai mult de parametrii reali ai motorului.

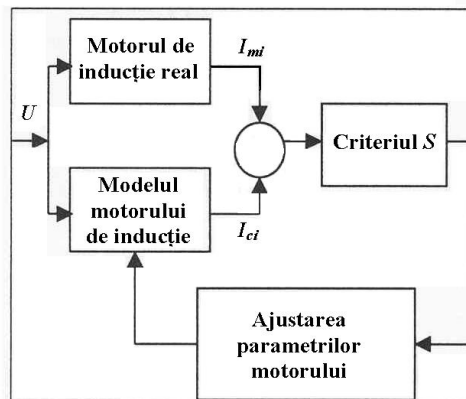


Figura 1.14. Principiul procesului de estimare a parametrilor prin metoda erorilor [15].

În figura 1.15 se prezintă valorile calculate (cu linie întreruptă) și valorile înregistrate (cu linie continuă) ale curentului absorbit de un motor de inducție la pornirea în gol; suprapunerea celor două reprezentări se datorează setului de parametri „optimi” ai motorului, obținuți conform algoritmului din figura 1.14, prin minimizarea funcției obiectiv (1.81).

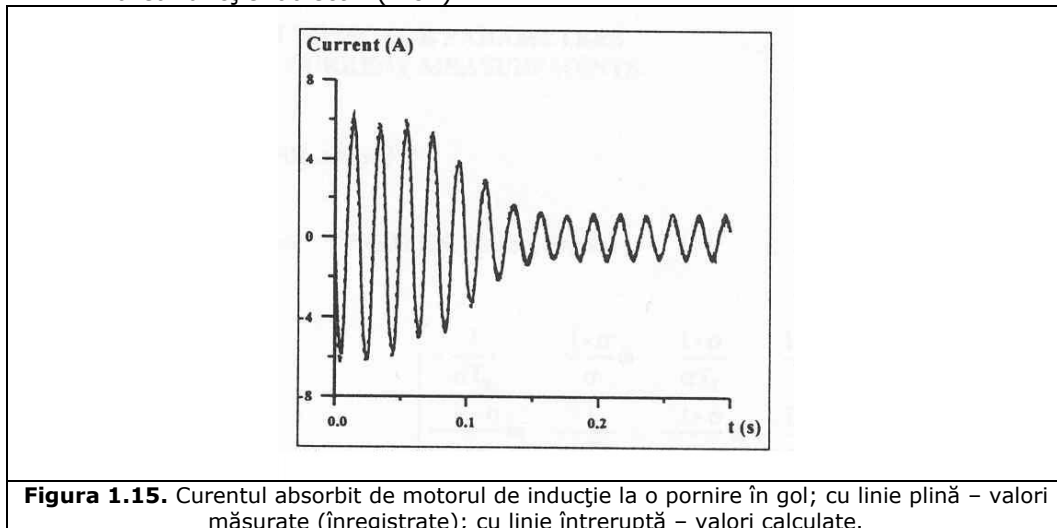


Figura 1.15. Curentul absorbit de motorul de inducție la o pornire în gol; cu linie plină – valori măsurate (înregistrate); cu linie întreruptă – valori calculate.

În [17] funcția obiectiv are următoarea formă:

$$S = \int_0^{t_{\max}} [(i_m - i_c)^2 + k(n_m - n_c)^2] dt. \quad (1.82)$$

în care k – este o pondere aleasă convenabil; i_m și i_c – valoarea măsurată (înregistrată) a curentului respectiv valoarea calculată a curentului, la același moment de timp t , iar n_m și n_c – valoarea măsurată respectiv calculată a vitezei de rotație a arborelui motorului, la același moment de timp.

Cu alte cuvinte, funcția obiectiv va fi minimă atunci când ariile delimitate de graficele curentului (cel înregistrat experimental și cel calculat din model), respectiv când ariile dintre graficele vitezelor de rotație (înregistrate experimental și calculate) sunt minime.

Se prezintă în figura 1.16 variația cuplului de rotație în funcție de timp, în procesul pornirii în gol a motorului de inducție [17]; cu linie continuă s-au reprezentat valorile înregistrate, iar cu linie întreruptă s-au reprezentat valorile calculate. Se poate constata din figură modul în care valorile calculate se apropie de cele măsurate. Și în acest caz, pentru un anumit set de valori ale parametrilor, funcția obiectiv devine minimă.

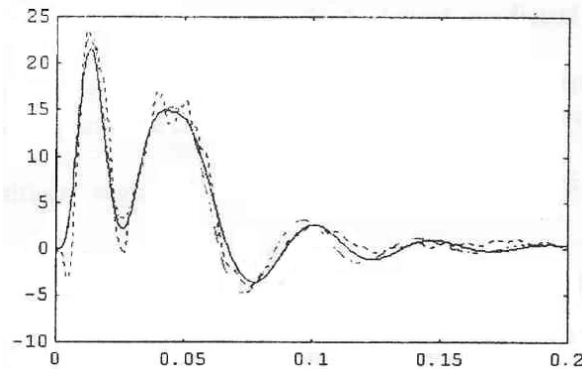


Figura 1.16. Cuplul de rotație în funcție de timp, în procesul pornirii în gol; cu linie continuă – valori măsurate; cu linie întreruptă – valori calculate.

Înregistrarea tensiunilor, curenților, turației, și cuplului din experiment se poate face utilizând un sistem de achiziție și prelucrare a datelor, bazat pe un ordinator de tip PC. Calculul parametrilor și apoi simularea pe modele se poate face utilizând medii de programare precum MATLAB.

1.4.5. Utilizarea fazorilor rotitori

Fazorii rotitori se pot utiliza la determinarea caracteristicilor mașinii de inducție.

Determinarea fazorilor se poate face în mărimi de fază, sau folosind mărimile în coordonate dq.

Expresiile componentelor $i_{d'}$, $i_{q'}$ ale fazorilor curenților în coordonate dq, scrise în funcție de valoarea momentană a curenților prin fazele principale (i_a , i_b , i_c), sunt următoarele:

$$i_{d'} = \sqrt{\frac{2}{3}}i_a - \frac{1}{\sqrt{6}}i_b - \frac{1}{\sqrt{6}}i_c; \quad i_{q'} = \frac{1}{\sqrt{2}}i_b - \frac{1}{\sqrt{2}}i_c. \quad (1.83)$$

Rezultă fazorul lui Park sub forma următoare:

$$\dot{i}_s = \dot{i}_d + j\dot{i}_q. \quad (1.84)$$

În condiții ideale (variații sinusoidale în timp pentru cei trei curenți de fază) se obțin următoarele componente:

$$i_d = \frac{\sqrt{6}}{2} I \sin \omega t; \quad i_q = \frac{\sqrt{6}}{2} I \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \quad (1.85)$$

în care I -reprezintă valoarea maximă a curentului prin faza motorului (A), $\omega=2\pi f$ - pulsația (rad/s), iar t - este variabila timp (s).

Locul geometric al vârfului acestui fazor este un cerc centrat în originea axelor de coordonate. În aceste condiții, modulul fazorului Park este constant.

În [70] se prezintă componentele fazorilor rotitori ai tensiunii pe cele trei faze, scrise în mărimi de fază, în felul următor:

$$V_a = (v_a - v_0) + jv_{ia}; \quad V_b = (v_b - v_0) + jv_{ib}; \quad V_c = (v_c - v_0) + jv_{ic}, \quad (1.86)$$

în care componenta homopolară este

$$v_0 = \frac{1}{3}(v_a + v_b + v_c). \quad (1.87)$$

Componenta reală a fazorului momentan, corespunzător celor trei faze (notate v_{ra}, v_{rb}, v_{rc}), reprezintă diferența dintre valoarea instantanee și componenta homopolară, ca în relația de mai jos:

$$v_{ra} = v_a - v_0; \quad v_{rb} = v_b - v_0; \quad v_{rc} = v_c - v_0. \quad (1.88)$$

Componenta imaginară a fazorului momentan, pentru cele trei faze ale mașinii (notate v_{ia}, v_{ib}, v_{ic}), obțin forma următoare:

$$v_{ia} = \frac{v_b - v_c}{\sqrt{3}}; \quad v_{ib} = \frac{v_c - v_a}{\sqrt{3}}; \quad v_{ic} = \frac{v_a - v_b}{\sqrt{3}}. \quad (1.89)$$

Modulul fazorului momentan V , rezultă:

$$|V_a| = |V_b| = |V_c| = V, \quad (1.90)$$

în care

$$V = \sqrt{\frac{2}{9}[(v_a - v_b)^2 + (v_b - v_c)^2 + (v_c - v_a)^2]}. \quad (1.91)$$

Se poate scrie, de exemplu pentru faza **a**, modulul fazorului momentan, V , sub forma:

$$V = \sqrt{(v_a - v_0)^2 - v_{ia}^2}. \quad (1.92)$$

În figura 1.17 este prezentată variația în timp a tensiunii pe cele trei faze (a), respectiv a curentului unui motor de inducție (b), în sarcină nominală. Se observă că tensiunea este puțin dezechilibrată, iar curentul este semnificativ dezechilibrat. Traiectoria fazorilor instantanei ai tensiunilor este arătată în figura 18.a, respectiv ai curenților în figura 18.b. Se observă că și traiectoriile fazorilor se îndepărtează de la cerc cu cât variația în timp se îndepărtează mai mult de sinusoidă.

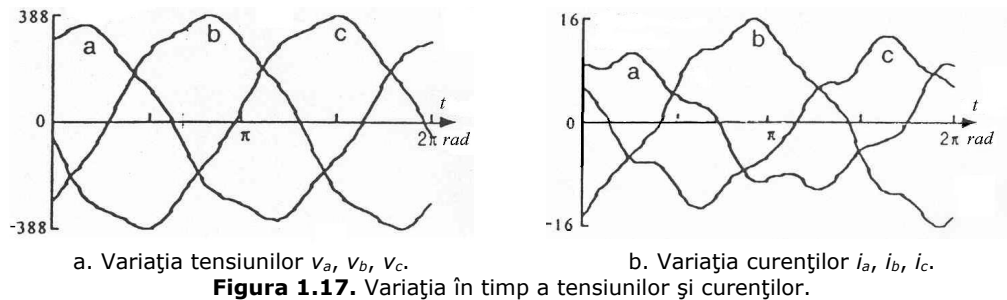


Figura 1.17. Variația în timp a tensiunilor și curenților.

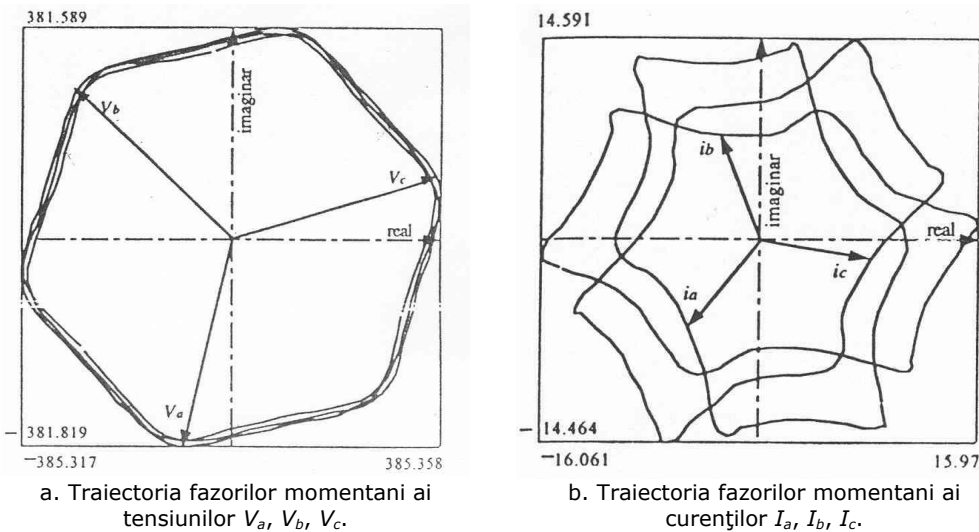


Figura 1.18 Traectoria fazorilor rotitori ai tensiunilor respectiv curenților.

Conform [20] studiul traiectoriei fazorilor rotitori poate fi folosită la diagnoza mașinii de inducție. De asemenea, folosind calculul fazorilor rotitori se poate determina caracteristica randamentului mașinii de inducție [43].

1.5. Concluzii

Deși se admit anumite ipoteze simplificatoare în teoria mașinilor electrice, ecuațiile mașinilor de curent alternativ (alături de modelele de circuit) descriu cu precizie suficientă comportarea mașinii în diferite regimuri de funcționare, dacă parametrii sunt stabiliți în mod corect. Problema determinării parametrilor mașinii de inducție este foarte importantă și se prezintă sub două aspecte:

- teoretic, pentru stabilirea unor relații de calcul al parametrilor, necesare în etapa de proiectare;
- practic, pentru elaborarea unor metode de măsurare directă, sau indirectă a parametrilor.

Bibliografia analizată cu această ocazie scoate în evidență faptul că se acordă tot mai mare atenție metodelor de măsurare, sau estimare a parametrilor. Acest fapt este explicabil prin dezvoltarea și aplicarea pe scară tot mai largă a acționărilor electrice reglabile cu motoare de inducție trifazate. Algoritmii de reglare și comandă utilizează modelul teoretic al motorului (ecuațiile de regim dinamic) care necesită cunoașterea parametrilor motorului care urmează să fie comandat. Se știe că acești

parametri sunt dependenți în timpul funcționării motorului de anumite fenomene (saturația magnetică, efectul pelicular, efectul termic, etc.) care modifică valorile unor parametri. Din acest motiv s-a și pus problema determinării „on line” a acestor parametri, pentru corectarea continuă a modelului teoretic, în vederea obținerii unor scheme de acționare performante, cu viteze mari de răspuns.

Metodele de determinare a parametrilor prezentate în lucrare sunt metode de laborator, iar unele din ele pot fi aplicate numai dacă se dispune de sisteme adecvate de achiziție și prelucrare a datelor; sunt metode de regim permanent, sau regim tranzitoriu, care se bazează pe înregistrarea valorilor momentane ale unor mărimi din proces.

Capitolul 2

Sisteme de achiziție și prelucrare a datelor pentru testarea mașinilor electrice

Perfecționarea continuă a mijloacelor de măsurare și noile descoperiri științifice și tehnice sunt într-o continuă stimulare reciprocă.

Efectuarea de măsurători experimentale este o activitate importantă, nelipsită în cadrul oricărui domeniu al științei, sau tehnicii. Măsurătorile și determinările experimentale sunt necesare și folosite pentru studiul unor fenomene fizice, pentru verificarea unor modele teoretice, pentru urmărirea unor parametrii ce caracterizează funcționarea unor echipamente, sau desfășurarea unor procese.

Prin măsurare se verifică ipotezele, ceea ce conduce de multe ori la dobândirea unor cunoștințe noi.

Cunoașterea parametrilor mașinilor și echipamentelor electrice este o preocupare perpetuă atât a producătorilor cât și a utilizatorilor acestor echipamente. Având la dispoziție mijloace de măsură performante, pe de-o parte producătorul poate să intervină în timpul fluxului de fabricație pentru îmbunătățirea parametrilor mașinilor și echipamentelor pe care le produce, printr-o proiectare constructivă și tehnologică adecvată, iar pe de altă parte utilizatorul echipamentelor poate să intervină pentru exploatarea în condiții de randament maxim și de siguranță crescută.

Evoluția din domeniul tehnicii de calcul a dus la răspândirea ordinarilor electronice performante și relativ ieftine în toate domeniile vieții cotidiene.

Ordinătorului electronic a însemnat un progres notabil în ceea ce privește mijloacele de măsurare. La început ordinatorul era utilizat doar pentru stocarea și prelucrarea datelor provenite din măsurători. Măsurătorile se efectuau cu mijloace clasice de măsurare, iar operatorul introducea datele în ordinator, pentru diverse prelucrări necesare.

Dezvoltarea convertoarelor analog-numeric a permis conectarea ordinătorului direct la procesele din care interesează măsurarea mărimilor. Astfel a luat naștere conceptul de **Sistem de Achiziție și Prelucrare a Datelor (SAPD)**, ceea ce reprezintă pasul înainte făcut în domeniul sistemelor și mijloacelor de măsurare, prin dotarea ordinătorului electronic atât cu interfețe de măsură care sunt capabile să cuantizeze semnalele provenite de la diverse transductoare, din proces, cât și cu seturi de programe care permit prelucrarea datelor în conformitate cu diferiți algoritmi impuși de utilizatori. Ca urmare, ordinatorul efectuează atât măsurarea cât și prelucrarea datelor, operatorul uman obținând din proces rezultatele în mod direct.

În ultimul timp, din ce în ce mai mult, ordinatorul, dotat cu echipamente periferice de intrare/ieșire, pe care rulează software specializat, înlocuiește instrumentele de măsură, testare și de înregistrare a datelor. De obicei software-le specializat implementat pe ordinator are o interfață grafică ce se aseamănă cu un panou frontal al unui aparat de măsură clasic, astfel încât în acest caz se folosește termenul de Instrumentație Virtuală, ansamblul acționând și arătând ca și un instrument de măsură obișnuit.

2.1 Elemente generale privind Sistemele de Achiziție și Prelucrare a Datelor

Sistemele de Achiziție și Prelucrare a Datelor (SAPD) reprezintă un concept relativ nou în domeniul sistemelor de măsură și prelucrare a datelor experimentale. Aceste sisteme conțin o structură hardware și o structură software.

Elementul central al oricărui SAPD poate fi un microcalculator de tip PC de uz general.

Resursele minimale ale unui microcalculator pe nucleul căruia se poate realiza un SAPD sunt:

- unitate centrală (PC-CPU), echipată cu unul din microprocesoarele Intel 286, Intel 386 sau mai puternic, cu posibilitatea utilizării coprocesorului corespunzător. Aplicația în domeniul mașinilor electrice poate fi realizată utilizând resursele puterii de calcul asigurate de procesorul Intel 286;
- memorie internă (minim între 1 și 4 Mocteți);
- unități de disc flexibil (sau alte unități de scriere a datelor pe suport magnetic, optic, etc.);
- unități de disc fix de capacitate minimă 80 Mocteți;
- unul sau mai multe porturi paralele (de tip Centronics) din care cel puțin două deservite direct de sistemul de operare;
- monitor grafic pentru afișarea rezultatelor;
- posibilitatea utilizării de pachete software sub sistemul MS-DOS, sau alte sisteme de opere.

În plus față de aceste resurse sistemul conține un Modul de Achiziție de Date (MAD)

Schema bloc a SAPD este prezentată în figura 2.1.

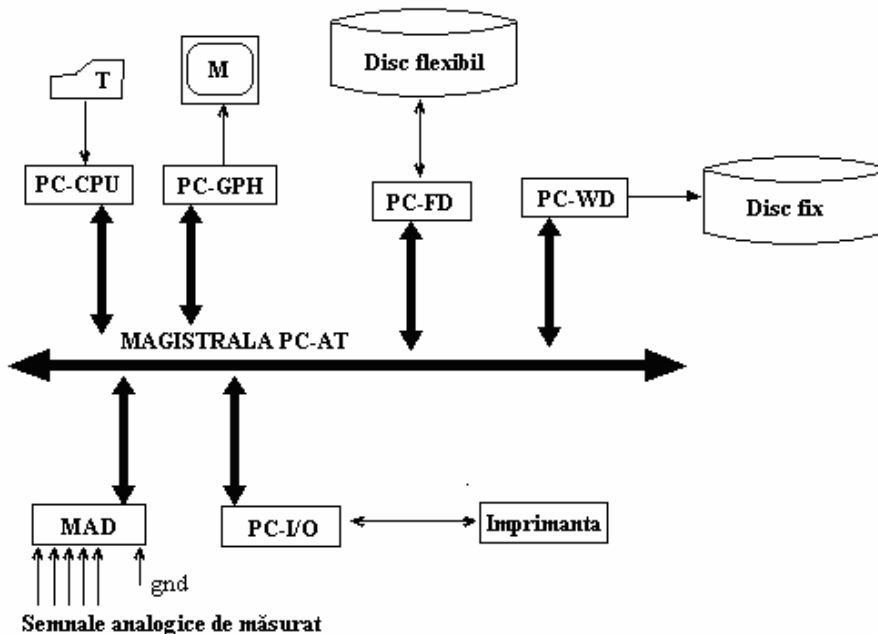


Figura 2.1. Schema bloc a unui Sistem de Achiziție și Prelucrare a Datelor.

2.1.1. Definierea și funcțiile principalelor componente ale unui sistem de achiziție și prelucrare a datelor

Sistemul de Achiziție și Prelucrare a Datelor (SAPD) este un ansamblu hardware și software construit pe structura unui microcalculator de tip PC, capabil să măsoare mărimi provenite din experimente, sau din procese industriale la care este conectat, mărimi care sunt folosite apoi la calculul parametrilor ce interesează în procesul respectiv. Achiziția mărimilor de intrare se face automat de către SAPD prin intermediul rutinelor de achiziție specifice, iar prelucrarea se face după algoritmi implementați în programele de prelucrare.

Cunoașterea unei mărimi înseamnă alocarea unei valori numerice obiectului măsurării reprezentat de măsurand, ce este caracterizat prin amplitudine și evoluția în timp.

O mărime de intrare, care are o anumită variație (evoluție) în timp, pentru a fi măsurată, trebuie să fie eșantionată. Eșantionarea reprezintă procesul de selectare a unei mulțimi finite de valori ale unui semnal continuu (S), în scopul obținerii unui semnal discret care să-l poată reprezenta pe (S). Eșantionarea constă în cunoașterea valorii semnalului de măsurat la momente determinate de timp. Această valoare se memorează. De obicei în practică eșantionarea este efectuată la intervale egale de timp cu perioada T_e , ce se numește perioadă de eșantionare.

Un Sistem de Achiziție și Prelucrare a Datelor trebuie să permită, în afara funcțiilor oferite de un microcalculator de tip PC, în principal următoarele:

- achiziționarea valorilor momentane ale mărimilor de intrare, prin eșantionare;
- stocarea valori momentane pentru prelucrări ulterioare, după încheierea procesului de măsurare (off-line);
- prelucrarea valorilor momentane rezultate din măsurare, în timpul procesului de măsurare (on-line), după diferiți algoritmi impuși de operator;
- stocarea rezultatelor prelucrărilor datelor experimentale on-line, sau offline;
- prelucrări grafice în scopul obținerii unor corelații între mărimile achiziționate, sau prelucrate (calculate).

Pentru a putea fi utilizat la efectuarea de măsurători și la supravegherea proceselor fizice, SAPD trebuie să răspundă anumitor cerințe, după cum urmează:

Semnalele analogice de măsurat ce provin din proces, pentru a putea fi operate de microprocesor, trebuie să fie transformate în semnale numerice. Acest lucru se întâmplă la nivelul Modulului de Achiziție de Date (MAD), care conține un convertor analog-numeric.

Pentru că nivelul admis al semnalului de intrare în MAD este impus (de obicei se admite semnal de tensiune în plaja de valori $-10 \div +10$ V; sau $0 \div 5$ V; sau $-5 \div +5$ V), semnalele analogice de măsurat necesită o adaptare, ceea ce se realizează într-un Bloc de Traductoare și Adaptare Semnale Analogice (BTASA); acest bloc conține de asemenea și traductoarele pentru mărimile analogice care se doresc a fi măsurate.

Un SAPD poate fi privit ca un ansamblu format dintr-o mulțime de aparate de măsură. De exemplu, dacă se consideră măsurarea tensiunii electrice, unele aparate realizează măsurarea valorii efective, altele valoarea medie, altele valoarea medie redresată. Folosind un SAPD, se achiziționează valorile momentane pe o perioadă, sau mai multe perioade de timp (dacă semnalul este periodic); având valorile momentane, se poate reprezenta în timp variația tensiunii și de asemenea se pot calcula parametrii semnalului de tensiune respectiv valoarea medie, valoarea

efectivă, frecvența dacă semnalul este periodic. În plus, dacă este necesar, se poate face o analiză armonică, sau alte prelucrări ce se consideră necesare.

Avantajele folosirii SAPD sunt următoarele:

- efectuarea automată de măsurători cu viteză mare și extrem de precise asupra mărimilor analogice; viteze de 20.000 măsurători (eșantionări) pe secundă fiind considerate deja viteze mici, ușor de obținut;
- posibilitatea înregistrării rezultatelor măsurătorilor pe suporturi de memorie externă, în vederea stocării și eventual a prelucrării ulterioare a rezultatelor experimentale;
- posibilitatea prelucrării rapide și precise a rezultatelor experimentale;
- realizarea într-un timp extrem de redus a măsurătorilor, urmărind un număr mare de mărimi, cu posibilitatea prelucrării ulterioare, prelucrări care nu ar putea fi realizate folosind mijloace clasice de măsură (separarea de armonici, prelucrarea după mijloace moderne a regimurilor tranzitorii);
- supravegherea unor parametri și declanșarea unor alarme ierarhizate, sau a unor comenzi.

2.1.2. Structura hardware a unui sistem de achiziție și prelucrare a datelor

Structura unui sistem de achiziție și prelucrare a datelor, care prezintă și elemente de execuție și control, este prezentat în figura 2.2 [46].

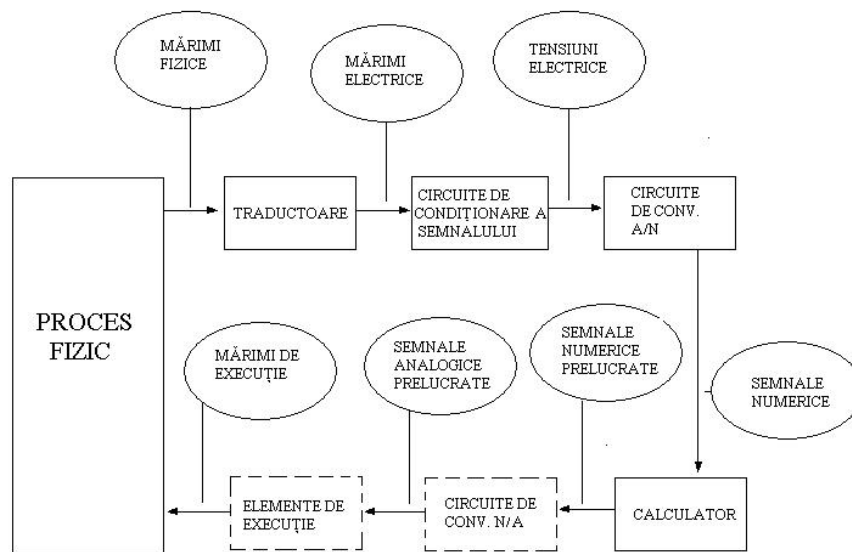


Figura 2.2. Structura unui Sistem de Achiziție și Prelucrare a Datelor

Traductoarele transformă mărimile fizice de intrare în mărimi electrice, ce sunt convertite în tensiuni electrice prin intermediul unor circuite de condiționare a semnalelor.

Circuitele de condiționare a semnalelor sunt utilizate indiferent de traductoarele folosite, având rolul de a amplifica, atenua, filtra, izola și/sau multiplexa semnalele aplicate la intrare. Condiționarea semnalului poate îmbunătăți precizia, eficacitatea și siguranța măsurătorilor.

Circuitele de conversie analog/numerică realizează conversia semnalelor analogice (de obicei tensiune) în semnale numerice care pot fi prelucrate de calculatorul numeric, având următoarele funcții: multiplexarea, eșantionarea și memorarea, conversia analog-numerică, numărare, temporizare.

Opțional, SAPD poate fi echipat cu circuite de conversie numeric/analogică și cu elemente de execuție.

Circuitele de conversie numeric-analogică realizează conversia semnalelor numerice în semnale analogice, permițând realizarea următoarelor funcții: demultiplexarea, conversia numeric-analogică, eșantionare și memorare, filtrare.

Elementele de execuție permit controlul proceselor fizice prin intermediul mărimilor de execuție și pot fi: dispozitive de afișare, relee, electrovalve, etc.

Calculatorul prelucrează numeric semnalele și realizează controlul funcționării celorlalte componente ale sistemului de achiziție de date și control.

Schema bloc cu principalele părți componente ale unui Sistem de Achiziție și Prelucrare a Datelor

Schema bloc cuprinzând principalele părți componente ale unui Sistem de Achiziție și Prelucrare a Datelor (SAPD) este prezentată în figura 2.3.

Mărimile de măsurat sunt conectate la SAPD prin intermediul unui Bloc de Traductoare și Adaptare a Semnalelor Analogice (BTASA), bloc ce conține senzori și traductoare (T) pentru mărimile care se doresc a se măsura. Mărimile de ieșire ale acestui bloc sunt mărimi electrice, compatibile cu intrarea Modulului de Achiziție de Date (MAD). Mărimile de intrare ale BTASA, care pot fi de orice natură, sunt transformate în mărimi electrice și apoi sunt adaptate (prin intermediul adaptoarelor de semnal AS) pentru a fi compatibile cu nivelul de intrare al MAD. Fiecărei mărimi de măsurat m i se asociază un senzor, sau traductor, al cărui rol este de a converti mărimea de măsurat într-o altă mărime fizică s (de obicei tensiune), printr-o funcție cunoscută, care depinde de mărimea de măsurat, $s(m)$.

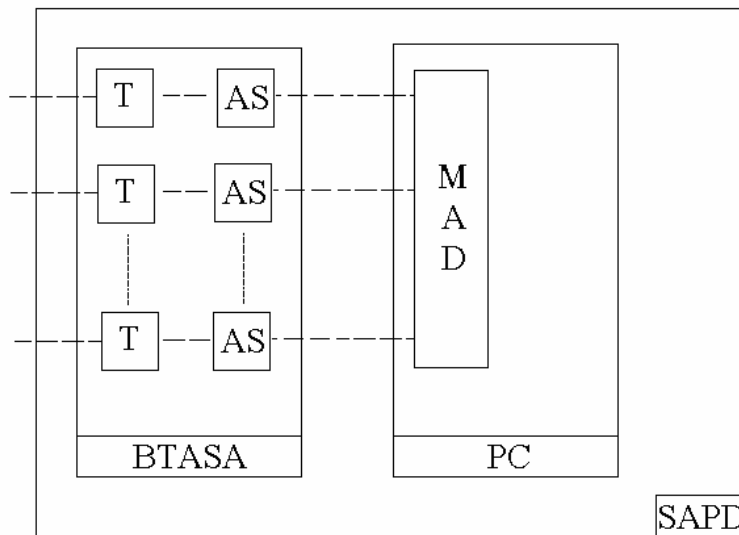


Figura 2. 3. Schema bloc a principalelor componente ale unui Sistem de Achiziție și Prelucrare a Datelor

Modulul de Achiziție de Date (MAD) realizează conversia semnalelor analogice de intrare în date numerice, cu care procesorul sistemului de calcul poate să opereze.

Toate aceste elemente sunt comandate de un sistem de calcul numeric, în care sunt implementate pachete de programe, specifice pe aplicații, care se constituie în structura software a SAPD.

Modulul de Achiziție de Date (MAD)

Modulele de Achiziție de Date (MAD) reprezintă dispozitive electronice hibride (analogice, sau digitale) ce au ca rol principal interfațarea/adaptarea între semnalele numerice cu care operează procesorul calculatorului numeric (sau echipamentele numerice de comandă și control) și semnalele ce provin din mediul înconjurător, în marea lor majoritate semnale analogice.

Interfața de comunicații cu calculatorul gazdă poate fi implementată printr-o conexiune directă a MAD la magistrala sistem a calculatorului (de exemplu standardele PCI, ISA, VESA, PCMC), caz în care MAD este o placă de extensie a calculatorului (add-on board).

Schema de principiu a Modulului de Achiziție de Date MAD este prezentată în figura 2.4 [63].

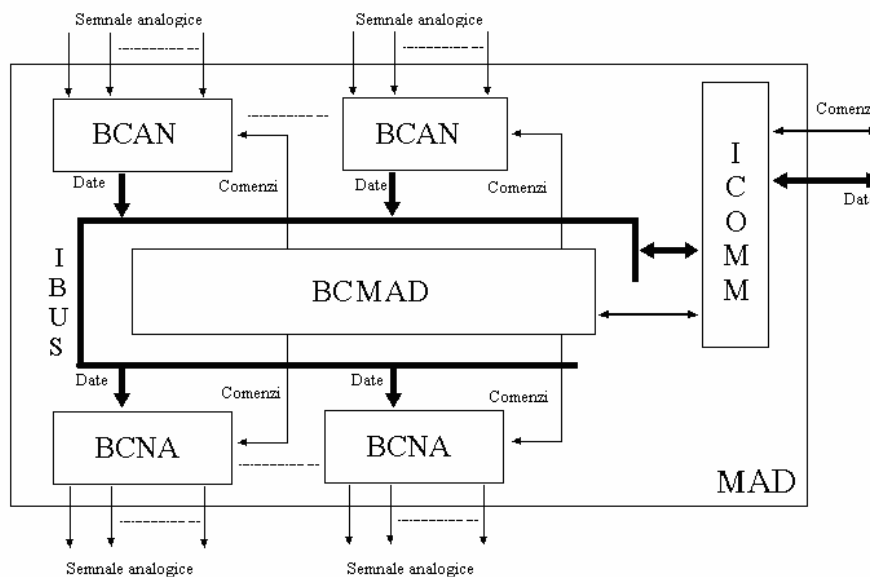


Figura 2.4. Schema de principiu a Modulului de Achiziție de Date

În mod obișnuit Modulul de Achiziție de Date are în componență următoarele blocuri funcționale:

- unul sau mai multe blocuri de conversie analog numerică a semnalelor (BCAN);
- unul sau mai multe blocuri de conversie numeric-analogică a semnalelor (BCNA);
- un bloc de comandă și control (BCMAD);
- o magistrală internă pentru date, adrese și comenzi (IBUS);

- o interfață de comunicare cu sistemul numeric care supervizează operarea MAD, interfață prin care se schimbă comenzi și date între sisteme (ICOMM).

Interfața de comunicații cu calculatorul gazdă este implementată de obicei sub formă de legătură de date și comenzi de tip serială sau paralelă.

Blocul de conversie analog-numerică (BCAN)

Semnalele analogice de intrare sunt convertite în semnale binare în blocul de conversie analog-numerică BCAN. Schema de principiu a blocului de conversie analog-numerică (BCAN) este prezentată în figura 2.5 [63].

Semnalele analogice care provin din proces sunt condiționate în blocul de condiționare a semnalelor analogice (BCSA). Condiționarea constă în adaptarea de impedanțe pe canalele de intrare și modificarea domeniului de variație a mărimii electrice de intrare, prin atenuare sau amplificare ce se realizează cu amplificatoare cu câștig programat. Blocul de condiționare este comandat prin comanda nivelului amplificării (*Comanda Amplificării*). Circuitele de condiționare pot realiza și alte funcții precum: filtrare, izolare galvanică, etc.

Semnalele rezultate sunt multiplexate în timp, rezultând la un moment dat pe linia U_{IN} tensiunea corespunzătoare unui canal analogic de intrare. Multiplexorul analogic MUX este comandat prin linii de selecție a semnalelor de intrare (*Selecția intrării*).

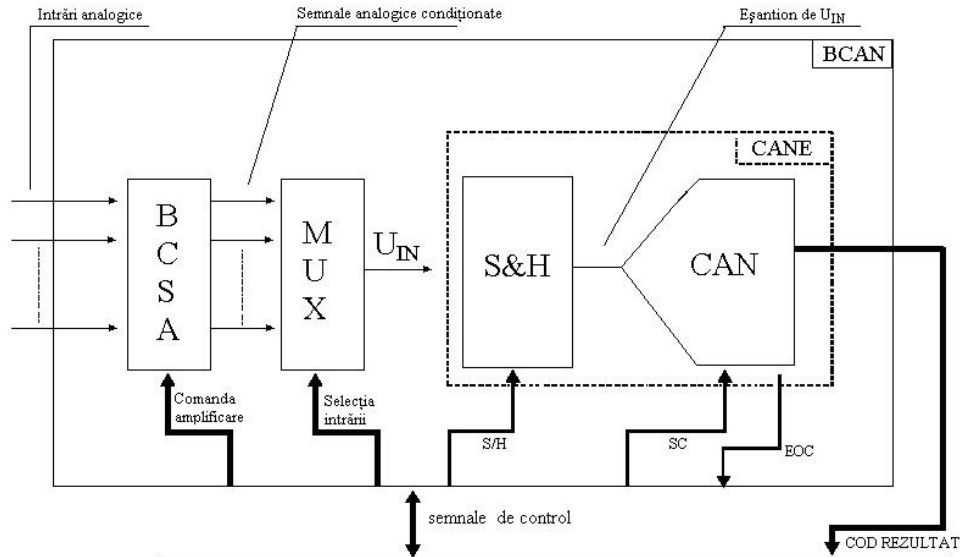


Figura 2.5. Schema de principiu a BCAN

Multiplexorul analogic se folosește în scopul reducerii costului sistemului. Există și posibilitatea folosirii unui CAN pentru fiecare mărime analogică de la intrare, caz în care nu se mai utilizează multiplexorul analogic.

De regulă multiplexorul are 16 intrări, ceea ce permite obținerea a 16 canale asimetrice (cu referențialul față de masă), sau 8 canale diferențiale (flotante).

Tensiunea U_{IN} ce rezultă la ieșirea multiplexorului analogic este preluată în continuare de circuitul de eșantionare și memorare (S&H), care poate fi un circuit distinct, sau este inclus în arhitectura convertorului analog-numeric. În acest ultim caz se folosește un convertor analog-numeric cu eșantionare (CANE).

Rezultatul conversiei analog-numeric este un cod binar (COD) ce corespunde tensiunii de intrare U_{IN} .

Controlul CAN se realizează prin intermediul a două linii: *Start Conversion* (SC) și *End of Conversion* (EOC);

Blocul de conversie numeric-analogică (BCNA)

Prin dotarea sistemelor de achiziție și prelucrare a datelor cu blocuri de conversie numeric-analogică, acestea pot comanda și acționa diverse echipamente și mecanisme.

BCNA convertește codul binar de la intrarea lui într-o tensiune analogică de ieșire, V_{OUT} , la activarea semnalului Start Conversion (SC).

Schema de principiu a blocului de conversie numeric-analogică este prezentată în figura 2.6 [63].

Multiplexorul MUX și blocul de condiționare a semnalelor analogice (BCSA) care intră în componența BCNA sunt similare celor din BCAN.

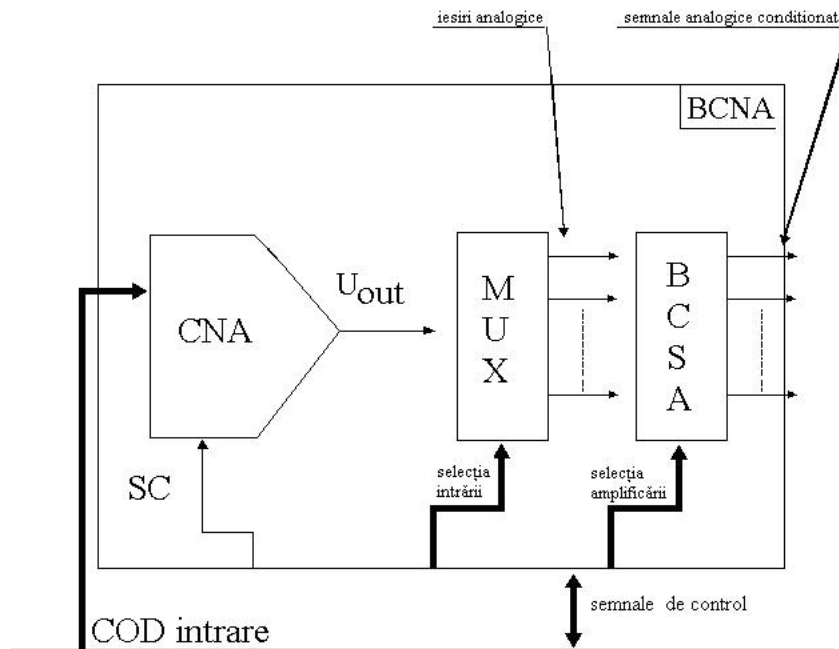


Figura 2.6. Schema de principiu a BCNA

Blocul de Comandă al Modulului de Achiziție de Date BCMAD

Blocul de comandă al unui sistem de achiziție de date comandă și controlează toate elementele modulului de achiziție a datelor, de la programarea ordinii de baleiere a canalelor analogice de intrare până la prelucrarea acestor semnale și transmiterea rezultatelor către calculatorul gazdă.

Funcțiile de bază pe care trebuie să le îndeplinească BCMAD sunt următoarele:

- decodificarea adreselor pentru selecția individuală a circuitelor din schemă;
- regiștri specializați pentru comanda și determinarea stării curente a Modulului de achiziție de date;
- ceas /numărătoare pentru sincronizarea funcționării componentelor schemei;
- logică pentru controlul operațiilor de conversie a semnalelor, de selecție a canalelor la multiplexoarele analogice și pentru stabilirea domeniilor de variație a semnalelor analogice.

Categoriile principale de clasificare ale blocurilor de comandă a modulelor de achiziție și prelucrare a datelor, din punct de vedere al modului de implementare, sunt următoarele:

- BCMAD implementate sub formă logică discretă de comandă și control, prezintă avantajul vitezei de procesare și dezavantajul unei componente hardware mai complicate și o intervenție masivă a utilizatorului pentru programarea diversilor parametri de funcționare ai sistemului;
- BCMAD implementate cu microcontroller, simplifică proiectarea și construirea MAD și permite programarea software a parametrilor de funcționare a sistemului;
- BCMAD implementate cu procesoare specializate în prelucrarea semnalelor (**D**igital **S**ignal **P**rocessor), soluție similară celei cu microcontroller, cu facilități specifice prelucrării de semnale.

Senzori și traductoare

Primul element dintr-un lanț de măsurare ce intră în componența unui Sistem de Achiziție și Prelucrare a Datelor este senzorul, sau traductorul

Senzorul, denumit și captor, reprezintă elementul dintr-un lanț de măsurare care este influențat nemijlocit de mărimea de măsurat. Acesta reprezintă elementul care face prima conversie a mărimii fizice de măsurat în mărime de natură electrică.

Traductorul este un dispozitiv care face ca unei mărimi de intrare să îi corespundă o mărime de ieșire, după o lege determinată. Un traductor poate avea în componența sa mai mulți senzori, ce permit conversia mărimii măsurate în altă mărime, măsurabilă mai ușor.

În preluarea informațiilor din mediul înconjurător omul s-a bazat inițial pe cele cinci organe de simț. Prin analogie, senzorii ajută la a percepe, a simți și a distinge fenomenele din lumea înconjurătoare: vederea (senzori optici), mirosul (senzori de gaze și umiditate), auzul (senzori acustici și de presiune), pipăitul (senzori termici și de presiune), gustul (senzori ai compozițiilor chimice). Ulterior, datorită dezvoltării diferitelor tipuri de senzori și traductori destinați măsurării și analizării fenomenelor din mediul înconjurător, domeniul funcțiilor senzoriale se dezvoltă continuu.

Sunt evidențiate 6 domenii de energie, din care energia se poate converti dintr-un domeniu în celălalt: energie chimică, energie electrică, energie magnetică, energie mecanică, energia radiantă, energia termică. Realizarea și utilizarea senzorilor și traductoarelor în sisteme de achiziție și prelucrare a datelor se bazează pe conversia în energie electrică a celorlalte forme de energie.

Pentru același măsurand există diferite tipuri de senzori, care se bazează pe diferite principii de conversie ale energiei.

Senzorii pot fi clasificați sumar după cum urmează: senzor pasiv (parametric) și senzor activ (generator)

Senzorul pasiv, ce poate fi modelat printr-o impedanță, își variază impedanța (sau una din componentele ei, rezistența, inductivitatea, capacitatea) sub acțiunea măsurandului. Acesta are nevoie de o sursă exterioară de energie pentru a furniza un semnal electric util cu caracteristici ce depind de mărimea de intrare.

Senzorul activ, ce poate fi modelat printr-o sursă de energie, furnizează la ieșire un semnal electric (tensiune, curent sarcină electrică). Senzorul activ nu are nevoie de o sursă exterioară de energie, ci el convertește energia proprie mărimii de măsurat (energie termică, chimică mecanică, optică) în energie electrică, folosind efecte fizice.

Tendința producătorilor este de a completa senzorul și traductorul cu circuite de prelucrare a semnalelor electrice (condiționerul) astfel încât acesta să furnizeze

la ieșire curent normalizat (4 ± 20 mA, 2 ± 10 mA), sau tensiune normalizată (0 ± 10 V, $-10 \pm +10$ V, 0 ± 5 V).

2.1.3. Structura software a unui Sistem de Achiziție și Prelucrare a Datelor

Pentru utilizarea SAPD, pe sistemul hardware se implementează un sistem software care trebuie să îndeplinească următoarele funcții principale:

- prescrierea modului de desfășurare al achiziției și a parametrilor specifici;
- comanda și controlul sistemului de achiziții;
- prelucrarea informației de la porturile de achiziție;
- structurarea și depozitarea informației;
- salvarea datelor achiziționate, pe un suport extern de informație (disc fix, disc flexibil, disc optic, etc.), în forma unei colecții de date organizate pe structuri specifice;
- prelucrarea off-line a colecției de date achiziționate.

Sistemul software al SAPD poate fi structurat pe două niveluri:

- modulul (driverule) de achiziție, care reprezintă programul de bază, care comandă direct achiziția;
- programe de aplicații, de prelucrare a semnalelor achiziționate.

Rolul software-ului în dezvoltarea sistemelor automate de măsură și control acoperă domenii de la drivere pentru controlul interfețelor cu diverse echipamente până la pachete de soft de aplicații pentru dezvoltarea de sisteme complete și complexe. Pachetele de soft de aplicații oferă utilizatorului unelte cu ajutorul cărora se achiziționează date, se controlează echipamente, se analizează și prezintă datele. Componentele funcționale ale unui sistem complex de măsură și control pot fi rezumate în Figura 2.7:



Figura 2.7. Componentele funcționale ale unui Sistem de Achiziție și Prelucrare a Datelor

Mulți producători oferă pachete de soft de aplicații care se orientează în principal pe una din cele trei funcții. Totuși, majoritatea sistemelor concrete necesită toate aceste funcții.

Prezența anumitor funcționalități determină dacă pachetul software poate fi folosit pentru rezolvarea problemei utilizatorului, de aceea în alegerea unui pachet adecvat trebuie ținut seama și de modul cum este folosit sistemul.

Programe de achiziție – eșantionare valori momentane

Modulul de achiziție comandă desfășurarea procesului de achiziție pe baza informațiilor cuprinse într-un tablou de achiziție. Datele care se achiziționează sunt depozitate temporar în memoria sistemului, de unde sunt restructurate într-o colecție de date și salvate (memorate) pe memorie externă. Salvarea datelor se realizează fie la terminarea achiziției unui tren de eșantioane, fie la sfârșitul achiziției.

Pentru fiecare mărime de intrare (intrare în tabel) se achiziționează un tren de date care se structurează într-un bloc de date. Colecția de date, formată din totalitatea blocurilor, se salvează în vederea prelucrării ulterioare. Astfel, în urma achiziției, rezultă pentru fiecare mărime valoarea momentană achiziționată, fiind

cunoscută variația (evoluția) în timp a mărimii respective în intervalul de timp în care s-a făcut achiziția.

Intervalul de timp dintre două eșantioane depinde de perioada de eșantionare T_e a plăcii de achiziție (a convertorului analog numeric). De obicei, dacă sunt n mărimi care se urmăresc pe canalele de intrare, prin multiplexare, atunci se eșantionează câte o valoare momentană pe fiecare canal de intrare (pentru fiecare mărime), începând cu mărimea de pe canalul întâi, după care se comandă o achiziție pe canalul următor, până se balează toate cele n canale, apoi se revine la canalul întâi și se reia ciclul. Practic, în acest caz perioada de eșantionare dintre două valori succesive pentru același canal (mărime) de intrare este egală cu produsul dintre numărul de canale și perioada de eșantionare a plăcii de achiziție $T_{em} = n \cdot T_e$.

Conform teoremei de eșantionare a lui Nyquist, pentru a fi achiziționat corect, frecvența de eșantionare a unui semnal trebuie să fie de cel puțin două ori mai mare decât frecvența maximă a semnalului ce se dorește a fi achiziționat.

Modulul de achiziție implementează și operațiile specifice gestionării dinamice a spațiului de memorie aferent achiziției, generării blocurilor de date și salvării acestora pe suport extern.

Driver-ul comandă direct registrii sistemului de achiziție, gestionează operațiile și integrează sistemul cu resursele calculatorului, cum ar fi sistemul de întreruperi, accesul direct la memorie (DMA) și memoria însăși. De asemenea, driver-ul face transparente pentru utilizator operații complicate, de nivel inferior, necesare pentru comanda părții hardware, oferind utilizatorului o interfață prietenoasă, ușor de înțeles și de utilizat.

Programe de prelucrare a datelor experimentale

În funcție de mărimile achiziționate, după obținerea valorilor momentane ale mărimilor sub formă numerică, se pot implementa programe de prelucrare, după diferiți algoritmi specifici domeniilor de utilizare.

Programele de prelucrare au drept scop prelucrarea bloc cu bloc a datelor colecționate pentru obținerea unor rezultate care caracterizează mașina testată, sub forma unor tabele și grafice specifice.

Conceptul de programare grafică „G – programming”

În timp ce calculatoarele intră tot mai mult în activitatea de zi cu zi a oamenilor, producătorii de software trebuie să împace două tendințe: să creeze programe cu putere mare de lucru, sau să creeze programe ușor de utilizat, prietenoase.

Din multitudinea de producători de programe destinate măsurării mărimilor și prelucrării datelor, una dintre firmele a cărei număr de utilizatori crește continuu este National Instruments. Aceasta produce, începând din anul 1986, un mediu de lucru grafic numit LabVIEW (**L**aboratory **V**irtual **I**nstrument **E**ngineering **W**orkbench), care reprezintă un soft destinat creării, dezvoltării și modificării sistemelor de aparate și instrumente virtuale, fiind în același timp unul din primele produse care au impus un nou concept și mod de abordare în acest gen de aplicații.

Proiectarea acestui sistem s-a făcut plecând de la dezideratul de a oferi un produs cu o metodologie de utilizare intuitivă. S-a dorit crearea unui mecanism grafic de construcție a sistemelor software de măsură și control, mecanism similar descrierii sistemelor prin „scheme bloc”, metodă folosită în multe discipline ingineresti. Pentru dezvoltarea aplicațiilor, acest mediu utilizează simboluri intuitive de panouri frontale și scheme bloc.

Ideea de bază constă în folosirea unor unelte și moduri de lucru familiare utilizatorului sistemului de măsură și control.

Principalul concept nou este Instrumentul Virtual - un modul software, „împachetat” grafic, astfel încât să arate, să funcționeze și să poată fi manevrat ca și un instrument fizic.

Întrucât dinamica de creștere continuă a performanțelor ordinarilor electronice, mai ales ale celor de tip PC, este foarte mare, Instrumentul Virtual câștigă tot mai mult teren în fața instrumentelor de măsură „clasice” [67].

Un Instrument Virtual (Virtual Instrument - VI) reprezintă un pachet de programe grafice ce rulează pe un calculator, care arată și funcționează ca un instrument de măsură obișnuit. Instrumentul virtual este format dintr-un panou frontal, dintr-o diagramă bloc și din eticheta (pictograma) sa. Instrumentele Virtuale pot fi utilizate atât pentru măsurători, cât și pentru operații matematice, pentru simulări și pentru experimente mai complexe, care necesită aparatură performantă. În cazul în care Instrumentul Virtual este utilizat pentru obținerea de date în timpul unui experiment, calculatorul trebuie să fie echipat cu o placă de achiziție de date (DAQ).

Panoul frontal conține butoanele, comutatoarele, întrerupătoarele, etichetele și cadranele instrumentelor, afișează de asemenea intrările și ieșirile și constituie o interfață grafică pentru utilizator, utilă pentru exploatarea Instrumentului Virtual. Această interfață este interactivă, deoarece toate butoanele pot fi manipulate identic cu cele ale aparatului real, folosind mouse-ul calculatorului. Inginerul obișnuit în activitatea sa cu operarea butoanelor de comandă ale instrumentelor formând standul de lucru în aplicația sa de măsură și control poate interacționa cu „butoanele de comandă” ale „panoului de comandă” afișat de instrumentele virtuale.

Diagrama bloc însoțește panoul frontal și furnizează instrucțiunile de comandă pentru Instrumentul Virtual, fiind construit utilizând limbajul G. Aceasta constituie codul sursă al aplicației respective. Schemele bloc determină modul de funcționare și interconectare al instrumentelor virtuale. Interconectând diversele unități funcționale, utilizatorul își „desenează” practic programul în limbajul grafic G. Diagrama bloc este un program bazat pe fluxul datelor (data flow program). Ordinea de execuție a comenzilor în LabView este determinată de fluxul de date între blocurile funcționale.

Orice Instrument Virtual creat poate fi folosit ca element într-un Instrument Virtual mai complex. Cu alte cuvinte poate deveni o pictogramă care ulterior se poate folosi ca subrutină într-o diagramă bloc ce descrie alt Instrument Virtual, mai complex. Acest sistem ierarhizat conferă putere mediului LabVIEW, prin care un Instrument Virtual nou creat poate fi folosit în diagrama bloc a unui alt Instrument Virtual. Numărul nivelurilor ierarhice este practic nelimitat.

G reprezintă un limbaj de programare grafică (G-programming) ce stă la baza mediului LabVIEW, limbaj care, spre deosebire de celelalte limbaje de programare, operează cu pictograme, cu elemente grafice, nu cu comenzi scrise în linii de comandă.

Limbajul G conține o magistrală universală de interfață (GPIB - **G**eneral **P**urpose **I**nterface **B**us), biblioteci pentru achiziții de date, instrumente de control, analiză, prezentare și stocare a datelor. Totodată limbajul G include unelte de corectare a greșelilor, de animare a execuției pentru a vedea cum sunt achiziționate datele.

2.2. Sistemul de Achiziție și Prelucrare a Datelor dedicat pentru încercarea mașinilor electrice – SAPDME1

Încercarea mașinilor electrice are în vedere determinarea parametrilor, caracteristicilor și performanțelor acestora. Aplicarea unor noi metode de încercare și prelucrare a rezultatelor, necesitatea obținerii unei precizii mai mari în determinări, necesitatea studiului unor regimuri tranzitorii (uneori cu metode statistice) sunt numai câteva motive care fac ca utilizarea instrumentelor clasice de măsurare să nu fie întotdeauna satisfăcătoare.

Apariția și îmbunătățirea continuă a performanțelor microcalculatoarelor de tip PC permite realizarea cu ușurință de măsurători în domeniul regimurilor permanente (cvasiperiodice) și tranzitorii, cu prelucrarea on-line, sau off-line a mărimilor măsurate, folosind Sisteme de Achiziție și Prelucrare a Datelor.

În continuare se prezintă un sistem de achiziție și prelucrare a datelor (SAPDME1) bazat pe un microcalculator compatibil PC, realizat cu contribuția autorului de colectivul de cercetare al Laboratorului D109 de Testare a Mașinilor Electrice din cadrul Facultății de Electrotehnică și Electroenergetică din Timișoara.

SAPDME1 conține o structură hardware ce este însoțită de o structură software, ambele concepute modular. Ca programe de bază pentru achiziția și prelucrarea datelor s-a realizat un program pentru regimuri permanente și un program pentru regimuri tranzitorii.

2.2.1. Structura hardware

Schema bloc de principiu utilizată la încercarea unei mașini de inducție cu SAPD este prezentată în figura 2.8.

În această schemă se disting următoarele părți componente: mașina asincronă de încercat (MAS), traductoarele (de tensiune, curent și turație -TU, TI, TT), adaptoarele pentru aceleași mărimi (AU, AI, AT), modulul de achiziție date (MAD) introdus într-un microcalculator de tip PC.

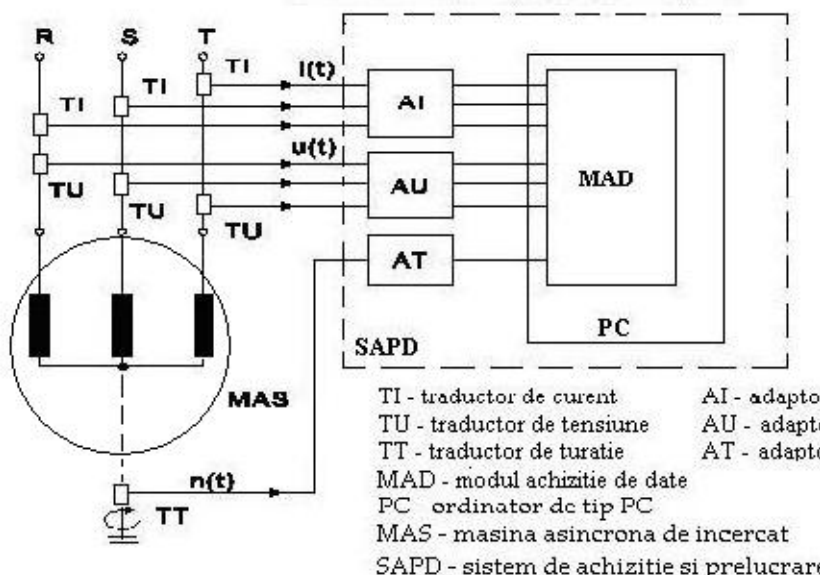


Figura 2.8. Schema bloc de principiu pentru încercarea unei mașini asincrone cu SAPD

Traductoarele de tensiune și de curent sunt introduse într-un modul comun, care formează Blocul de Traductoare și Adaptare de Semnale Analogice (BTASA).

Traductoarele de tensiune, de curent și de turație TU, TI, TT, respectiv adaptoarele pentru aceleași mărimi AU, AI, AT, au ca rol culegerea semnalelor corespunzătoare mărimilor măsurate, de tip analog și convertirea lor tot în mărimi analogice, la nivelul standard de ± 10 V, compatibile cu intrarea în modulul de achiziție de date din microcalculatorul PC.

Modulul de Achiziție de Date transformă mărimile analogice în mărimi numerice, oferind astfel posibilitatea ordinatului să opereze cu aceste mărimi.

Blocul de Traductoare și Adaptare de Semnale Analogice BTASA

Blocul de Traductoare și Adaptare Semnale Analogice (BTASA) este separat fizic de calculator și are șiruri de borne specifice tipurilor de mărimi, pe diferite domenii de valori.

BTASA a fost conceput pentru a permite conectarea SAPDME1 la o mașină electrică trifazată, în vederea măsurării în regim trifazat, pe trei canale de curent separate galvanic și trei canale de tensiune fără separare galvanică. În plus, BTASA permite măsurarea pe încă două canale de tensiune cu separare galvanică și două canale de curent cu separare galvanică, pentru curenți mai mari (cuplarea traductoarelor se face la două cuple aflate pe partea posterioară a BTASA).

Pentru cele trei intrările de curent au fost prevăzute două domenii de măsură: 5 și 10 A.

Domeniile de tensiune au valorile de 110 V, 240 V și 420 V, pentru intrările fără separare galvanică, respectiv 16 V, 110 V, și 460 V pentru canalele cu separare galvanică.

Cele două intrări de curenți mari adaptează traductoare de 50 A respectiv 500 (1000) A.

Pentru realizarea BTASA s-au utilizat traductoare de curent cu separare galvanică și traductoare de tensiune cu separare galvanică, tip LEM. Deasemenea, pentru tensiuni care nu necesită separare galvanică, ce au punct comun de nul ce poate fi conectat la masa SAPD, s-au utilizat divizoare de tensiune rezistive.

Panoul frontal al BTASA realizat este prezentat în figura 2.9 a). De la stânga sunt cele trei intrări de curent cu separare galvanică, apoi trei intrări de tensiune fără separare galvanică, conectate în conexiune stea cu nul accesibil și două intrări de tensiune cu separare galvanică. Panoul din spate al BTASA, prezentat în figura 2.9.b) conține conectorul pentru cuplare la Modulul de Achiziții de Date, cuplele pentru canalele suplimentare de curent de 500 A (1000A) și 50 A și conectorul de cuplare la rețea.

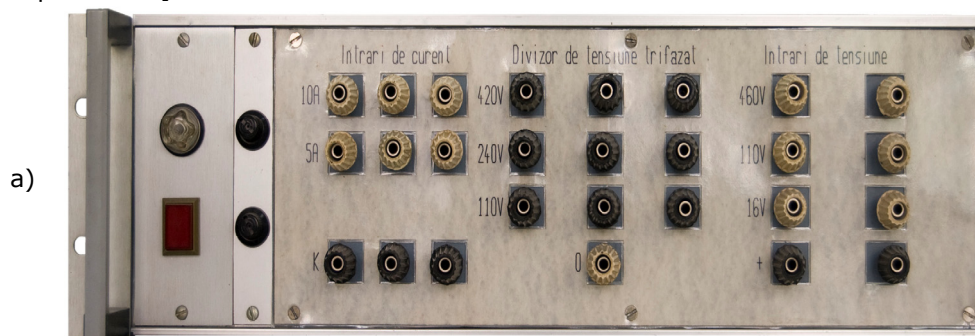




Figura 2.9. a) Panoul frontal al BTASA al SAPDME1; b) Panoul din spate al BTASA.

Proiectarea BTASA, calculul circuitelor electrice și electronice precum și realizarea acestui bloc reprezintă contribuția personală a autorului.

Traductoarele utilizate asigură separarea galvanică și o precizie ridicată, în domeniul de frecvență 0-15 kHz, care este acoperitor inclusiv pentru cazul regimurilor tranzitorii rapide care pot interveni în încercările de cercetare.

În continuare se prezintă pe scurt principiul de funcționare al traductoarelor de tip LEM folosite.

Traductorul de curent cu separare galvanică

Principiul de funcționare și constructiv al traductorului de curent de tip LEM este prezentat în figura 2.10.

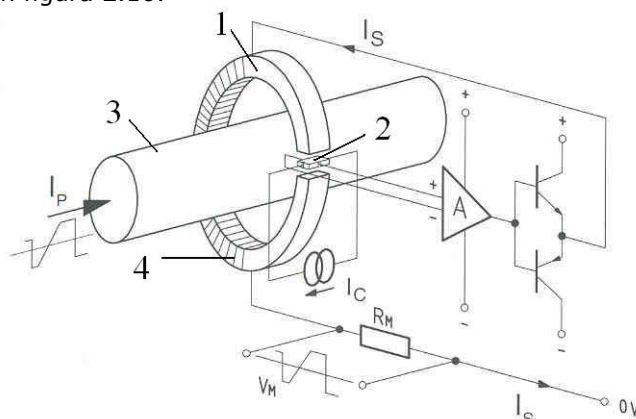


Figura 2.10. Schema de principiu al traductorului de curent de tip LEM.

Traductorul este alcătuit dintr-un miez toroidal din ferită (1) prevăzut cu o fantă în care este plasat timbrul Hall (2), semnalul de la bornele acestui timbru fiind amplificat de amplificatorul operațional (A), iar apoi de un amplificator final, construit cu tranzistori de putere. Ieșirea amplificatorului de putere este conectată la masă prin intermediul unei bobine, cu multe spire (4) dispuse pe torul din ferită. Această bobină este parcursă de curentul secundar (I_S). Curentul primar, de măsurat (I_P) parcurge conductorul (3). Fluxul magnetic creat de curentul primar I_P este compensat de fluxul complementar produs de trecerea curentului secundar I_S prin înfășurarea secundară. Timbrul Hall și circuitul electronic asociat este folosit pentru a genera curentul secundar (de compensare) care este o reprezentare exactă a curentului primar.

Traductorul cu buclă închisă (denumit de asemenea și traductor compensat, sau de flux zero) are un circuit electronic de compensare datorită căruia performanțele traductorului cu efect Hall sunt puternic îmbunătățite.

Acest traductor furnizează curentul secundar I_S proporțional cu tensiunea sondei Hall V_H care acționează ca un semnal de reacție inversă, în scopul de a compensa inducția creată de curentul principal B_p printr-o inducție secundară de semn opus B_S .

Curentul secundar I_S , redus prin factorul de înfășurare, este mult mai mic decât curentul primar I_p , deoarece înfășurarea secundară cu N_S spire generează același flux (amper-spire) ca și înfășurarea primară care are N_p spire. Se poate scrie $N_p \cdot I_p = N_S \cdot I_S$.

Inducția B_S este astfel echivalentă cu inducția B_p respectiv solenațiile se contrabalansează (compensează) una pe alta.

Traductorul funcționează la flux magnetic nul. Astfel, curentul secundar I_S este imaginea exactă a curentului primar I_p .

De obicei raportul de transformare este 1:1000. Curentul secundar maxim se recomandă de obicei a fi de între 10 mA și 100 mA.

Mărimea de ieșire a traductorului este tensiunea V_M , care este căderea de tensiune pe rezistența de măsură (de precizie) R_M .

Traductoarele de curent în buclă închisă de tip LEM pot să funcționeze în curent continuu și curent alternativ, asigurând separare galvanică.

Se remarcă următoarele avantaje:

- precizie excelentă;
- liniaritate foarte bună;
- derivă termică redusă;
- timp de răspuns foarte rapid și bandă largă de frecvență;
- nu introduce pierderi suplimentare de putere (tensiune) în circuitele de măsură;
- curentul de ieșire este în mod particular potrivit pentru aplicații în mediu poluat din punct de vedere electromagnetic, dacă semnalul e nevoie să fie transmis la distanță mare. În plus, dacă este necesar, este extrem de simplu de transformat acest semnal în tensiune.
- acest traductor rezistă la suprasarcină fără a se deteriora.

Pentru realizarea BTASA s-au utilizat trei traductoare de curent LA 55-P, având curentul nominal de 50A. Pentru realizarea celor 2 domenii de intrare s-au bobinat în circuitul primar al traductorului câte 10 spire (domeniul de 5 A), cu priză la spira a cincea (domeniul de 10 A). În circuitul secundar al traductoarelor s-au conectat rezistențe de precizie de 100 Ω .

Eroarea maximă asigurată de aceste traductoare de curent (la 25°C) este de $\pm 0,65\%$ din curentul nominal.

Traductorul de tensiune cu separare galvanică, cu efect Hall, se bazează pe același principiu ca și traductoarele de curent descrise mai sus. Acestea sunt de fapt constituite din traductoare de curent, la care diferența principală constă în faptul că circuitul primar este realizat dintr-o înfășurare care are un număr mare de spire. Acest lucru permite realizarea solenației primare necesare obținerii inducției primare chiar având un curent primar de valoare redusă, ceea ce permite un consum minim în circuitul în care se face măsurarea.

Curentul primar se limitează printr-o rezistență adițională R_1 . De obicei curentul nominal primar se admite de 10 mA. Pentru realizarea domeniilor de tensiune, s-au folosit rezistențe adiționale (realizate prin înseriere de rezistențe de

precizie cu toleranța de 0,5%) astfel: $R_{11} = 833 \Omega$ (domeniul de 16V), $R_{12} = 13,51 \Omega$ (110 V), respectiv $R_{13} = 50,01 \Omega$ (460 V).

În secundar, traductoarele de tensiune debitează tot pe câte o rezistență de precizie de $R_M = 100 \Omega$. Schema electrică de conectare este prezentată în figura 2.11.

Eroarea maximă introdusă de traductor și rezistența adițională din primar 1,52%. Eroarea datorată traductorului de tensiune (la 25°C) este de $\pm 0,7 \%$.

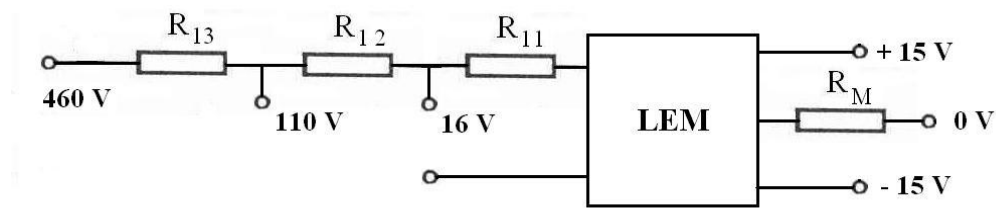


Figura 2.11. Schema electrică de conectare a traductorului de tensiune de tip LEM.

Traductor de tensiune trifazat rezistiv, fără separare galvanică

În cazul în care montajul de măsură suportă punerea la pământ a unei borne, atunci se poate folosi divizorul rezistiv pentru adaptarea domeniului tensiunii de măsură cu domeniul de intrare în Modulul de Achiziție de Date MAD ($\pm 10V$).

Practic au fost realizate trei divizoare rezistive, conectate în stea.

Valorile rezistențele conectate pentru realizarea divizoarelor sunt următoarele: $R_{k1}=59,9\text{ k}\Omega$ (domeniul de 110 V), $R_{k2} = 75\text{ k}\Omega$ (240 V), respectiv $R_{k3} = 240\text{ k}\Omega$ (420 V). Tensiunea de ieșire a divizorului se culege între punctul M_k și masă, de pe o rezistență de $R_{kM} = 4\text{ k}\Omega$ ($k=1,2,3$).

S-au folosit rezistențe în clasa de precizie 0,5%, selecționate.

Schema divizorului rezistiv trifazat este prezentată în figura 12.

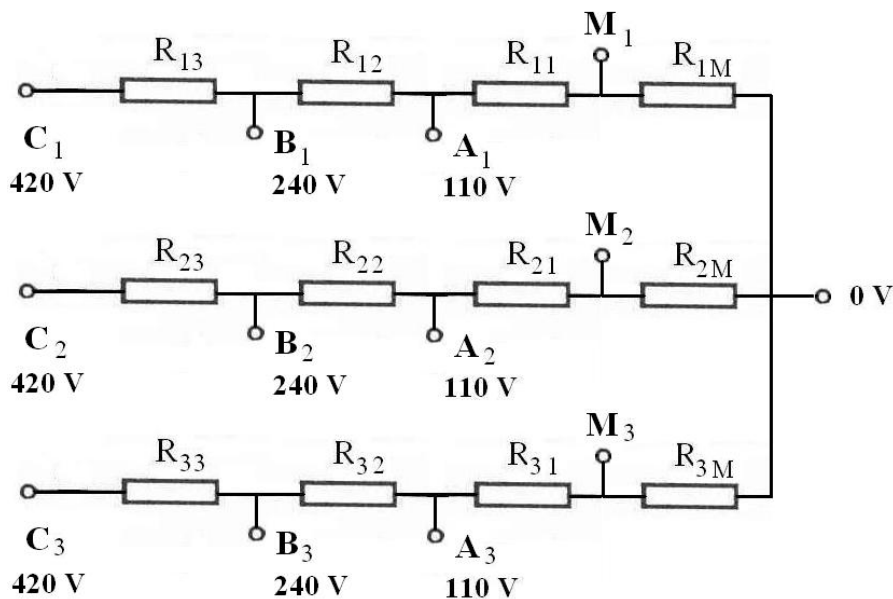


Figura 2.12. Schema electrică a divizorului trifazat de tensiune.

BTASA este conectat la Modulul de Achiziție de Date prin intermediul unui cablu.

Configurația pinilor pentru conectorul (2X17 pini) de ieșire din BTASA spre MAD este următorul:

- 1 - canal 1 măsurare tensiune fără separare galvanică;
- 3 - canal 1 măsurare curent cu separare galvanică;
- 5 - canal 2 măsurare tensiune fără separare galvanică;
- 7 - canal 2 măsurare curent cu separare galvanică;
- 9 - canal 3 măsurare tensiune fără separare galvanică;
- 11 - canal 3 măsurare curent cu separare galvanică;
- 13 - canal 4 măsurare tensiune cu separare galvanică
- 15 - canal 4 măsurare curent traductor extern 500 A;
- 17 - canal 5 măsurare tensiune cu separare galvanică
- 19 - canal 4 măsurare curent traductor extern 50 A;
- 2,4,...20 - masa.

Pe canalele de tensiune cu separare galvanică se pot conecta și alte tipuri de traductoare, care au ca mărime de ieșire tensiune, de exemplu traductoare de turație, traductoare de moment de rotație ș.a. Aceste traductoare se iau în considerare cu constanta respectivă, pentru calcularea corectă a valorii mărimii măsurate.

Modulul de achiziție de Date (MAD)

Schema bloc a Modulului de Achiziție de Date (MAD) PADCO1-REV.B, folosit în SAPDME1, este prezentată în figura 2.13.

Modulul de achiziție de date este format din patru părți distincte:

- Blocul de Achiziție de Date (BAD), care realizează procesarea semnalelor analogice și conversia analog-numerică;
- circuitele care asigură separarea galvanică;
- interfața, care asigură legătura dintre calculator și BAD;
- sursele de alimentare ale BAD.

Blocul de Achiziție de Date (BAD) este alcătuit din convertorul analog numeric DAS 12009 și din circuite care asigură protecția intrărilor la supratensiuni.

Deoarece DAS 12009 funcționează cu trei tensiuni de alimentare:

- +5V - 500 mA;
- +15V - 50 mA;
- -15V - 100 mA.

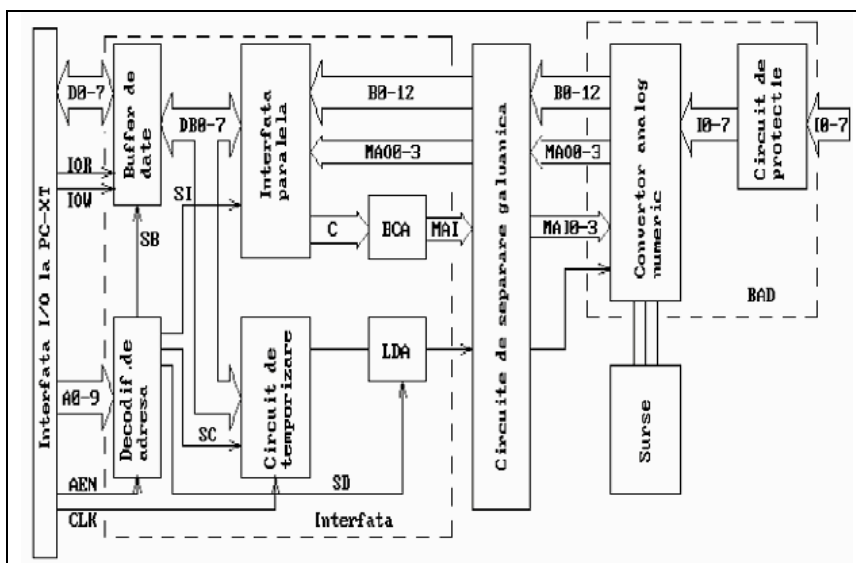


Figura 2.13. Schema bloc a Modulului de Achiziție de Date

Este necesară și prezența blocului surselor de alimentare care trebuie să conțină surse de tensiune corespunzătoare datelor de catalog ale circuitului DAS 12009. În acest scop a fost executată o sursă de alimentare suplimentară, pentru asigurarea celor trei tensiuni de alimentare, surse introduse în calculatorul de tip PC.

Blocul circuitelor care asigură separarea galvanică este alcătuit din circuite de tip buffer cu un curent de ieșire care acționează circuite de tip optocuplor pentru separarea galvanică a circuitului de măsură față de masa ordinatorului, calculatorul de tip PC.

Interfața este alcătuită din mai multe blocuri funcționale. Ele au rolul realizării comunicației între ordinator, calculator de tip PC și BAD.

Realizarea Blocului de Achiziții de Date (BAD).

Semnalele de intrare analogice sunt aplicate la intrările multiplexorului CMOS pe 16 canale.

Acest multiplexor, în combinație cu amplificatorul diferențial ce-l succede, poate fi configurat de utilizator să accepte fie 16 intrări analogice cu masa comună cu masa sistemului de calcul, fie 8 intrări diferențiale, fie 16 intrări cu masă comună, dar diferită de masa sistemului.

Buffer-ul de intrare diferențial este programabil de utilizator prin comanda directă a pinilor corespunzători. Această caracteristică, alături de tensiunile de referință selectabile, permit utilizarea circuitului DAS în oricare din cele 8 domenii ale tensiunii de intrare.

Amplificatorul diferențial comandă amplificatorul de eșantionare și memorare, a cărui funcție este să rețină semnalul analogic de intrare selectat la un nivel constant, pe perioada în care convertorul analog numeric realizează o conversie.

Convertorul analog numeric este construit pe principiul aproximațiilor succesive, pe 12 biți, de viteză ridicată. A fost proiectat folosind circuitul AD562 - un convertor numeric analogic pe 12 biți, integrat. Tensiunea de referință pentru conversie este asigurată de un circuit de referință de precizie. Tensiunea de referință este 10 V și poate fi ajustată și din exterior. Are un coeficient de temperatură de 5 ppm/°C.

Pe lângă aceste blocuri funcționale de bază, convertorul DAS 12009 mai conține toate circuitele de ceas necesare pentru a realiza întreaga funcție de achiziție a datelor.

Ceasul intern poate fi modificat din exterior pentru a obține diferite perioade de conversie, la diferite precizii. De asemenea utilizatorul poate stabili intervalul de timp dintre selecția unui canal de intrare și începutul unei conversii.

Conectarea intrărilor.

Există 3 moduri de conectare a intrărilor :

Configurația de intrare	Intrările analogice	Masa de măsură	Conexiunile la pini
16 intrări cu masă comună	3T-10T și 3B-10B	toate masele se leagă la masa analogică	11B la 11T 12B la 2B sau 2T 17B la 19T 18T la 18B
8 intrări diferențiale	3T-10T și 3B-10B		11B la 12B
16 intrări quasi-diferențiale	3T-10T și 3B-10B	toate masele se leagă la pinul 12B	11B la 11T 17B la 19T 18T la 18B

Pentru toate aceste 3 configurații de intrare multiplexorul de intrare a fost proiectat pentru a asigura protecția sa și a surselor de semnal atât împotriva supratensiunilor, cât și a valorilor necorespunzătoare ale curenților datorate oscilațiilor de alimentare.

Selecția scalei de măsurare se face realizând legăturile indicate mai jos :

Scala	Conexiunile
0V la 10V	12T la 2T; 14T și 14B la 13T
0V la 10.24V	aceleași ca și la 0V-10V, plus 15B la 16B
0V la 5V	12T la 13B; 14T și 14B la 13T
0V la 5.12V	aceleași ca și la 0V-5V, plus 15B la 16B
-10V la +10V	12T la 2T, 14T la 15T; 14B la 13T
-10.24V la +10.24V	aceleași ca și la -10V la 10V, plus 15B la 16B
-5V la +5V	12T la 13B; 14T la 15T ; 14B la 13T
-5.12V la +5.12V	aceleași ca la -5V la 5V, plus 15B la 16B

Din punct de vedere hardware, s-a urmărit configurarea DAS 12009 pentru obținerea următoarelor performanțe:

- achiziție pe 12 biți;
- deservirea a 8 canale analogice diferențiale adresabile direct;
- perioada minimă de eșantionare 20 μ s;
- tensiunea de intrare între -10,24V și +10,24V;

Modul de adresare al multiplexorului este RANDOM, și este realizat prin următoarele conexiuni:

- pinul 24B, LOADENB/, la "0" logic;
- pinul 25B, CLR ENABLE/ la "1" logic.

Aceste conexiuni determină ca selecția următorului canal pe care se va face achiziția să fie precizată prin citirea de la blocul de comandă a achiziției (PC1-PC3 al circuitului 8255) a numărului canalului respectiv.

Secvența de tratare a conversiei este de tip NORMAL, adică intrarea analogică rămâne selectată pe toată perioada conversiei semnalului de la intrarea respectivă. Acest mod de lucru se obține prin conectarea pinului 23T, DLY OUT la pinul 27T, TRIG/.

Rezoluția ieșirilor numerice este de 12 biți, obținută prin conectarea pinului 28T, SHORT CYCLE, la masă.

Pentru selectarea gamei de măsură de -10,24-+10,24 V s-au făcut următoarele conexiuni: 12T la 2T, 14T la 15T; 14B la 13T; 15B la 16B .

Pentru selectarea modului diferențial de configurare a intrărilor s-au realizat următoarele conexiuni: MUXENHI și MUXENLO la +5V.

Pentru a evita deteriorarea intrărilor multiplexorului analogic datorate supratensiunilor accidentale pe intrări, s-au prevăzut pentru fiecare intrare o rezistență cu putere disipată mică (pe post de siguranță) urmată de câte două diode Zenner conectate în contrafază. La depășirea tensiunii maxime admise pe intrare una din diodele Zenner va conduce ducând astfel la arderea rezistenței.

Realizarea blocului care asigură separarea galvanică între intrare și masa ordinatorului

După cum s-a menționat anterior, acest bloc a fost realizat cu ajutorul unor circuite de tip optocuplor. Tipul acestora este HP 2531, și se conectează conform schemei din figura 2.14.

Separarea galvanică a convertorului DAS 12009 trebuie realizată atât pe partea de intrare a semnalelor, rezultând un necesar de 4 optocuploare cu circuitele de comandă aferente, cât și pe cea de ieșire rezultând un necesar de 16 optocuploare.

La intrarea în DAS 12009, VCC reprezintă tensiunea de alimentare a plăcii, aceeași cu cea a sistemului, iar VCC1 reprezintă tensiunea de alimentare a circuitului DAS, diferită de VCC, dar egală cu +5V fiecare. Analog, GND este masa DAS-ului. La IN se aduc semnalele care vin de la sistem, iar acestea vor fi trimise la DAS de la ieșirile OUT.

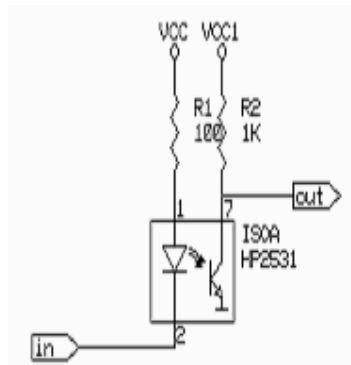


Figura 2.14. Circuitul pentru separare galvanică

Pentru optocuploarele de la ieșirea convertorului DAS 12009, VCC reprezintă tensiunea de alimentare a lui, iar VCC1 și GND sunt alimentarea, respectiv masă ale plăcii și sistemului.

Realizarea interfeței.

Interfața are scopul de a asigura comunicația Modulului de Achiziție de Date MAD cu calculatorul. Este alcătuită din mai multe blocuri funcționale fiecare având sarcini specifice în această operație.

Blocul separatoarelor de magistrală este realizat cu ajutorul unui circuit 74LS245 și realizează separarea și amplificarea semnalelor de pe magistrala de date. Comanda acestuia este realizată de semnalele IOR și IOW de la cupla de extensie XT și un semnal de comandă generat de decodificatoarele de adresă.

Blocul decodificatoarelor de adresă este format din două circuite 74LS138 și realizează, pornind de la liniile A0-9 și semnalul AEN, semnale de selecție pentru circuitul din interfața paralelă și circuitul de temporizare-numărare. În plus, generează un semnal care declanșează achiziția în momentul când din blocul de comandă a achiziției se comandă aceasta.

Circuitul de interfață paralelă este un circuit de tipul I8255 care pe porturile A și B preia informația de la convertor, B1-12, MA00-2 și EOC, iar prin portul C comandă canalul pe care se dorește achiziția și modul de declanșare a acesteia.

Blocul circuitelor de temporizare și numărare este alcătuit dintr-un circuit de numărător temporizator de tipul I8253 și dintr-un numărător 74LS93. Numărătorul are rolul de a diviza de 16 ori frecvența de tact a microprocesorului pentru a putea folosi circuitul I8253.

Blocul de comandă a achiziției (BCA) are rolul de a stabili pe care din canale se va desfășura achiziția cu o perioadă de eșantionare programată de la circuitul I8253. Semnalele generate de acest bloc comandă liniile MAI0-3 ale convertorului analog numeric.

Funcționarea modului de achiziții de date.

Semnalul de ceas al sistemului (CLK), de o frecvență dependentă de frecvența de tact a microprocesorului de pe placa de bază, este divizat cu 16 prin intermediul unui numărător 74LS93.

Noul semnal de ceas va constitui :

- tact pentru canalul 0 al circuitului 8253 care va genera la OUT0 tactul de eșantionare;

- tact pentru canalul 1 al lui 8253 care generează la OUT1 un tact cu perioada de 1 ms.

Circuitul de ceas al plăcii este programat în modul următor:

- canalul 0 în modul 3, ca generator de impulsuri dreptunghiulare, generând un semnal de perioadă egală cu perioada de eșantionare, stabilită soft anterior;

- canalul 1 în modul 4, ca strobe comandat prin software, contorizând o perioadă de 1 ms;

- canalul 2 în modul 4, având ca intrare de tact ieșirea canalului 1 (OUT1), el contorizând un număr de N ms, unde N este stabilit prin intermediul programului de către utilizator.

Circuitul convertor analog-numeric DAS 12009 are intrările analogice folosite în modul diferențial, putând realiza astfel o achiziție pe 8 canale. Semnalul de sfârșit de conversie este EOC, pin 27. Cei 12 biți ai rezultatului conversiei sunt generați la pinii B29-B34 și T29-T34, unde T29 este cel mai semnificativ, iar B34 cel mai puțin semnificativ. Toate aceste semnale de ieșire sunt buffer-ate prin intermediul a 3 circuite 7407.

Ieșirile corespunzătoare ale acestor buffere sunt transmise la circuitul 8255 prin intermediul unor optocuploare. Necesitatea folosirii optocuploarelor rezidă din obligativitatea separării galvanice a circuitului de conversie față de restul plăcii din punct de vedere al alimentării, în vederea obținerii unei precizii ridicate (zgomotul generat de comutările circuitelor logice din calculator nu se transmite în partea analogică) și mai ales asigură siguranță în funcționare a calculatorului.

Pe schemă, deși V_{cc} și V_{cc1} sunt identice ca valoare (+5V) provin de la surse diferite, astfel încât V_{cc} este alimentarea sistemului, folosită și pentru placa de achiziție, iar V_{cc1} este alimentarea circuitului de conversie. Aceeași situație se poate întâlni și în cazul semnalului GND.

Performanțele principale ale plăcii de achiziție sunt:

- achiziție prin aproximații succesive pe 12 biți;

- eșantionare și memorare a semnalului de măsurare pe timpul efectuării măsurătorii;

- perioada de eșantionare - min. 50 μ s;

- conectarea intrărilor selectabilă prin jumperi:

- cu masa comună - 16 intrări;
- pseudo-diferențial - 16 intrări;
- diferențial - 8 intrări;

- domeniu de măsurare: +/- 10,24 V;

- separare galvanică a montajului de măsurare față de calculator PC.

Această structură hardware este însoțită și completată de o structură software, concepută modular.

2.2.2. Programe pentru încercarea mașinilor electrice utilizate de SAPDME1

Ca programe de bază pentru achiziția și prelucrarea datelor s-a realizat un program pentru regimuri permanente și un program pentru regimuri tranzitorii.

Aceste programe au rolul de a asigura achiziția datelor din încercările mașinilor electrice și de a prelucra aceste date on line, sau off line, astfel încât în urma prelucrărilor să rezulte buletine de încercări conform standardelor din domeniu.

Programe pentru achiziția și prelucrarea datelor

Sistemele de programe dezvoltate în anii anteriori pe baza acestei plăci de achiziție sunt specializate pe determinarea unor mărimi ce caracterizează parametrii și performanțele mașinilor electrice din studiul regimurilor permanente.

Pentru achiziția de date la încercarea mașinilor electrice se au în vedere următoarele cerințe determinate de variația în timp a mărimilor electrice care se achiziționează :

- achiziții mono și trifazate în regimuri periodice;
- achiziții mono și trifazate în regimuri aperiodice.

Achiziția datelor din regimuri periodice

În cazul regimurilor permanente nu interesează în mod deosebit momentul în care se declanșează măsurarea, presupunându-se că fenomenul urmărit este cvasistaționar și indiferent de momentul în care se declanșează măsurătoarea rezultatele vor fi aceleași. Practic operatorul declanșează achiziția datelor, care se desfășoară într-un interval de timp, de-a lungul a unui număr de perioade.

Programul de achiziții și prelucrări de date pentru studiul regimurilor permanente, denumit GENERAL, permite măsurarea mărimilor care interesează la testarea mașinilor electrice inclusiv în regim nesinusoidal și la frecvență de baza variabilă. Se achiziționează valorile momentane $u(t)$ și $i(t)$ pe fiecare fază și pe baza acestora se calculează valorile efective ale tensiunii și curentului, puterea activă și frecvența. Valorile efective ale tensiunii U și curentului I , precum și puterea activă P sunt determinate cu relațiile integrale fundamentale de definiție, fiind valabile indiferent de gradul de deformare al mărimilor respective. Toate aceste mărimi se determină pentru fiecare fază a mașinii.

Programul ține cont, pentru calculele pe care le efectuează, de lanțul de măsură care este pe fiecare canal de măsură în parte.

Programul prezintă facilități de salvare a datelor achiziționate, de reprezentare grafică, sau tabelară a rezultatelor prelucrărilor.

În tabelul 2.1 se prezintă un exemplu cu mărimile care se calculează pentru un bloc de achiziție, prin procesarea unui număr de 3-10 perioade ale tensiunii, selectabil de către operator, și modul în care programul le afișează. Programul calculează aceste mărimi pentru fiecare măsurătoare efectuată.

Tabelul 2.1.

Mărimile calculate dintr-un bloc de achiziție cu programul GENERAL

Nr. Crt.	Timp		U_{EF}	I_{EF}	P	Q	$\cos\phi$	f
	[s]		[V]	[A]	[W]	[VAR]		[Hz]
1	0,61	Faza A	1 764	543.1	152 406	945 922	0.1591	50.04
		Faza B	1 783	547.3	191 978	956 718	0.1967	50.04
		Faza C	1 839	571.2	167 857	1 036 730	0.1598	49.99
		Media	1 795	553.9	512 241	2 939 370	0.1717	50.02
		Viteza de rotație [rpm]	7					

Achiziția datelor din regimuri tranzitorii

În vederea determinării parametrilor electromagnetici ai mașinii electrice a apărut în ultima perioadă tendința de utilizare a regimurilor tranzitorii atât în cercetare, cât și în standurile industriale.

Principalele avantaje asociate acestor regimuri sunt următoarele:

- proba are loc cu mașina în stare de repaus, necuplată mecanic cu altă mașină;
- timpul necesar efectuării probei este foarte scurt;
- montajele sunt simple;
- consumul energetic în cadrul probei este neglijabil.

Utilizarea acestor metode de regim tranzitoriu implică însă măsurători de precizie și o prelucrare a rezultatelor mai pretențioasă.

În cazul regimului tranzitoriu, este foarte important momentul în care este declanșat procesul de măsurare, datorită faptului că se dorește de obicei înregistrarea unor fenomene cu o variație rapidă în timp.

În acest caz procesul de măsurare decurge astfel:

- Pentru fiecare canal se definește o valoare minimă și una maximă pentru care se consideră că procesul tranzitoriu nu este inițiat dacă valorile măsurate pe respectivul canal se încadrează între cele două valori prescrise;
- În așteptarea inițierii fenomenului tranzitoriu se înregistrează valorile obținute de pe fiecare canal într-un buffer circular. Cu alte cuvinte, se memorează valoarea măsurată doar pe o durată de timp limitată, pe măsură ce se obțin noi valori, valorile vechi se șterg.
- Dacă se obține o valoare măsurată care nu se încadrează între cele două limite prescrise se consideră că procesul tranzitoriu a început și se continuă înregistrarea valorilor mărimii. Această tehnică se extinde și la mai multe canale, considerându-se fenomenul inițiat în momentul în care pe cel puțin un canal a fost obținută o valoare în afara domeniului specificat.

Folosind această tehnică pe lângă înregistrarea desfășurării fenomenului de la inițierea sa, se pot obține informații și pe o perioadă limitată înainte de aceasta, informații care pot fi utile în momentul în care interesează și cauzele care au produs inițierea procesului tranzitoriu.

În figura 2.15 se prezintă variația mărimii U în timp, și modul de declanșare a înregistrării regimului tranzitoriu. Se stabilesc limitele ValPlus, ValMinus ca în figură. Achiziția datelor în regimul tranzitoriu se declanșează în momentul în care valoarea achiziționată iese din acest domeniu de valori.

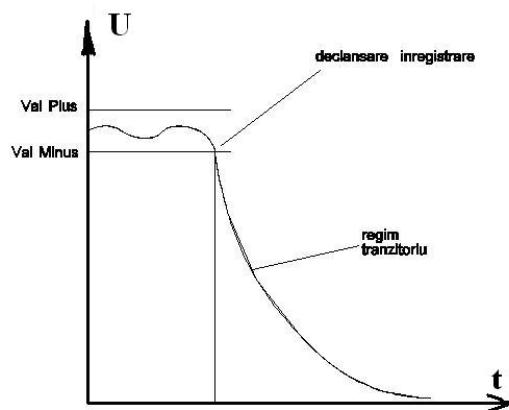


Figura 2.15. Înregistrarea unui fenomen tranzitoriu

Pentru achiziția mărimilor din regimuri tranzitorii, măsurarea se face în felul următor: mărimea care declanșează regimul tranzitoriu supus analizei se urmărește, reținându-se valorile momentane într-un buffer circular, care se șterge periodic, atâta timp cât mărimea nu iese dintr-un domeniu de valori prescrise (se rețin valorile momentane pentru toate mărimile care interesează). În momentul în care valorile măsurate ies din domeniul impus, programul de achiziție se autodeclanșează, reținându-se valorile din buffer-ul circular, și apoi reținându-se valorile momentane pentru toate mărimile care interesează.

Programul pentru achiziția mărimilor din regimurile tranzitorii permite următoarele facilități:

- se precizează mărimile, respectiv canalele pe care se face achiziția, tipul mărimii de pe fiecare canal și lanțul de măsură;
- se precizează domeniul de valori în care mărimea (mărimile) urmărită poate să varieze, fără ca procesul tranzitoriu să se considere declanșat;
- se precizează perioada de eșantionare, intervalul de timp pe care se face achiziția, după declanșarea regimului tranzitoriu, sau numărul de eșantioane achiziționate pe fiecare mărime;

În contextul existenței pe piață a unor sisteme comerciale pentru măsură și control, s-ar putea pune problema utilității dezvoltării unui mediu de programare integrat pentru achiziția și procesarea datelor rezultate din măsurători experimentale. Produsele existente la ora actuală pe piață sunt sisteme complexe, performante și cu un mare grad de generalitate, realizate pentru a fi utilizate în aplicații diverse. Pentru a fi folosite în domeniul mașinilor electrice, aceste sisteme mai necesită adăugiri în ceea ce privește cuplarea la bornele mașinii electrice de testat și în ceea ce privește prelucrarea datelor în scopul determinării parametrilor și caracteristicilor mașinilor și în final emiterea buletinelor de încercări pe tipuri de probe, conform cerințelor standardelor în vigoare.

Rezolvarea unora dintre problemele specifice software-ului din sistemele de testare a mașinilor electrice, care a făcut obiectul cercetărilor anterioare ale colectivului, este dificilă sau uneori imposibil de realizat conform cerințelor utilizatorului.

O altă problemă este legată de faptul că produsele software industriale aflate pe piață oferă suport numai pentru anumite plăci hardware, care trebuie achiziționate împreună cu programele respective.

Performanțele plăcii de achiziție PADC01-REV.B, folosită în sistemele dezvoltate în colectivul de cercetare al laboratorului D109, corespund cerințelor utilizatorului, Laboratorul pentru Testarea Mașinilor Electrice. În cazul utilizării în viitor a unei alte plăci de achiziție, se va putea ușor adapta, sau rescrie modulul software de achiziție a datelor, de dimensiuni reduse, care depinde în mare măsură de caracteristicile plăcii, restul sistemului însă nu va necesita modificări substanțiale.

2.3. Sistemul de Achiziție și Prelucrare a Datelor dedicat pentru încercarea mașinilor electrice – SAPDME2 – bazat pe Mediul LabVIEW

În acest subcapitol se prezintă o altă variantă de sistem de achiziție și prelucrare a datelor (SAPDME2) bazat pe mediul de programare LabVIEW, utilizat de autor în laborator, sau cu ocazia unor testări în mediul industrial. Sistemul a fost conceput și implementat, pe structura hardware furnizată de National Instruments, de un colectiv din care autorul face parte. Contribuția autorului se referă la Blocul de Traductoare și Adaptare Semnale Analogice (BTASA) și la câteva module de programare.

Caracteristica esențială a mediului LabVIEW (**L**aboratory **V**irtual **I**nstrument **E**ngineering **W**orkbench) este aceea că utilizează simboluri grafice intuitive pe panouri frontale și diagramele bloc pentru dezvoltarea aplicațiilor pe care le realizează utilizatorul.

LabVIEW este un sistem ierarhizat, deoarece orice Instrument Virtual creat de utilizator poate fi reprezentat grafic printr-un simbol ce poate la rândul lui să fie folosit în diagrama bloc a unui Instrument Virtual mai complex. Biblioteca de simboluri grafice pe care le conține LabVIEW poate fi îmbogățită continuu cu simboluri grafice nou create de utilizator.

Rezultă un mediu de dezvoltare, în continuă construcție, în care utilizatorii pot cu ușurință proiecta, combina, interschimba și partaja module de program, în scopul realizării achiziției, analizei, prelucrării și prezentării datelor.

Principalele facilități oferite de programarea grafică sunt:

- operează cu pictograme, care se găsesc într-o bibliotecă foarte bogată de simboluri grafice;
- se bazează pe programare intuitivă, ce folosește diagramele grafice ca mod de realizare a codului sursă;
- permite programarea modulară;
- include toate facilitățile oferite de mediile de programare convenționale;
- Instrumentele Virtuale complexe se pot descompune în Instrumente Virtuale din ce în ce mai simple, astfel încât orice program, oricât de complex, se poate descompune în subrutine simple, ușor de abordat.

Dacă Instrumentul Virtual, realizat sub mediul LabVIEW, este utilizat pentru obținerea de date achiziționate dintr-un experiment, calculatorul trebuie să fie echipat cu un Modul (Placă) de Achiziție de Date produsă de Național Instruments.

2.3.1. Structura hardware

Schema bloc de principiu utilizată și în acest caz respectă schema prezentată în figura 2.8. În acest caz însă pretențiile față de resursele ordinatului cresc datorită cerințelor minimale reclamate de platforma LabVIEW și de interfața Modulului (Plăcii) de Achiziție de Date față de magistrala de date a ordinatului.

Blocul de Traductoare și Adaptare de Semnale Analogice BTASA

Pentru cuplarea la mașina de încercat poate fi folosit același Bloc de Traductoare și Adaptare de Semnale Analogice, descris în paragraful 2.2.

Suplimentar, autorul a mai realizat un BTASA pentru cazul în care este nevoie de separare galvanică între toate canalele pentru măsurarea tensiunii, respectiv între toate canalele pentru măsurarea curentului.

Panoul frontal al BATSA este prezentat în figura 2.16 a), unde se poate remarca existența a patru canale de tensiune, cu domeniul de intrare de 10 V, 110 V, 240 V și 450 V și a patru canale de curent, cu domeniul de 5 A. BATSA a fost

realizat cu traductoare de curent de tip LA 25-NP și cu traductoare de tensiune de tip LA 25-P. Suplimentar, BTASA permite cuplarea a două traductoare de curent cu separare galvanică de tip LEM de 500 A și 1000 A, prin intermediul unor cuple aflate pe panoul lateral al BTASA, conform figurii 2.16 b).



Figura 2.16. a) Panoul frontal al BTASA al SAPDME2; b) Panoul lateral.

BTASA este de asemenea conectat la Modulul de Achiziție de Date prin intermediul unui cablu.

Configurația pinilor pentru conectorul (2X17 pini) de ieșire din BTASA spre Modulul de Achiziție de Date MAD este următorul:

- 1 - canal 1 măsurare tensiune cu separare galvanică;
- 3 - canal 1 măsurare curent cu separare galvanică;
- 5 - canal 2 măsurare tensiune cu separare galvanică;
- 7 - canal 2 măsurare curent cu separare galvanică;
- 9 - canal 3 măsurare tensiune cu separare galvanică;
- 11 - canal 3 măsurare curent cu separare galvanică;
- 13 - canal 4 măsurare tensiune cu separare galvanică
- 15 - canal 4 măsurare curent cu separare galvanică;
- 17 - canal 5 măsurare curent traductor extern cu separare galvanică 500 A
- 19 - canal 6 măsurare curent traductor extern cu separare galvanică 1000 A;
- 2,4,...20 - masa.

În continuare se prezintă succint caracteristicile a două plăci de achiziție de date produse de National Instruments, folosite în SAPDME2. Biblioteca de achiziții de date din LabVIEW conține instrumente virtuale care comandă aceste plăci de achiziție de date.

Modul de Achiziție de Date

În cadrul laboratorului D109 s-au achiziționat mai multe module (plăci) de achiziție de date produse de National Instruments. Se prezintă în continuare două dintre acestea: o placă de achiziție pentru semnale de frecvență joasă PC-MIO 16 E-4 și o placă achiziție de date pentru semnale de frecvență mai înaltă.

Placa de achiziție de date PC-MIO 16 E-4

Această placă de achiziție de date produsă de firma National Instruments este una dintre cele mai utilizate plăci de achiziție de date, de uz general.

Schema bloc a plăcii de achiziție de date este prezentată în figura 2.17 [94].

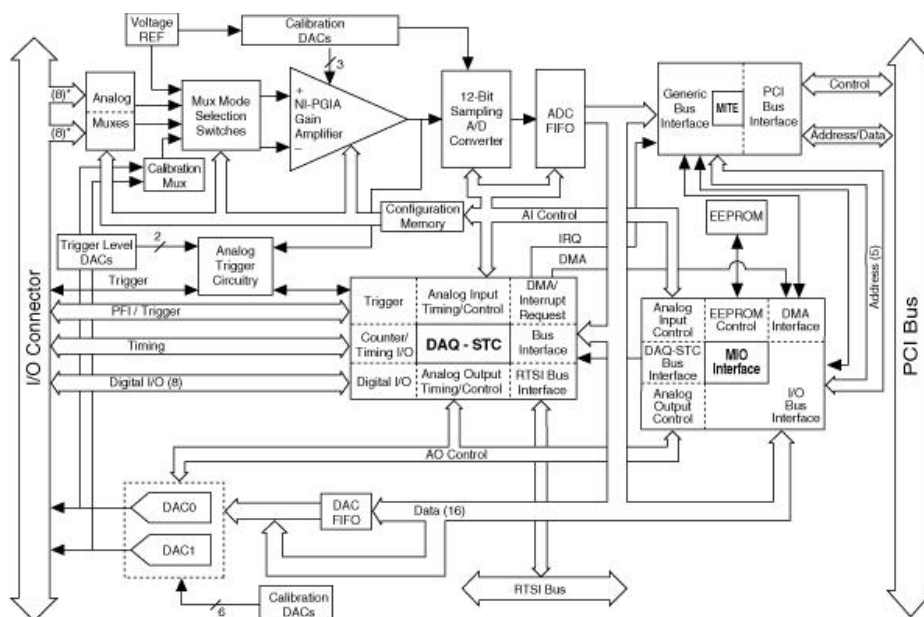


Figura 2.17. Schema bloc a plăcii de achiziție de date PC MIO 16 E.

Placa de achiziție de date are următoarele caracteristici principale:

- permite achiziția a 16 semnale analogice în configurație monopolară, sau bipolară, sau a 8 semnale analogice în configurație diferențială;
- poate furniza la ieșire 2 semnale analogice de comandă;
- poate achiziționa semnale convertite în frecvență;
- cele 16 canale de intrare analogice au amplificarea (câștigul) programabilă;
- poate schimba cu exteriorul semnale digitale grupate în 8 porturi digitale;
- rezoluția pe 12 biți;
- domeniul tensiunii de intrare ± 10 V;
- rata maximă de eșantionare 500.000 eșantioane/secundă (PCI-MIO 16E-4) și 1.250.000 eșantioane/secundă (PCI-MIO 16E-1).

Conectorul de cuplare al plăcii de achiziție are terminalele configurate conform schemei din figura 2.18 [94].

Pentru conectare la BTASA a fost necesar să se facă un adaptor între cele două tipuri de conectori (conectorul existent pe BTASA și conectorul existent pe placa PCI-MIO 16E-1).

AI 8	34	68	AI 0
AI 1	33	67	AI GND
AI GND	32	66	AI 9
AI 10	31	65	AI 2
AI 3	30	64	AI GND
AI GND	29	63	AI 11
AI 4	28	62	AI SENSE
AI GND	27	61	AI 12
AI 13	26	60	AI 5
AI 6	25	59	AI GND
AI GND	24	58	AI 14
AI 15	23	57	AI 7
AO 0 ¹	22	56	AI GND
AO 1 ¹	21	55	AO GND
AO EXT REF ¹	20	54	AO GND
P0.4	19	53	D GND
D GND	18	52	P0.0
P0.1	17	51	P0.5
P0.6	16	50	D GND
D GND	15	49	P0.2
+5 V	14	48	P0.7
D GND	13	47	P0.3
D GND	12	46	AI HOLD COMP
PFI 0/AI START TRIG	11	45	EXT STROBE
PFI 1/AI REF TRIG	10	44	D GND
D GND	9	43	PFI 2/AI CONV CLK
+5 V	8	42	PFI 3/CTR 1 SRC
D GND	7	41	PFI 4/CTR 1 GATE
PFI 5/AO SAMP CLK	6	40	CTR 1 OUT
PFI 6/AO START TRIG	5	39	D GND
D GND	4	38	PFI 7/AI SAMP CLK
PFI 9/CTR 0 GATE	3	37	PFI 8/CTR 0 SRC
CTR 0 OUT	2	36	D GND
FREQ OUT	1	35	D GND

Figura 2.18. Configurația conectorului plăcii de achiziție de date PC-MIO 16 E-4.

Această placă de achiziție de date funcționează sub mediul LabVIEW, cu programe dezvoltate de utilizatori.

O parte din programele de achiziție și prelucrare a datelor pentru SAPDME2 a fost realizată de autor.

Placa de achiziție de date NI 5112

Placa de achiziție de date NI5112 este o placă de achiziție pe 2 canale separate destinată semnalelor cu o variație mai rapidă, cu frecvența de maxim 100 MHz, tip osciloscop.

Schema bloc a plăcii de achiziție de date este prezentată în figura 2.19.

Dintre caracteristicile care se pot remarca se amintesc următoarele:

- 2 canale separate de măsură, pe fiecare canal putându-se comanda separat amplificarea;
- lățimea bandei de frecvență 20 MHz (max. 100 MHz);

- rata maximă de eșantionare $2,5 \cdot 10^9$ eșantioane pe secundă (2,5 GE/s);
- memorie Onboard pentru eșantioane 16/32 MB pe fiecare canal de măsură;
- tensiunea maximă de intrare 42 V.

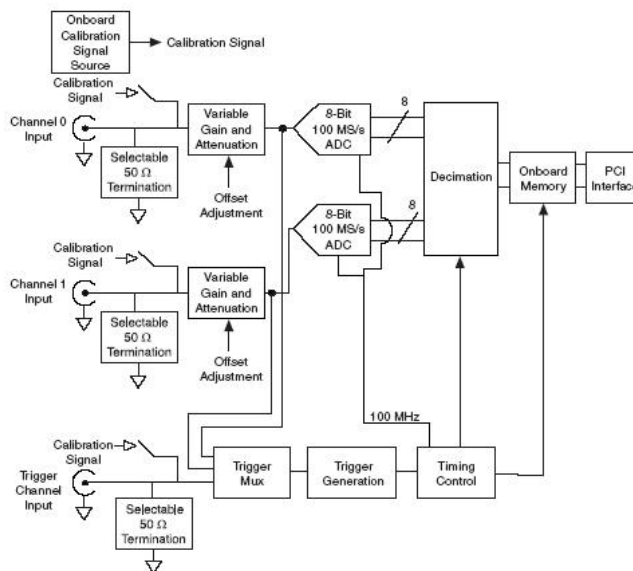


Figura 2.19. Schema bloc a plăcii de achiziție de date NI5112.

În figura 2.20 se prezintă configurația conectorilor plăcii NI 5112 [95].

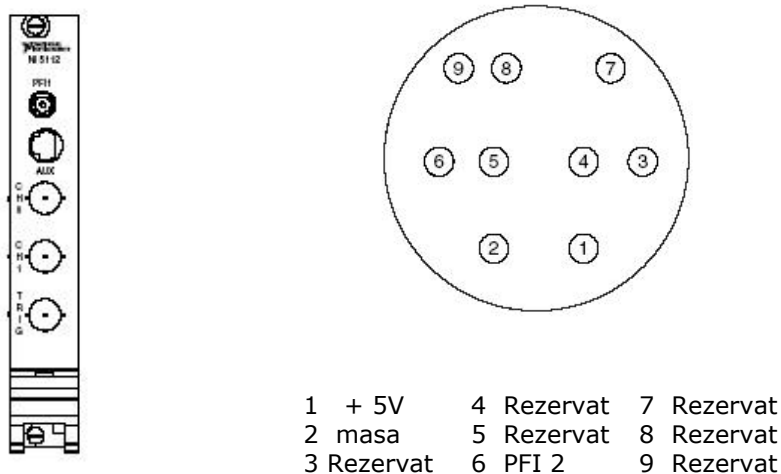


Figura 2.20. Configurația conectorilor plăcii NI 5112

Această placă de achiziție de date are asociat un driver software, denumit NI-SCOPE, care permite scrierea și dezvoltarea de aplicații în vederea achiziției semnalelor cu variație rapidă.

Se prezintă în continuare două programe de achiziție și prelucrare a datelor provenite din încercarea mașinilor electrice, unul pentru regimuri periodice permanente și unul pentru regimuri tranzitorii, ce rulează cu placa de achiziție de date PC-MIO 16 E-4.

2.3.2. Exemplu de program pentru analiza regimului permanent al mașinii de inducție

Programul este alcătuit dintr-un instrument virtual principal (VI) și 5 sub-instrumente virtuale (SubVI). Structura ierarhică a instrumentelor virtuale ce compun programul este următoarea:

```
daq_sim2.vi
    const.vi
    graph.vi
    rms2.vi
    av2.vi
    p2.vi
```

Ultimele 3 instrumente virtuale sunt doar subrutine de calcul, panoul frontal al acestora nefiind disponibil pentru utilizator în timpul execuției programului.

Fișiere de date necesare la inițializare: const.cfg
const.val

Fișierul const.cfg memorează configurația domeniilor (corespunzătoare modului de adaptare) pe care se face achiziția de date.

Fișierul const.val conține constantele pentru fiecare canal și domeniu de achiziție, constante care au fost determinate experimental și care înglobează erorile de măsurare introduse de ansamblul format din modul cu traductoare și placă de achiziție de date.

Instrumentul virtual principal, DAQ_SIM2.VI

Panoul frontal al instrumentului virtual *daq_sim2.vi* este prezentat în figura 20. Diagrama bloc a instrumentului nu este figurată, neprezentând interes pentru utilizator. În continuare va fi descris modul de lucru al instrumentului *daq_sim2.vi*, precum și interfața acestuia cu instrumentele subordonate.

După cum se vede, programul poate funcționa în două regimuri: simulare și achiziție propriu-zisă. Regimul de simulare este util în special pentru verificarea bunei funcționări a programului. În cazul funcționării în regim de simulare, programul își generează singur mărimile de intrare

Funcționare în regim de simulare

Trecerea în modul de funcționare ca simulator se face trecând comutatorul Simulare / Achiziție în poziția Simulare. Mărimile de intrare și ieșire pentru funcționarea în regim de simulator sunt cele din partea din stânga-sus a panoului frontal principal. Figura 2.21 prezintă panoul frontal al instrumentului virtual principal *daq_sim2.vi*.

- a) **Numărul de puncte / perioadă:** Este o mărime de intrare care stabilește numărul total de puncte pentru o perioadă completă a semnalului sinusoidal generat (tensiune sau curent). **Numărul de perioade:** Este tot o mărime de intrare care stabilește numărul de perioade pentru semnalele care vor fi generate. Trebuie să fie o mărime de tip întreg.

- b) **Numărul total de puncte**: Este o mărime de ieșire și rezultă din înmulțirea numărului de puncte / perioadă cu numărul total de perioade.
- c) **U_{max}** : Este o mărime de intrare și reprezintă valoarea maximă pentru semnalul de tensiune ce va fi generat de program. Este o mărime unică pentru toate cele trei semnale de tensiune.
- d) **I_{max}** : Este tot o mărime de intrare, analogă cu U_{max} , cu specificația că aceasta se referă la valoarea maximă a curentului.

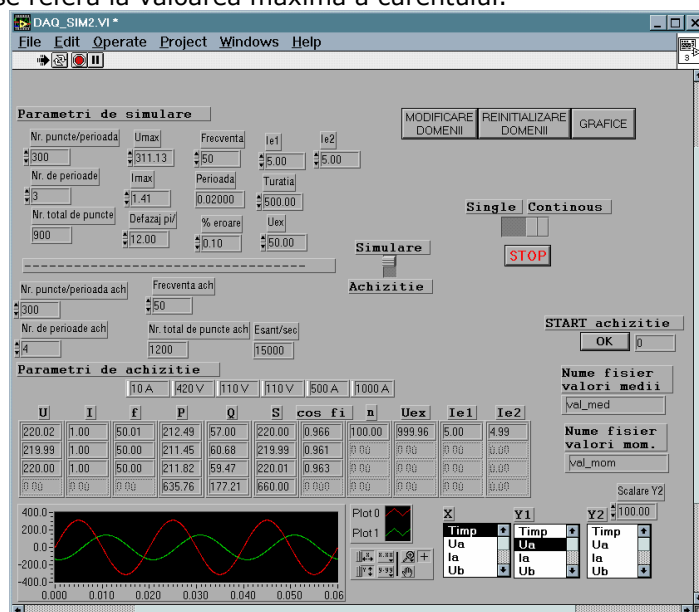


Figura 2.21. Panoul frontal al instrumentului virtual principal *daq_sim2.vi*

- e) **Defazaj pi/**: Este o mărime de intrare care precizează numitorul fracției pi/x, fracție care reprezintă defazajul, exprimat în radiani, între semnalul de tensiune și cel de curent corespunzătoare aceleiași faze. Este o mărime de tip real.
- f) **Frecvența**: Este de asemenea o mărime de intrare, care precizează frecvența semnalelor care vor fi generate. Este o mărime unică, fiind valabilă pentru toate cele șase semnale generate. Este tot o mărime de tip real.
- Perioada**: Este o mărime de ieșire și afișează perioada celor șase forme de undă ce vor fi generate.
- g) **% eroare**: Este o mărime de intrare de tip real care simulează imperfecțiunea semnalului. Pentru a simula faptul că semnalul care va fi achiziționat și analizat în continuare nu este perfect sinusoidal s-a suprapus peste generatorul unei forme de undă sinusoidale un generator de zgomot. Semnalul de zgomot utilizat este produs de către un generator de semnal aleator, cu baza de referință axa OX și cu amplitudinea cuprinsă între + sau - o valoare maximă specificată. Amplitudinea semnalului de zgomot este calculată prin înmulțirea mărimii % eroare cu amplitudinea tensiunii U_{max} , respectiv a curentului I_{max} . În figura 2.22 se prezintă un detaliu din diagrama bloc a instrumentului virtual principal *daq_sim2.vi*, detaliu care se referă la calculul procentual al nivelului de zgomot care urmează a fi suprapus peste semnalele de tensiune și curent generate. De remarcat că procentul de zgomot care va apare în semnalele generate este unic, fiind același pentru semnalele de tensiune și pentru semnalele de curent. De

asemenea, semnalul de zgomot va fi suprapus (evident tot în mod procentual din valoarea semnalului) și peste cele patru semnale continue, nesinusoidale care vor fi generate în regim de simulator.

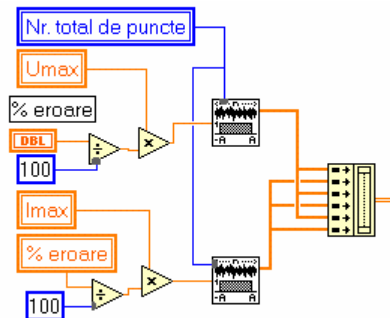


Figura 2.22. Detaliu al diagramei bloc referitor la calculul semnalului de eroare

- h) ***Ie1***: Mărime de intrare de tip curent. Este un semnal continuu, nesinusoidal. Este o valoare de tip real.
- i) ***Ie2***: Mărime analogă cu *Ie1*.
- j) **Turația**: Mărime de intrare de tip tensiune. Este tot un semnal continuu, nesinusoidal, și este de tip real. Acest canal este utilizat de obicei pentru achiziția unui semnal de tip tensiune de la un tahogenerator, semnal proporțional cu viteza de rotație a mașinii electrice.
- k) ***Uex***: Este tot o mărime de intrare de tip tensiune. Acest canal este destinat de obicei măsurării tensiunii de excitație la mașini sincrone. Dar este de remarcă faptul că ultimele patru canale descrise pot fi utilizate pentru achiziția oricăror altor mărimi, doar cu respectarea tipului acestora (tip tensiune, sau tip curent).

Funcționare în regim de achiziție de date

Referirea se va face tot la figura 2.21 în care se prezintă panoul frontal al instrumentului virtual principal. Trecerea în modul de funcționare ca program de achiziție de date se face trecând comutatorul Simulare / Achiziție în poziția Achiziție. Mărimile de intrare și ieșire pentru funcționarea în regim de sistem de achiziție de date sunt cele din partea din stânga a panoului frontal principal, dedesubtul liniei întrerupte.

- a) ***Nr de puncte / perioadă ach***: Este o mărime de intrare. Reprezintă numărul total de puncte pe fiecare perioadă achiziționată. Este o mărime de tip întreg.
- b) ***Nr. de perioade ach***: Este tot o mărime de intrare de tip întreg, care precizează numărul total de perioade care vor fi achiziționate.
- c) ***Frecvența ach***: Este o mărime de intrare de tip real, care furnizează programului frecvența aproximativă a semnalului care se dorește a fi achiziționat.
- d) ***Nr. total de puncte ach***: Este o mărime de ieșire care are tipul întreg și care reprezintă numărul total de puncte achiziționate, referitor la una din cele 10 mărimi de intrare care pot fi achiziționate. Valoarea sa este obținută prin înmulțirea numărului de puncte pe perioadă achiziționată cu numărul de perioade achiziționate.
- e) **Esant/sec**: Este o mărime de ieșire de tip întreg, care prezintă o importanță deosebită pentru sistemul de achiziție de date. Matematic, valoarea sa se obține

prin înmulțirea frecvenței aproximative a semnalului care urmează a fi achiziționat cu numărul de puncte corespunzător unei perioade achiziționate. Unitatea sa de măsură este "eșantioane / secundă" (sau, în limba engleză "samples / second"). Această mărime reprezintă numărul de eșantioane (puncte) care urmează să fie achiziționate de sistemul de achiziție într-o secundă, și este în directă legătură cu performanțele plăcii de achiziție utilizate în sistem. Numărul maxim de eșantioane care poate fi achiziționat într-o secundă de o anumită placă de achiziție este o valoare de catalog. Depășirea acestei valori poate produce blocarea sistemului de achiziție.

Programul *daq_sim2.vi* are, pe lângă comenzile de start achiziție și stop, un meniu aflat în partea din dreapta-sus a panoului frontal, meniu care conține trei comenzi, și anume:

- Modificare domenii. Această comandă permite modificarea domeniilor de tensiune și/sau curent pe care se face achiziția. Prin apăsarea pe acest buton se va lansa în execuție un alt instrument virtual, *const.vi*, instrument care operează ca subrutina pentru *daq_sim2.vi*. Efectul imediat va fi apariția unei ferestre care va permite utilizatorului să opereze setările dorite.
- Reinițializare domenii. Pentru ca setările operate în fereastra corespunzătoare panoului frontal al instrumentului *const.vi* să aibă efect imediat, este necesar să se confirme acest lucru prin apăsarea butonului Reinițializare domenii.

Grafice. Această comandă are ca efect lansarea în execuție a subrutinei *graph.vi*.

Instrumentul virtual *const.vi*

Figura 2.23 prezintă panoul frontal al instrumentului virtual *const.vi*. Instrumentul virtual *const.vi* operează ca o subrutină a programului principal *daq_sim2.vi*. Acesta se lansează în execuție prin apăsarea butonului Modificare domenii de pe panoul frontal al instrumentului *daq_sim2.vi*. Inițializarea sa se face la începutul rulării programului principal sau ori de câte ori este apăsat butonul Reinițializare domenii. La lansarea în execuție a subrutinei *const.vi*, vor apărea marcate domeniile care sunt setate la momentul respectiv. După setarea noilor domenii, la apăsarea butonului Accept, noile valori vor fi scrise în fișierul *const.cfg*. Ieșirea din fereastră se va face prin apăsarea butonului STOP. În cazul în care este necesar, reinițializarea se va face prin apăsarea butonului Reinițializare domenii de pe panoul frontal al programului principal.

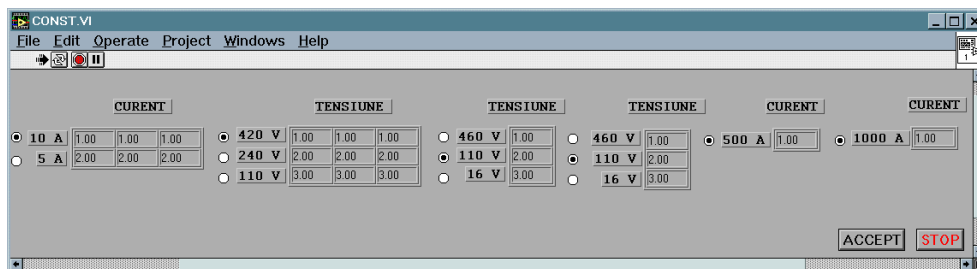


Figura 2.23. Panoul frontal al instrumentului *const.vi*

Instrumentul virtual *GRAPH.VI*

Figura 2.24 prezintă panoul frontal al instrumentului virtual *graph.vi*. Subrutina servește la trasarea graficelor, plecând de la valorile înscrise în fișierele cu date achiziționate (valori momentane) sau calculate (valori anterioare). Fișierul cu

valori momentane conține setul de valori achiziționate la un moment dat, pe când fișierul cu valori medii (sau anterioare) conține valorile calculate (medii sau efective) pe parcursul sesiunii respective de achiziție de date.

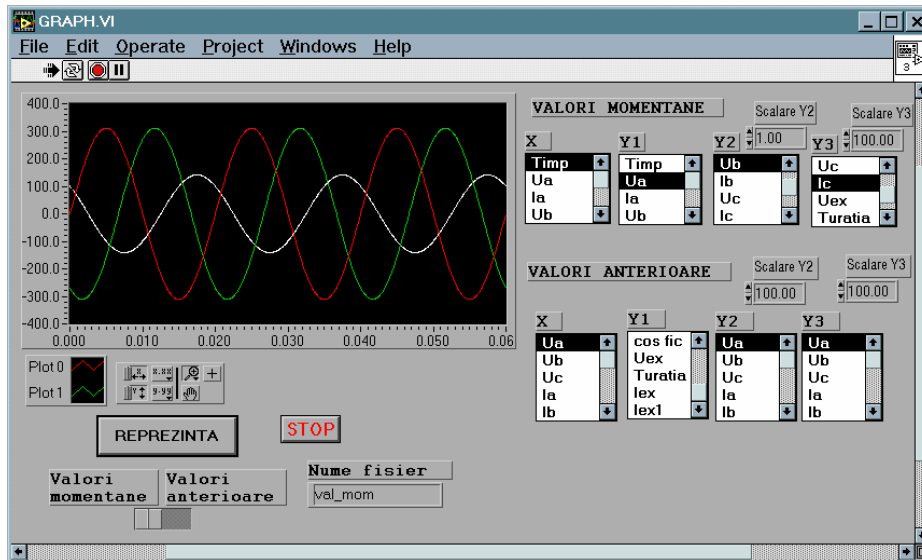


Figura 2.24. Panoul frontal al instrumentului *graph.vi*

Instrumentul virtual *rms2.vi*

Subrutina *rms2.vi* servește la calcularea valorii efective pentru tensiune și curent. O importanță deosebită trebuie acordată momentului trecerii prin zero a tensiunii. S-a presupus suficient de precis următorul procedeu: Se consideră că s-a depășit axa OX dacă unei valori negative îi urmează zece valori pozitive. Apoi se consideră că momentul trecerii prin zero este dat de intersecția dintre axa OX și dreapta ce trece prin cele două puncte corespunzătoare valorii negative și primei dintre cele zece valori pozitive. Acest procedeu este ilustrat în detaliu din diagrama bloc, prezentat în figura 2.25. Valoarea efectivă se calculează pentru fiecare perioadă achiziționată, mărimea ce se va afișa fiind o medie aritmetică între valorile efective (pentru tensiune sau curent) corespunzătoare tuturor perioadelor achiziționate.

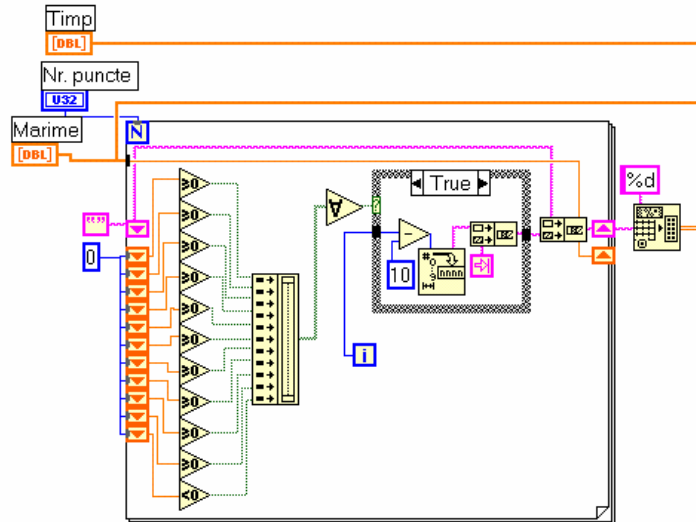


Figura 2.25. Detaliu din diagrama-bloc a instrumentului rms2.vi

Instrumentul virtual av2.vi

Instrumentul *av2.vi*, al cărui diagramă-bloc este prezentată în figura 2.26, calculează valoarea medie a mărimilor achiziționate pe ultimele patru canale (turație, tensiune de excitație, curent1 respectiv curent2).

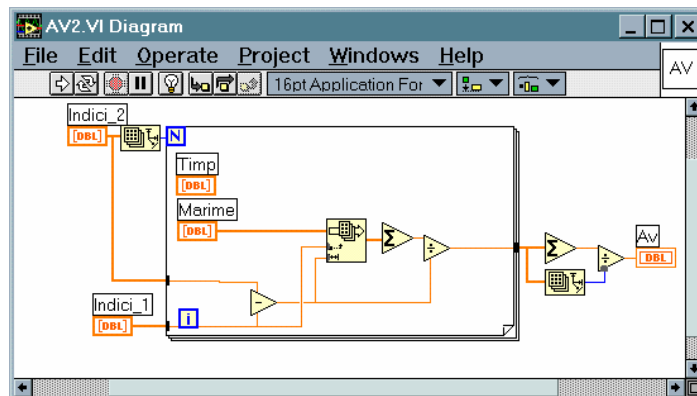


Figura 2.26. Diagrama-bloc a instrumentului av2.vi

Instrumentul virtual p2.vi

Instrumentul virtual *p2.vi* a cărui diagramă-bloc este prezentată în figura 2.27, calculează puterea activă pe cele trei faze pornind de la valorile achiziționate pentru tensiune și curent, utilizând formula:

$$P = \int_{t_1}^{t_1+T} u(t) \cdot i(t) dt$$

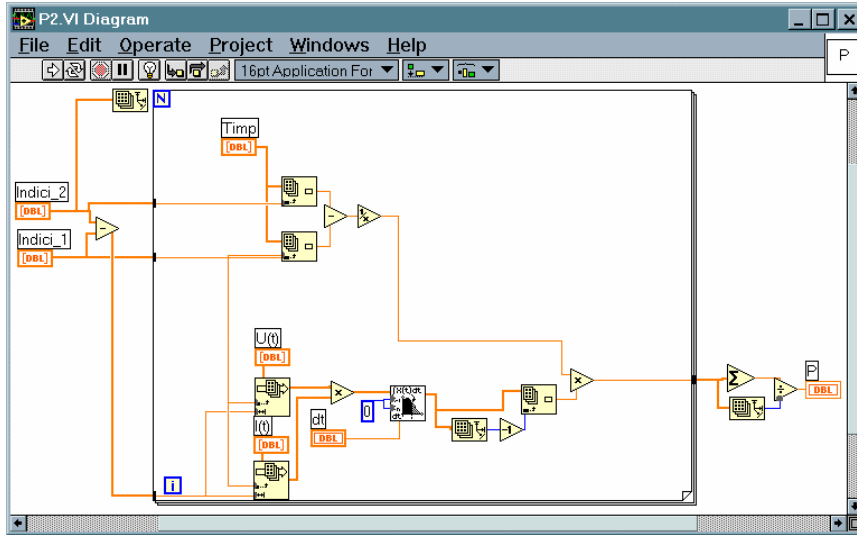


Figura 2.27. Diagrama-bloc a instrumentului p2.vi

2.3.3. Exemplu de program pentru analiza regimului tranzitoriu al mașinii de inducție

Programul de achiziție a regimurilor tranzitorii se compune din două sub-programe care pot fi considerate două instrumente virtuale.

1. *V2.vi* care realizează surprinderea procesului tranzitoriu;
2. *citiretr.vi* care oferă posibilitatea citirii unor fișiere în care au fost surprinse procesele tranzitorii.

Programul *V2.vi* are o interfață interactivă cu utilizatorul, panoul frontal, prezentat în figura 2.28. Pe acest panou-frontal se pot observa mărimile de intrare și cele de ieșire.

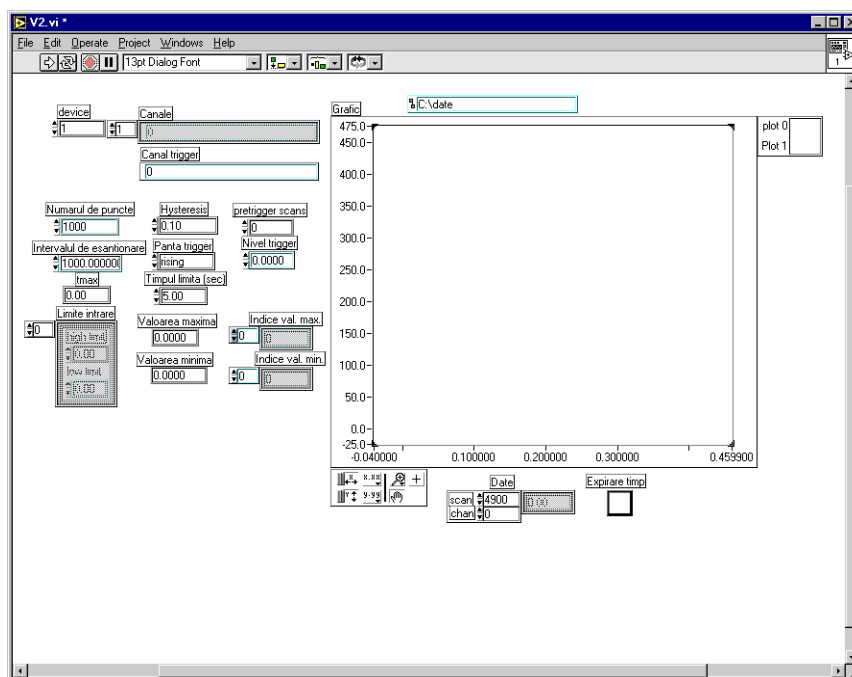


Figura 2.28. Panou-frontal al instrumentului virtual *V2.vi*

Mărimi de intrare:

1. **device** este o mărime de intrare prin care se poate atribui placa prin care se face achiziția de date. În cazul în care se dorește achiziția unor mărimi acestea se pot face prin intermediul unor plăci de achiziție care se vor preciza. Astfel pe calculatorul pe care se rulează programul "V2.vi" pot exista o placă de achiziție sau mai multe. În acest caz prin această mărime de intrare se poate alege una din plăcile de achiziție existente prin atribuirea unui număr.
2. **Canale** reprezintă o mărime de intrare prin care se poate face o corespondență între canalele de intrare ale plăcii de achiziție de date și mărimile fizice măsurate. Tot prin această mărime de intrare se poate defini câte mărimi se achiziționează.
3. O altă mărime de intrare este calea și numele fișierului unde pot fi salvate mărimile achiziționate (ex. c:\date\achizitie1).
4. **Numărul de puncte** reprezintă numărul de puncte care se stabilește de utilizator a fi achiziționate.
5. **Intervalul de eșantionare** reprezintă intervalul de timp Δt între care se face două citiri.

6. **Canal trigger** reprezintă canalul care este urmărit pentru a lansa programul de achiziție în momentul declanșării procesului tranzitoriu.
7. **Pantă trigger** are trei variante opționale ce pot fi alese pentru a declanșa procesul de achiziție în cazul apariției regimului tranzitoriu (panta crescătoare, descrescătoare și nivel neschimbat).
8. **Nivel trigger** reprezintă pragul de la care se declanșează procesul de achiziție.
9. **Hystheresis** prin această valoare se poate stabili cât de fidel să fie urmărit nivelul trigger stabilit.
10. **Limite intrare** stabilește limita superioară și inferioară a mărimilor achiziționate pe canalele de intrare.
11. **Timpul limită** este timpul limită după care se oprește rularea programului.
12. **Pretrigger scan** este timpul prin care se poate stabili cât din proces să fie surprins înainte de declanșarea regimului tranzitoriu.

Mărimi de ieșire

1. **Grafic** vizualizează variația mărimilor achiziționate pe canalele de intrare în funcție de timp.
2. **tmax** reprezintă timpul maxim ce rezultă din stabilirea numărului de puncte și a intervalului de eșantionare.
3. **Valoare maximă** reprezintă valoarea maximă care a fost surprinsă în timpul achiziției.
4. **Valoare minimă** reprezintă valoarea minimă care a fost surprinsă în timpul achiziției.
5. **Indice valoare max.** reprezintă indicele corespunzător valorii maxime.
6. **Indice valoare min.** reprezintă indicele corespunzător valorii minime.
7. **Date** cu acesta se poate observa orice dată de pe orice canal pe care a fost achiziționată o mărime. Pentru acest lucru trebuie introduse doar numărul canalului și indicele corespunzător valorii căutate.
8. **Expirare timp** semnalizează expirarea timpului stabilit cu ajutorul lui "Timp limită".

Diagrama bloc a programului V2.vi este prezentat în figura 2.29 și reprezintă o soluție grafică a problemei de programare fiind de asemenea și codul sursă pentru instrumentul virtual.

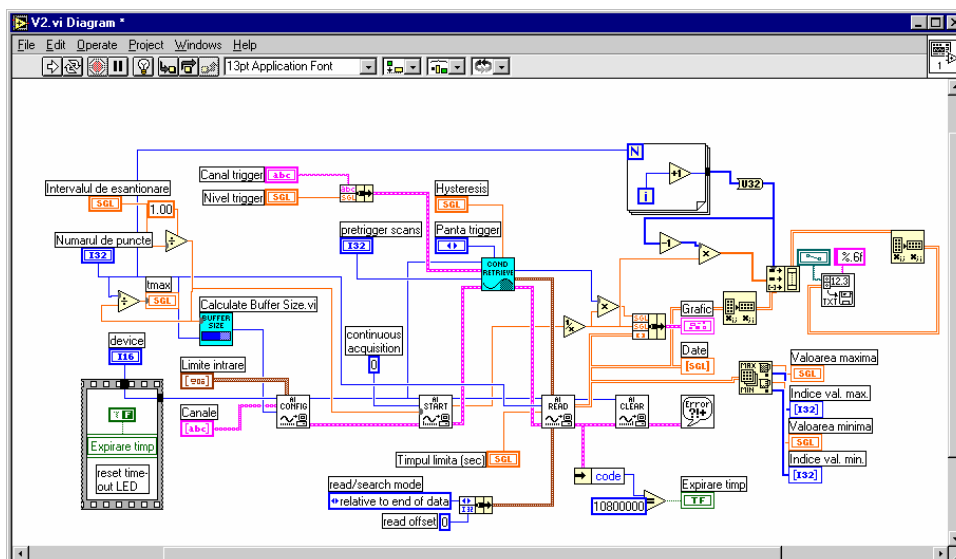


Figura 2.29. Diagrama bloc al instrumentului virtual V2.vi

Programul *citiretr.vi* are o interfață interactivă cu utilizatorul, este de fapt un instrument virtual, denumit panou-frontal, prezentat în figura 2.30.

Pe acest panou-frontal se pot observa mărimile de intrare și mărimile de ieșire.

Mărimi de intrare:

1. **c\Date** este locul unde trebuie introdusă calea de unde trebuie citit fișierul de date.
2. **Nume fișier** se introduce numele fișierului care se dorește a fi citit.
3. **Number of rows** prin această mărime de intrare se determină câte linii să se citească din întregul fișier.
4. **Call mode** determină modul în care se apelează fișierul din care se citesc datele de intrare.
5. **Tipărește** prin apăsarea acestui buton cu ajutorul mouse-ului se declanșează procesul de scoatere la imprimantă a graficului afișat pe panoul-frontal.
6. **Stop** prin apăsarea acestui buton se poate opri rularea programului.

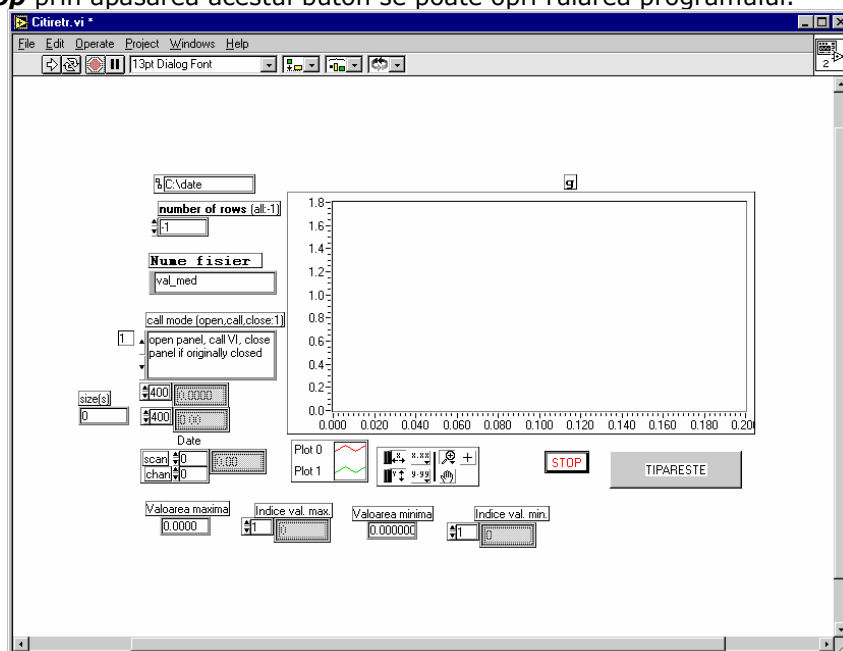


Figura 2.30. Panou-frontal al instrumentului virtual *citiretr.vi*

Mărimi de ieșire

1. **g** vizualizează mărimile citite din fișierul de intrare în funcție de timp.
2. **size** afișează numărul liniilor citite din fișier.
3. **Valoare maximă** reprezintă valoarea maximă care a fost surprinsă în timpul achiziției.
4. **Valoare minimă** reprezintă valoarea minimă care a fost surprinsă în timpul achiziției.
5. **Indice valoare max.** reprezintă indicele corespunzător valorii maxime.
6. **Indice valoare min.** reprezintă indicele corespunzător valorii minime.
7. **Date** cu acesta se poate observa orice dată de pe orice canal pe care a fost achiziționată o mărime. Pentru acest lucru trebuie introduse doar numărul canalului și indicele corespunzător valorii căutate.

Diagrama bloc a programului *citiretr.vi* este prezentată în figura 2.31 și reprezintă o soluție grafică a problemei de programare fiind de asemenea și codul sursă pentru instrumentul virtual.

Cu aceste două programe *V2.vi* și *citiretr.vi* se pot achiziționa și analiza diferite procese tranzitorii în care mărimile măsurate sunt electrice (curenți, tensiuni). Programul *citiretr.vi* este de fapt un program de citire a unor fișiere de date care au fost obținute din regimul tranzitoriu cu ajutorul programului *V2.vi*. Acest program *citiretr.vi*, pe lângă facilitățile care le are se mai poate îmbunătăți prin introducerea unor metode de filtrare astfel că datele brute obținute cu ajutorul *V2.vi* să fie prelucrate (eliminarea diferitelor erori) și apoi analizate. De asemenea pot fi introduse diferite metode de calcul al datelor analizate pentru a obține parametri dorțiți din analiza procesului tranzitoriu respectiv.

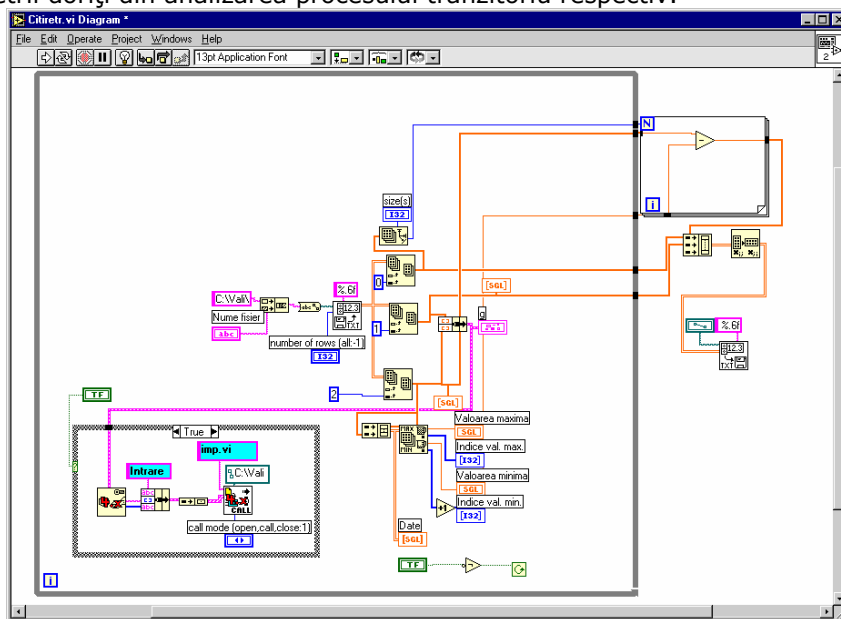


Figura 2.31. Diagrama bloc a instrumentului virtual *citiretr.vi*

2.4. Concluzii

În domeniul mașinilor electrice impactul Sistemului de Achiziție și Prelucrare a Datelor se manifestă prin următoarele aspecte principale:

- posibilitatea utilizării unor metode de testare, care, deși cunoscute în principiu, nu au putut fi aplicate în mod curent și eficient în practică datorită dificultăților legate de numărul mare de date necesar a fi achiziționate (măsurate) la intervale relativ mici de timp, precum și restricțiilor legate de precizie;
- dezvoltarea unor noi metode de testare, în special de regim tranzitoriu;
- perfecționarea modelelor matematice și a schemelor echivalente, mai ales în cazul parametrilor variabili cu frecvența, sau care depind de saturație;
- perfecționarea proiectării datorită posibilității de efectuare a unor teste de finețe a prototipului la nivel industrial;

- dezvoltarea monitorizării mașinilor electrice prin crearea unor sisteme care permit achiziția și prelucrarea în timp real a datelor.

Sistemul de Achiziție și Prelucrare a Datelor permite abordarea testării mașinilor electrice dintr-o nouă perspectivă. Acesta este un sistem modular, hardware și software, care permite încercarea mașinilor electrice aplicând metode moderne de încercare. Se folosesc programe de achiziții de date pentru măsurarea mărimilor atât din procese tranzitorii, cât și din procese în care evoluția în timp a mărimilor este periodică, permanentă.

Programele de achiziție permit înregistrarea și prelucrarea primară a datelor în regimuri variate de încercare.

Programul GENERAL rezolvă în totalitate necesarul de achiziție și prelucrare a datelor pentru regimuri în care mărimile au o variație periodică în timp. Cu acest program se pot achiziționa și prelucra date în regimuri cvasiperiodice cu amplitudine variabilă în timp, cum ar fi regimurile de pornire la motoarele de inducție.

Programul de regim tranzitoriu permite achiziționarea și prelucrarea mărimilor caracteristice din regimuri tranzitorii de stingeri de câmp, necesar în aplicarea metodelor moderne de testare a mașinilor sincrone.

Datorită faptului că Sistemele de Achiziție de Date permit eșantionarea și memorarea unui număr mare de date, se ajunge în situația în care prelucrarea acestui volum de date presupune utilizarea metodelor statistice.

Există producători de plăci de achiziție de date, care pun la dispoziție și programe, respectiv medii de programare pentru achiziție și prelucrare a datelor. Pentru realizarea unui sistem integrat de achiziție și prelucrare a datelor utilizatorul trebuie să-și realizeze adaptorul de proces, utilizând senzori și traductoare potrivite, precum și programe de prelucrare specifice domeniului în care activează.

Adaptoarele de proces au fost concepute și realizate în așa fel încât să satisfacă diverse variante de scheme de testare ale mașinilor electrice. Sunt utilizabile simultan un număr de 8 canale active pentru programele dezvoltate pe placa de achiziție de date concepută și realizată în colectivul de cercetare, sau 11 canale pentru situația utilizării platformei LabVIEW.

Domeniile de tensiune și curent sunt astfel alese încât să poată fi adaptate analogic practic la toate tipurile de semnale care apar la testarea mașinilor electrice: curenți și tensiuni în orice regim de funcționare, cu mărimi constante, sau variabile în timp.

Cele două sisteme de achiziție și prelucrare a datelor, SAPDME1 și SAPDME2, au fost verificate metrologic, prin grija autorului, care a contribuit la procesul de verificare prin conceperea procedurilor și schemelor de măsură și prin realizarea testelor. Pentru măsurarea mărimilor de tip tensiune și curent clasa de precizie a sistemelor este de 0,2%, iar pentru măsurarea puterii active clasa de precizie a sistemelor este de 0,5%.

Capitolul 3

Utilizarea Sistemelor de Achiziție și Prelucrare a Datelor pentru măsurare și determinare mărimilor caracteristice mașinilor electrice

Schema bloc de principiu utilizată la încercarea unei mașini de inducție utilizând Sistemul de Achiziție și Prelucrare a Datelor a fost prezentată în figura 2.8.

Sistemul trebuie să răspundă cerințelor achiziției și prelucrării datelor provenite din regimuri în care mărimile au o evoluție periodică în timp, numite regimuri permanente, și din regimuri tranzitorii în care mărimile au evoluție neperiodică în timp.

La mașina de inducție trifazată, cu ajutorul unui Sistem de Achiziție și Prelucrare a Datelor (SAPD) se măsoară în principal tensiunile și curenții pe cele trei faze ale mașinii. Suplimentar, se poate măsura turația la arborele mașinii, utilizând traductor de turație, eventual momentul de rotație la arborele mașinii, utilizând traductor de cuplu.

La măsurarea celor n mărimi cu SAPD, toate cele n mărimi de intrare se eșantionează cu o perioadă de eșantionare (T_{em}) egală cu produsul dintre numărul de canale măsurate și perioada de eșantionare a plăcii de achiziție (T_e):

$$T_{em} = n \cdot T_e. \quad (3.1.)$$

Pentru fiecare mărime de intrare rezultă un șir de valori momentane care descriu evoluția mărimii în timp, pe durata măsurării, pentru mărimea respectivă. Având variația în timp a mărimii, se pot calcula apoi diferite valori caracteristice pe baza relațiilor integrale de definiție cunoscute.

Se subliniază faptul că, în urma măsurării cu SAPD, toate mărimile sunt disponibile sub formă numerică, ceea ce permite prelucrarea ulterioară a datelor astfel obținute.

3.1. Măsurarea tensiunii

Pentru măsurarea tensiunii s-au luat în considerare atât regimuri permanente, cât și regimuri tranzitorii.

Pentru regimul periodic permanent, programul aferent acestui regim declanșează achiziția datelor corespunzătoare mai multor perioade care constituie un bloc de achiziție. Aceste perioade se compară între ele pentru identificarea corectă a mărimilor care definesc regimul (de exemplu frecvența).

Pe canalul de tensiune se achiziționează valorile momentane ale tensiunii, cu o anumită perioadă de eșantionare. Valorile momentane pot fi folosite ca atare, reprezentându-se variația în timp a tensiunii.

Pentru exemplificare se prezintă un bloc de achiziție obținut prin declanșarea unei măsurători la proba de funcționare în gol la un motor de inducție, pentru un anumit nivel al tensiunii de alimentare. Valorile momentane achiziționate sunt reprezentate prin forma de undă din figura 3.1, pentru un motor de inducție având puterea nominală $P_N = 1,1 \text{ kW}$ cu $p = 3$ perechi de poli.

Având momentele trecerii prin zero a tensiunii, se determină perioada, respectiv frecvența tensiunii.

Folosind relațiile integrale, se calculează cu precizie valoarea efectivă a tensiunii indiferent de gradul de deformare al tensiunii. Valoarea efectivă se

calculează pe fiecare perioadă în parte. Dacă tensiunea are o variație periodică de amplitudine constantă, atunci valoarea efectivă este constantă. În practică variația tensiunii nu este riguros periodică, amplitudinea tensiunii diferă de la o perioadă la alta datorită fluctuației rețelei de alimentare. În acest caz se calculează valoarea efectivă pe fiecare perioadă, putându-se calcula o medie a acestor valori efective, pentru perioadele achiziționate care corespund blocului de achiziție.

În cazul în care semnalul de tensiune este deformat, se face analiza armonică a lui. De asemenea, în aceste cazuri reprezintă un interes deosebit valorile de vârf ale tensiunii.

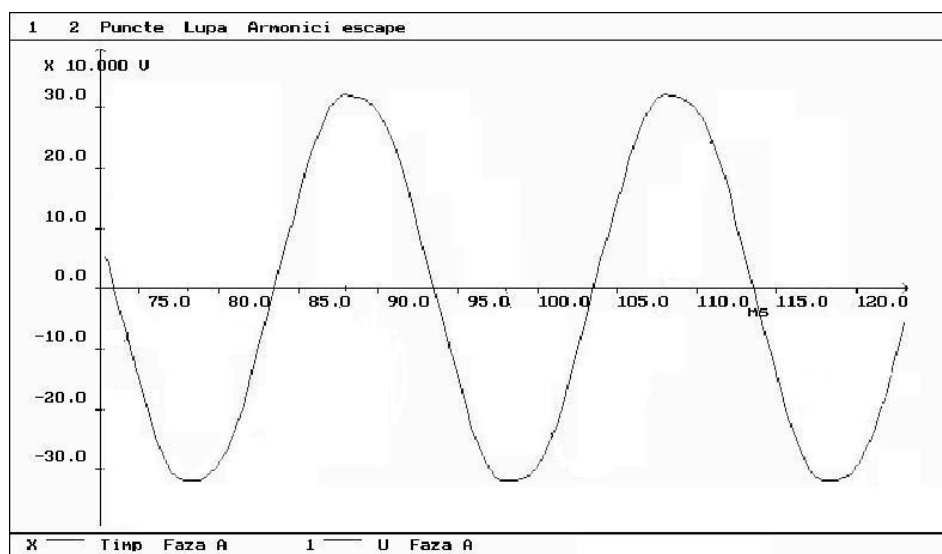


Figura 3.1. Bloc de achiziție de date la o probă de funcționare în gol: tensiunea funcție de timp.

Pe lângă tensiunile cu variație periodică, de amplitudine constantă, există posibilitatea achiziționării tensiunilor în regim tranzitoriu. De multe ori, în aceste regimuri, din momentul începerii achiziției, până în momentul declanșării procesului tranzitoriu care interesează, trece un interval de timp mare, ceea ce implică achiziționarea unui număr mare de date, care de cele mai multe ori sunt inutile. De aceea se urmărește ca mărimea care interesează să se mențină într-o plajă de valori, fenomenul tranzitoriu considerându-se declanșat în momentul în care valoarea mărimii respective iese din limitele stabilite. Atâta timp cât valoarea mărimii urmărite se menține între limitele prescrise, valorile achiziționate sunt păstrate într-un buffer circular, care se golește periodic (cu alte cuvinte se memorează comportarea intrării/intrărilor doar pe o durată de timp limitată, pe măsură ce se obțin valori noi, cele vechi se șterg). Dacă se obține o valoare măsurată care nu se încadrează între limitele prescrise, se consideră că procesul tranzitoriu a început și se continuă înregistrarea sa. Folosind această tehnică pe lângă înregistrarea desfășurării fenomenului de la inițierea sa, se pot obține informații și pe o perioadă limitată înainte de aceasta, informații care pot fi utile în momentul în care interesează și cauzele care au produs inițierea procesului tranzitoriu.

Având variația în timp a mărimii, se pot calcula mărimi caracteristice (valoarea efectivă, valoarea medie) luând în considerare fiecare perioadă în parte.

În studiul comportării mașinilor de inducție se are în vedere mai mult forma de undă a tensiunii în regimuri staționare și cvasistaționare și mai puțin variațiile tensiunii în regimuri tranzitorii. Dacă se dorește măsurarea tensiunii în procese tranzitorii, se achiziționează valoarea momentană a tensiunii în întregul interval de timp în care interesează procesul respectiv, urmând să se facă apoi analiza semnalului de tensiune.

3.2. Măsurarea curentului

La fel ca și la măsurarea tensiunii, se eșantionează mărimile de intrare din regimuri staționare, sau regimuri tranzitorii. Se achiziționează valorile momentane ale curentului, pe baza cărora se reprezintă evoluția în timp a lui.

În figura 3.2 se prezintă un bloc de achiziție corespunzător curentului de fază în cazul unui motor de inducție care funcționează în gol (motor cu $P_N=1,1$ kW și $p=3$). Având această variație în timp, la fel ca și la măsurarea tensiunii se poate determina perioada, respectiv frecvența semnalului. Apoi, folosind formulele integrale se determină valoarea efectivă și valoarea medie a curentului, pentru fiecare perioadă în parte. Folosirea relațiilor integrale la determinarea valorilor efective și medii ale curenților face ca, indiferent de gradul de deformare a acestuia, rezultatele de calcul să fie corecte.

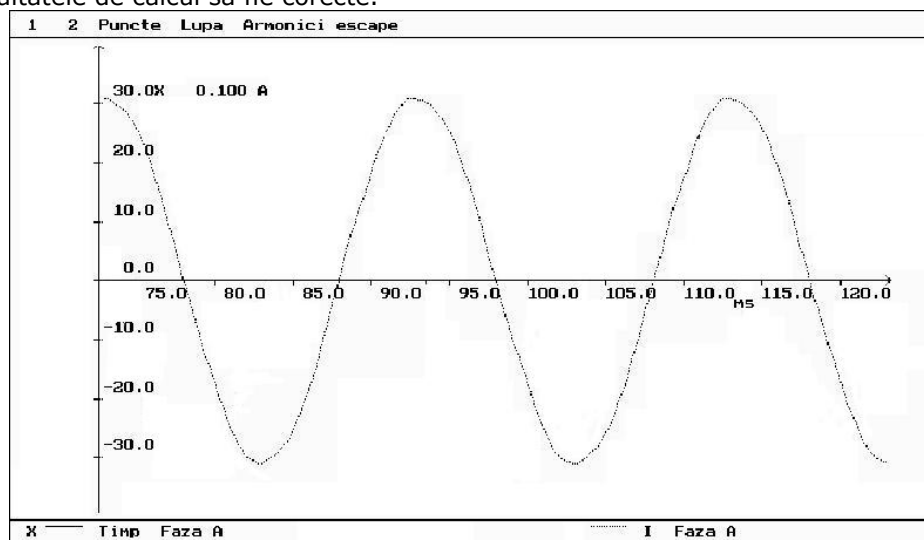


Figura 3.2. Variația în timp a curentului într-o probă de funcționare în gol a motorului de inducție ($P_N=1,1$ kW și $p=3$).

Pentru cazul în care amplitudinea curentului este variabilă (se au în vedere porniri ale motoarelor de inducție, procese în care amplitudinea curentului este maximă la conectare și pe măsură ce alunecarea scade, amplitudinea curentului scade, până se stabilizează la o valoare de regim permanent) se achiziționează valorile momentane ale curentului pe toată perioada pornirii, urmând ca după aceea să se calculeze valoarea efectivă pe fiecare perioadă în parte.

În figura 3.3 sunt reprezentate tensiunea și curentul de fază într-o probă de pornire în gol în cazul unui motor de inducție având $P_N=0,370$, kW, cu $p=2$.

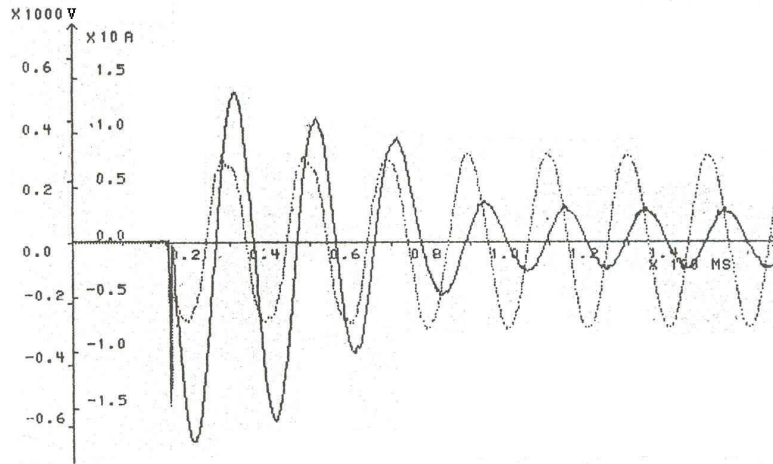


Figura 3.3. Variația în timp a curentului (linie plină) și a tensiunii (linie punctată) într-o probă de pornire în gol a unui motorului de inducție ($P_N=0,370$, kW, cu $p=2$).

În acest caz pornirea motorului de inducție s-a făcut prin alimentarea motorului printr-un transformator reglabil, la tensiunea nominală. Se poate observa că la conectarea motorului de inducție la sursa de tensiune, amplitudinea curentului este mai mare, iar după 3-4 perioade amplitudinea curentului scade la o valoare constantă. Totodată, datorită faptului că alimentarea motorului de inducție se face prin intermediul unui transformator trifazat, la conectare se observă o ușoară micșorare a amplitudinii tensiunii de alimentare, pe intervalul celor 3-4 perioade în care motorul de inducție pornește.

Prin prelucrarea valorilor momentane ale curentului pe fiecare perioadă, se calculează valoarea efectivă a curentului pe fiecare perioadă. Reprezentând valorile efective ale curentului pe fiecare perioadă, în funcție de timp, rezultă o curbă ca cea din figura 3.4, în care este reprezentată variația valorii efective a curentului în timp, în procesul de pornire a unui motor de inducție de $P_N=1,1$ kW și $p=3$. Pentru a mări timpul de pornire a motorului de inducție, s-a mărit inerția motorului, iar alimentarea motorului s-a făcut la tensiune scăzută, caz în care se diminuează corespunzător și momentul de rotație la arborele motorului.

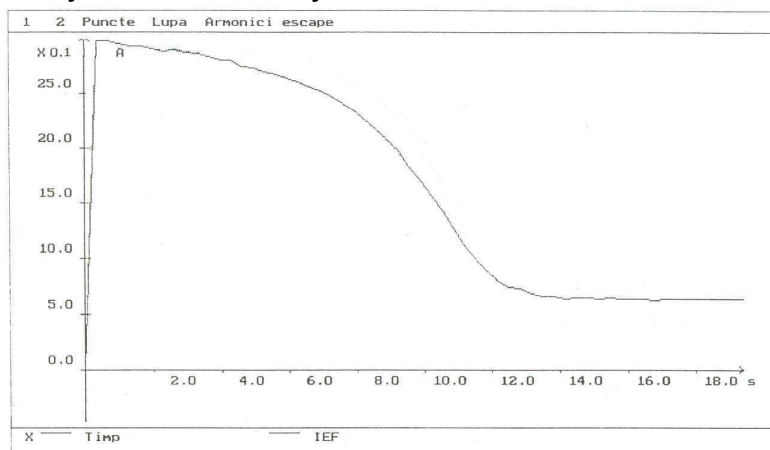


Figura 3.4. Variația în timp a valorii efective a curentului la pornire în gol, cu inerție mărită, a motorului de inducție ($P_N=1,1$ kW și $p=3$).

Măsurătorile cu SAPD relevă unele aspecte fenomenologice care ar fi greu de scos în evidență cu aparatura clasică de măsură. De exemplu deformările de undă care apar în evoluția în timp a tensiunii și a curentului.

De asemenea, aparatura obișnuită de măsură poate fi folosită doar în anumite domenii de frecvență, pe când SAPD funcționează la fel de bine în întreaga bandă de frecvență, care acoperă cu ușurință plaja 0-100.000 Hz.

Un regim aparte, care nu poate fi pus în evidență cu mijloace obișnuite de măsură, dar care este ușor de evidențiat folosind SAPDME1, apare în cazul probei de sarcină artificială, obținută prin alimentarea motorului cu tensiune de frecvență mixată.

În figura 3.5 se prezintă variația în timp a tensiunii și curentului pentru un motor de inducție alimentat cu tensiune obținută prin amestec de frecvențe. Motorul de inducție are $P_N=7,5$ kW cu $p=2$.

Determinarea parametrilor mașinilor electrice se face uneori din probe statice de stingeri de curent, cu rotorul în repaus, utilizând SAPD. Înfășurările mașinii sunt alimentate în curent continuu și apoi sunt scurtcircuitate. Proba este simplă, dar necesită înregistrarea unui regim tranzitoriu care presupune un număr mare de date și o perioadă de eșantionare mică, mai ales în faza inițială a procesului. În figura 3.6. se prezintă variația în timp a curentului, în experimentul de stingere a curentului.

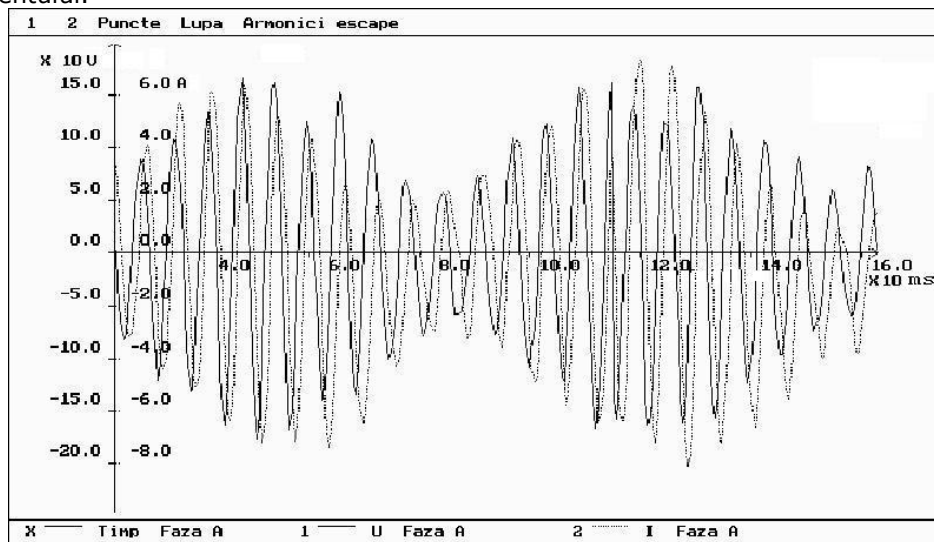


Figura 3.5. Variația în timp a tensiunii (linie plină) și a curentului (linie punctată) motorului de inducție ($P_N=7,5$ kW cu $p=2$) în cazul alimentării cu tensiune de frecvență mixată.

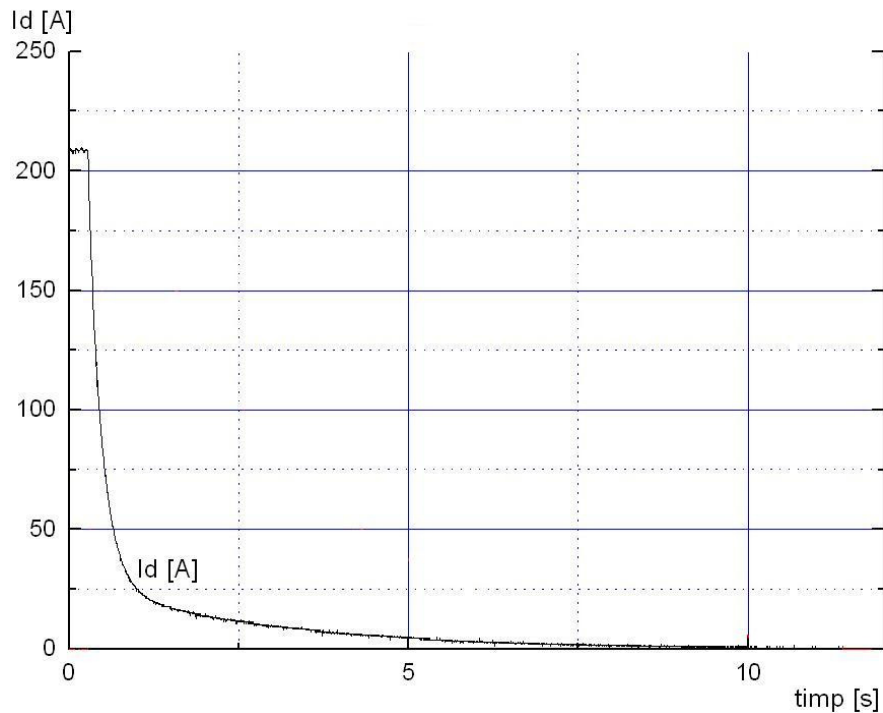


Figura 3.6. Regimul tranzitoriu de stingere de curent.

3.3. Determinarea puterilor

Determinarea puterii active folosind SAPD se realizează indirect, prin calcul. Sistemul măsoară valoarea momentană a tensiunii (u) și valoarea momentană a curentului (i). Calculează puterea instantanee ca produsul dintre valoarea momentană a tensiunii și valoarea momentană a curentului

$$p = ui . \quad (3.2)$$

Puterea activă se calculează din formula integrală

$$P = 1/T \int_0^T p dt , \quad (3.3)$$

ceea ce asigură valabilitatea calculelor indiferent de gradul de deformare.

În figura 3.7 se prezintă variația în timp a curentului de fază i și a puterii instantanee p absorbite de un motor de inducție la funcționarea în gol.

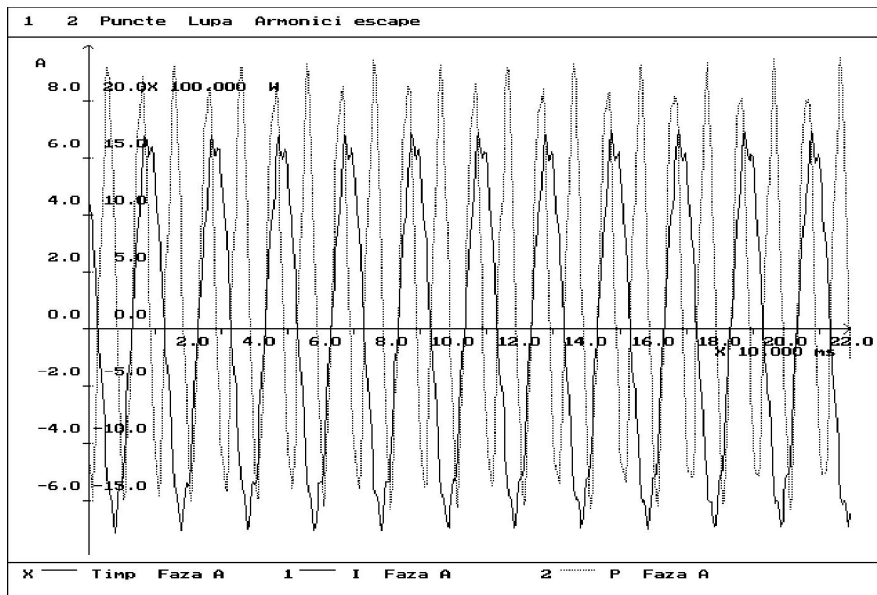


Figura 3.7. Variația în timp a curentului i (linie plină) și a puterii instantanee p (linie punctată) la proba de funcționare în gol a unui motor de inducție.

Pentru o probă de funcționare în scurtcircuit, în figura 3.8 se prezintă variația în timp a curentului de fază și a puterii instantanee p , iar în figura 3.9 se prezintă variația tensiunii de fază u și a puterii instantanee p .

SAPD asigură determinarea corectă a puterii active atât în regimurile periodice permanente, cât și în regimurile tranzitorii.

Puterea activă se măsoară mai dificil cu aparate clasice, din procese tranzitorii, dar se măsoară relativ ușor cu SAPD. În figura 3.10 se prezintă variația tensiunii, curentului și a puterii instantanee, în procesul tranzitoriu al pornirii unui motor de inducție. Procesul tranzitoriu este declanșat și se desfășoară la tensiune constantă (tensiunea rețelei). În procesul pornirii motorul de inducție se alimentează cu tensiune de amplitudine constantă, iar curentul are o variație cvasiperiodică, la început având o amplitudine mai mare, apoi amplitudinea curentului scade până la o valoare minimă, care corespunde regimului permanent de funcționare în gol a motorului.

Se poate determina perioada tensiunii de alimentare (T), respectiv frecvența (f) și defazajul (φ) dintre unda de tensiune și unda de curent. Aplicând formulele integrale, se poate calcula, pe fiecare perioadă, valoarea efectivă a tensiunii, curentului și puterea activă.

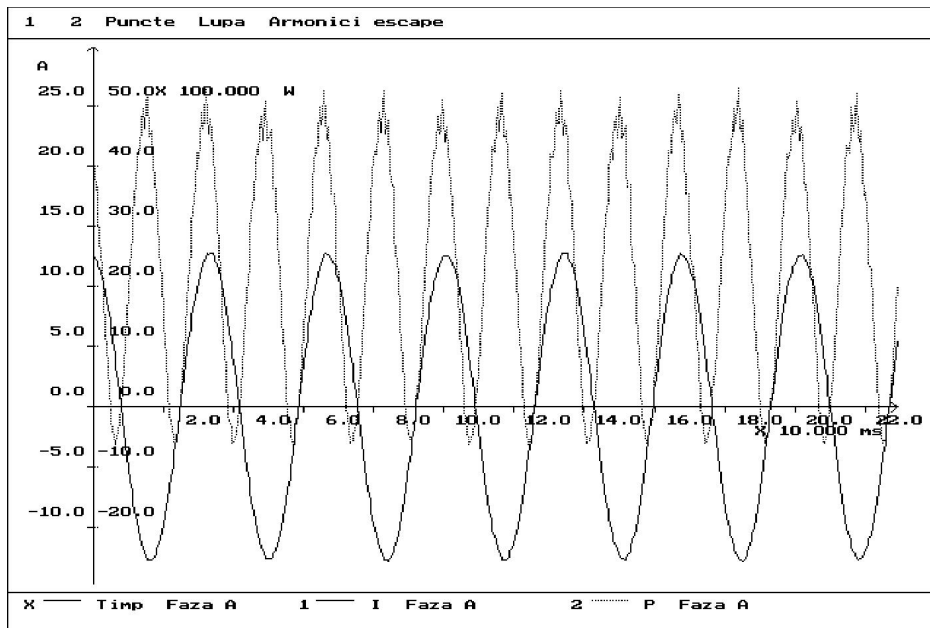


Figura 3.8. Variația în timp a curentului de fază i (linie plină) și a puterii instantanee p (linie punctată) la proba de funcționare în scurtcircuit a unui motor de inducție.

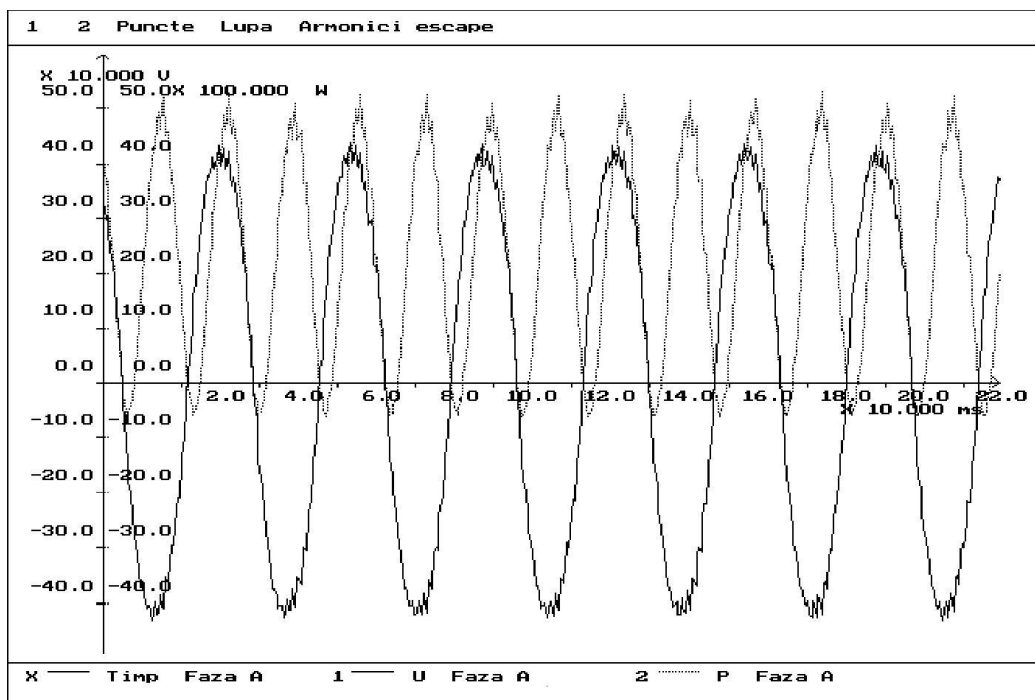


Figura 3.9. Variația în timp a tensiunii u (linie plină) și a puterii instantanee p (linie punctată) la proba de funcționare în scurtcircuit unui motor de inducție.

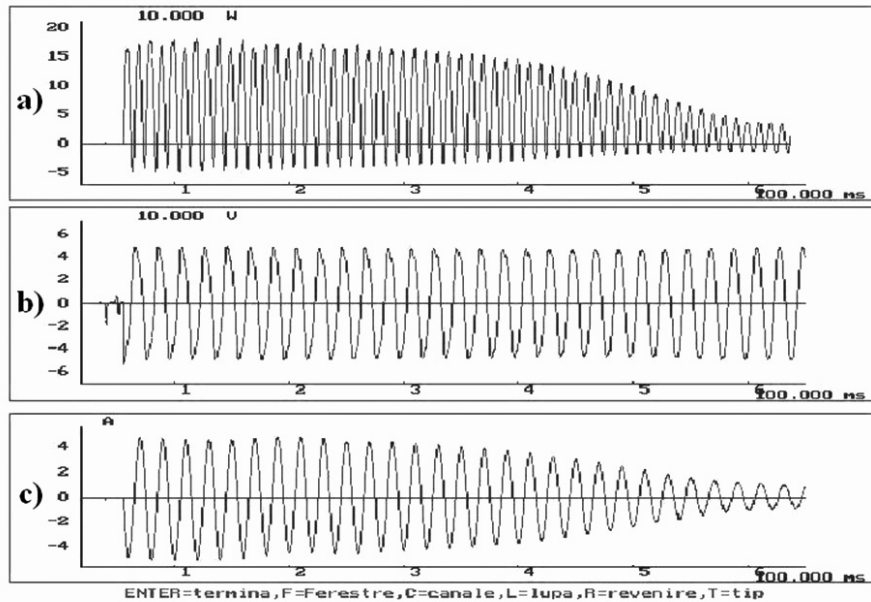


Figura 3.10. Variația în timp a puterii active (a), a tensiunii (b) și a curentului (c) la pornirea unui motor de inducție.

Este deosebit de importantă cunoașterea valorii curentului și a puterii active absorbite de la rețeaua de alimentare în regimul de pornire al motorului de inducție, deoarece acestea diferă destul de mult față de valorile nominale ale mașinii. Cunoașterea valorilor curentului și a puterii active absorbite în regimul de pornire al motorului de inducție este utilă atât pentru verificarea parametrilor mașinii rezultați din proiectare, după procesul de fabricație, cât și pentru dimensionarea rețelei de alimentare și a protecțiilor.

Determinarea puterii reactive și a factorului de putere se face în mod diferit pentru fenomene sinusoidale și pentru fenomene deformante, pe baza relațiilor fundamentale prezentate anterior (paragraful 1.1).

3.4. Concluzii

Sistemul de Achiziție și Prelucrare a Datelor pentru Încercarea Mașinilor Electrice este un ansamblu hardware și software construit pe structura unui microcalculator de tip PC, capabil să măsoare mărimi în timpul testelor efectuate asupra mașinilor electrice, mărimi care sunt folosite apoi la calculul parametrilor ce interesează la mașina electrică.

Achiziția mărimilor de intrare se face automat de către SAPD prin intermediul rutinelor de achiziție specifice, iar prelucrarea se face după algoritmi implementați în programele de prelucrare. Determinarea parametrilor și caracteristicilor mașinilor electrice se face prin prelucrarea convenabilă a valorilor momentane a mărimilor măsurate, provenite din încercările la care este supusă mașina electrică.

Sistemele de Achiziție și Prelucrare de Date din Laboratorul D109 au fost folosite la numeroase probe, în cadrul unor contracte, utilitatea acestora dovedindu-se atât în activitatea de cercetare, cât și în teste efectuate în mediu industrial, pentru determinarea parametrilor și caracteristicilor mașinilor electrice.

Flexibilitatea sistemului permite implementarea atât de module hardware cât și de module software, în vederea realizării de teste ce pot fi concepute în continuare.

Capitolul 4

Măsurarea momentului de rotație al mașinii de inducție

Caracteristica mecanică, adică dependența momentului de rotație funcție de turație $M=f(n)$, are o importanță deosebită atât pentru producătorii cât și pentru utilizatorii mașinii de inducție.

Momentul de rotație la arborele mașinii de inducție se poate măsura direct, sau se poate estima utilizând metode adecvate.

Metodele de măsurare directă sunt relativ exacte și în general sunt utilizate ca metode de validare, fiind relativ mai ușor de aplicat cu precădere în cazul mașinilor de putere mică.

În cazul mașinilor de medie și mare putere măsurarea directă a momentului de rotație la arborele mașinii ridică probleme datorită costurilor mari necesare procurării echipamentelor, cât și datorită dificultăților și timpului necesar cuplării acestor echipamente de măsură la arborele mașinii.

Ridicarea caracteristicii mecanice se face de obicei la tensiune scăzută, pentru a nu suprasolicita termic înfășurările mașinii de încercat în timpul probelor. Din acest motiv sunt necesare corecții asupra rezultatelor măsurătorilor, pentru a calcula caracteristica mecanică ce corespunde tensiunii nominale. Pentru extrapolare, cu o aproximație destul de bună se acceptă dependența momentului de rotație de pătratul tensiunii de alimentare. Studii recente [10], [26], [27] demonstrează dependența momentului de rotație de tensiunea de alimentare la o putere m mai mare decât 2 ($m > 2$):

$$M = M_t \left(\frac{U_n}{U_t} \right)^m, \quad (4.1)$$

în care:

M - reprezintă momentul de rotație la tensiunea nominală U_n ;

M_t - momentul de rotație determinat din măsurători efectuate la tensiunea de testare U_t .

Valoarea exponentului m depinde de nivelul saturației căilor fluxului de dispersie, este variabil cu turația și se poate determina experimental din teste efectuate la diverse tensiuni, utilizând metode statistice [10].

În scopul determinării influenței saturației căilor de dispersie ale fluxului, pentru determinarea exponentului m este necesar să se facă determinări ale momentului de rotație la cel puțin două nivele diferite de tensiune.

Notând raportul tensiunilor

$$U_n / U_t = r_u, \quad (4.2)$$

relația (4.1) poate fi scrisă sub forma:

$$\lg M = \lg M_t + m \cdot \lg r_u \quad (4.3)$$

Având valorile experimentale ale momentului de rotație (M_{t1} respectiv M_{t2}) determinate la aceeași turație n pentru două nivele de tensiune (U_{t1} respectiv U_{t2}), rezultă sistemul de ecuații:

$$\lg M = \lg M_{t1} + m \cdot \lg r_{u1} \quad (4.4)$$

$$\lg M = \lg M_{t2} + m \cdot \lg r_{u2},$$

de unde

$$m = - \frac{\lg M_{t2} - \lg M_{t1}}{\lg r_{u1} - \lg r_{u2}}. \quad (4.5)$$

Crescând tensiunea la care se efectuează proba, rezultatul este mai consistent din punct de vedere al saturației căilor de dispersie, dar scade influența componentelor dinamice ale cuplului, în special în zona turațiilor mari [10].

Măsurarea directă a momentului de rotație se poate face prin două tipuri de metode:

- prin măsurarea forței și brațului în instalații cu mașină cu stator basculant;
- cu traductoare de măsurare care se bazează pe deformarea elastică a unui element intercalat pe arbore între motorul de încercat și sarcină.

Există și metode de estimare a momentului de rotație, pe baza altor mărimi care sunt obținute mai ușor decât măsurarea momentului de rotație.

4.1. Metode de măsurare directă a momentului de rotație al mașinii de inducție

Motorul de inducție de încercat se încarcă în regim staționar cu o mașină-frână cuplată la arborele acestuia, care poate să fie una dintre următoarele: generator de curent continuu, frână cu curenți turbionari, frână hidraulică.

Metodele de măsurare directă a momentului de rotație a mașinii de inducție necesită echipamente dedicate, implică montaje de echipamente sau senzori de măsurare a momentului de rotație și o mașină – frână cu putere apropiată de puterea nominală a mașinii de inducție testată.

Aceste metode sunt precise, dar pe măsură ce crește puterea mașinii de încercat costurile necesare realizării mașinii cu care se încearcă și dificultățile de cuplare sunt din ce în ce mai mari. Aceste dezavantaje determină ca metodele de măsurare directă să fie folosite doar la mașini de putere mică, eventual putere medie.

4.1.1. Determinarea momentului de rotație al mașinii de inducție prin măsurarea directă cu ajutorul instalației cu stator basculant

Metoda de determinare prin măsurare directă a momentului de rotație este o metodă de regim staționar fiind una dintre cele mai sigure și precise.

Din acest motiv această metodă de încercare se folosește pentru validarea (verificarea) rezultatelor obținute prin metodele indirecte de determinare a caracteristicilor mecanice și necesită timp de lucru și manoperă de valori ridicate.

Schema electrică de forță a standului de încercări a unei mașini de inducție pentru ridicarea caracteristicii mecanice este prezentată în figura 4.1. Schema reprezintă o instalație prefabricată LPA-5 de tip Pendel. Această instalație de încercat permite încărcarea mașinii de încercat în două moduri:

- încărcarea cu o mașină de curent continuu ce debitează pe o rezistență de sarcină;
- încărcarea în montaj recuperativ.

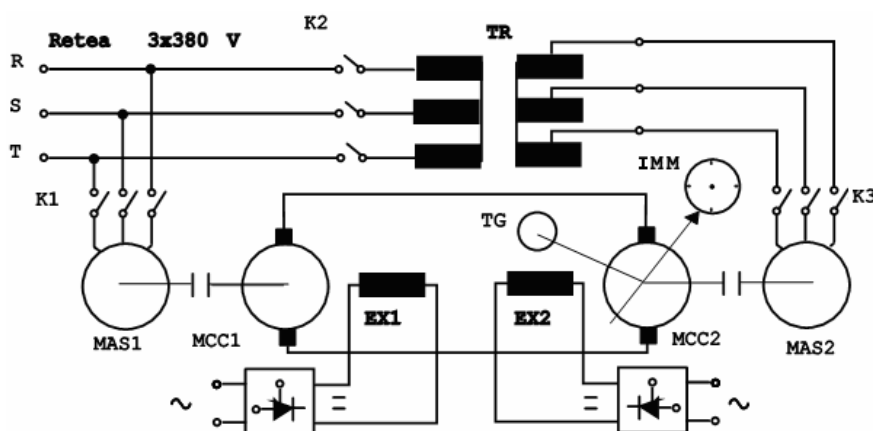


Figura 4.1. Schema electrică a montajului recuperativ utilizat la determinarea experimentală a caracteristicilor mecanice cu instalația LPA-5.

Mașina de inducție de încercat (MAS2) este alimentată de la rețea prin intermediul unui transformator electric trifazat reglabil, TR și se încarcă în regim staționar cu ajutorul unei mașini de curent continuu cu satorul basculant (MCC2), care face posibilă citirea directă a momentului de rotație la instrumentul de măsură a momentului (IMM) și turației, la tahogeneratorul (TG).

Încărcarea mașinii de încercat se poate face în montaj recuperativ, când mașina de inducție de încercat (motor) antrenează mașina cu satorul basculant MCC2 ce generează curent continuu la bornele mașinii de curent continuu MCC1, ce funcționează ca motor, care la rândul ei antrenează mașina de inducție trifazată MAS1 ce funcționează în regim de generator și debitează energie electrică în rețea. În acest caz, puterea activă absorbită de la rețea prin intermediul transformatorului reglabil TR acoperă pierderile din mașina de încercat (MAS2) plus pierderile din celelalte trei mașini ale standului (MAS1, MCC1 și MCC2), diferența de putere activă fiind transferată înapoi în rețea pe la bornele mașinii de inducție MAS1 – generator. Prin reglaje corespunzătoare ale curenților de excitație la cele două mașini de curent continuu, sensul puterii active se poate schimba, fiecare mașină din stand transformându-se din generator în motor și invers.

Cu această instalație este posibilă ridicarea caracteristicii mecanice a mașinii de încercat, punct cu punct, prin modificarea curenților de excitație la cele două mașini de curent continuu.

Mașina de încercat se mai poate încărca prin intermediul generatorului care debitează pe o rezistență de sarcină. În acest caz montajul este mai simplu (conține doar MAS2 și MCC2 plus rezistența de sarcină), dar toată puterea activă ce rămâne după acoperirea pierderilor în cele două mașini (mașina de încercat MAS2 – motor și mașina de curent continuu MCC2 – generator) se disipă pe rezistența de sarcină. Schema electrică este prezentată în figura 4.2.

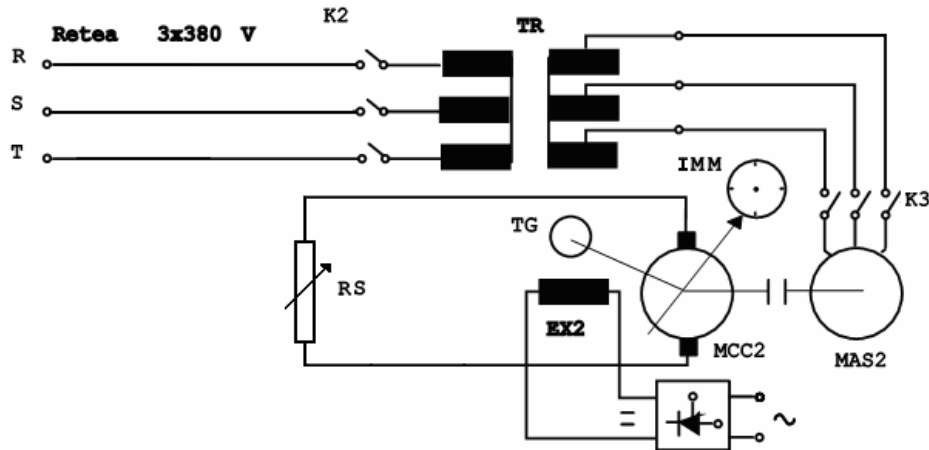


Figura 4.2. Schema electrică a montajului cu rezistență de sarcină utilizat la determinarea experimentală a caracteristicilor mecanice cu instalația LPA-5.

Montajul recuperativ față de montajul cu rezistență de sarcină prezintă două avantaje care pot fi remarcate, în ciuda faptului că este mai complicat din cauza celor două mașini suplimentare care apar, și anume [7]:

- ansamblul de măsură se caracterizează printr-un randament mult superior față de montajul cu rezistență de sarcină;
- ansamblul permite determinarea simplă, dar cu mai mare finețe, a caracteristicii mecanice, mai ales în cazul apariției cuplurilor parazite; la montajul cu rezistență de sarcină există riscul ca anumite porțiuni din caracteristica mecanică să nu poată fi puse în evidență.

Instalația de tip LPA-5 este destinată încercării mașinilor până la puterea de 5 kW. Instalații de acest tip se construiesc până la puteri de ordinul sutelor de kW.

Principalul dezavantaj al metodei este reprezentat de necesitatea cuplării mecanice a mașinii de încercat la mașina cu stator basculant.

4.1.2. Determinarea momentului de rotație al mașinii de inducție prin măsurarea directă cu ajutorul traductorului de cuplu

În prezent se produc traductoare de cuplu, ce se montează între mașina testată și mașina-frână cu care se încarcă, ce permit măsurarea directă a cuplului la arbore pentru diverse niveluri de sarcină. Folosirea acestor traductoare conduce la obținerea unor precizii mari la măsurare, dar implică, pe lângă dificultățile generate de cuplarea mecanică a mașinilor și costuri suplimentare aferente acestor traductoare, costuri care cresc pe măsură ce crește puterea mașinii de încercat. Cu aceste dispozitive, datorită elementelor inerțiale care filtrează semnalul de cuplu, nu se obțin valori momentane ale cuplului electromagnetic.

În laborator am utilizat traductorul de cuplu de tip FAST TM-HD-Rd-75.0-V06, într-un stand de probă conținând o mașină de inducție trifazată de 3 kW/1500 rpm cuplată cu o mașină de curent continuu de 3kW. Traductorul poate fi utilizat până la 75 Nm. El furnizează la ieșire o tensiune continuă de 17,50 mV/Nm, plecând de la o tensiune de 2,5 V ce corespunde cuplului 0 Nm. Tensiunea de offset este ajustabilă prin intermediul unui potențiomteru.

Este de menționat faptul că traductoarele de cuplu reclamă o atenție deosebită la montaj, mai ales în ceea ce privește alinierea axelor celor două mașini (motorul de încercat și mașina-frână cu care se încarcă). În figura 4.3. se prezintă o

schemă de montaj pentru acest caz. Pentru a proteja traductorul în timpul funcționării se recomandă ca traductorul să nu fie montat rigid. Traductorul va fi reținut pentru a nu se roti prin intermediul uneia sau mai multor benzi elastice fixate de soclul pe care este montat ansamblul.

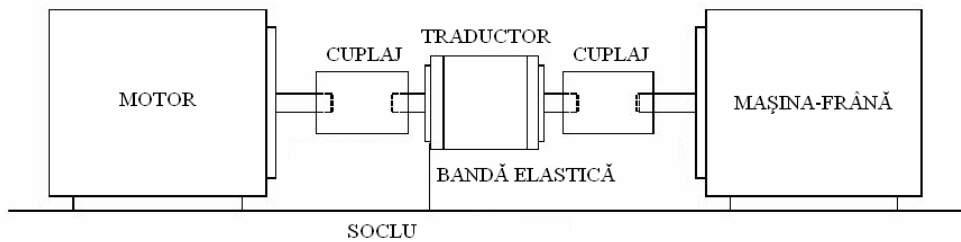


Figura 4.3. Explicativă privind modul de amplasare a traductorului de cuplu între motorul de încercat și mașina-frână.

4.2. Metode de estimare a momentului de rotație la mașina de inducție bazate pe probe de regim tranzitoriu

Pentru aceste metode pot fi luate în considerare următoarele regimuri tranzitorii:

- înregistrarea turație la pornirea în gol;
- înregistrarea mărimilor electrice, în regim tranzitoriu de pornire în gol (curenți, tensiuni, putere activă), mărimi care stau la baza calculului de bilanț energetic în acest regim.

Aceste metode sunt deosebit de utile în cazul mașinilor mari, când nu se poate realiza încărcarea în sarcină a motorului, pentru a determina punct cu punct curba cuplului funcție de turație $M(n)$. În aceste cazuri se procedează la determinarea curbei cuplului din regimuri de pornire lentă în gol.

Pentru ca motorul să parcurgă într-o succesiune cvasistaționară toate punctele caracteristicii mecanice statice, trebuie îndeplinită condiția ca pornirea să fie suficient de lentă.

O problemă se referă la diferențierea regimurilor „static” și „dinamic”. Din acest punct de vedere este importantă valoarea constantei [6]:

$$K = \left(\frac{U_t}{U_n} \right)^2 \cdot \frac{1}{J}, \quad (4.6)$$

în care: J – reprezintă momentul de inerție al maselor în mișcare de rotație [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$].

Prin valoarea constantei K se poate aprecia dacă regimul este static, sau dinamic. Dacă în timpul pornirii constanta K are o valoare mare, se obține o caracteristică de tip dinamic [6]. Dacă valoarea este suficient de mică, se obține regimul care interesează, adică pornirea lentă, caz în care se poate spune cu aproximație destul de bună că se determină, punct cu punct, caracteristica statică a cuplului. Modificarea valorii constantei K se poate realiza practic prin modificarea tensiunii la care se face testul (U_t), sau a momentului de inerție (J) prin montarea pe arborele mașinii testate a unor piese inerțiale suplimentare.

La motoarele de putere mare nu este necesar un volant adițional, datorită maselor inerțiale ale rotorului acestor mașini, aceste metode de determinare a cuplului oferind rezultate mai bune decât în cazul mașinilor de putere mică.

Întrucât componentele armonice superioare ale câmpului magnetic din întrefier nu variază cu tensiunea la fel ca armonica fundamentală, tensiunea de alimentare nu este indicat a fi micșorată excesiv pentru a obține valori reduse pentru constanta K . Pentru cazul în care tensiunea de alimentare în timpul procesului de pornire ar fi mult mai mică decât valoarea nominală, s-ar obține valori ale momentului de rotație calculat pentru tensiunea nominală care s-ar îndepărta de situația reală.

În continuare se prezintă trei metode de determinare a cuplului la arborele mașinii de inducție, pe baza datelor achiziționate din procesul de pornire lentă în regim de motor.

4.2.1. Metoda accelerației

Determinarea momentului de rotație prin această metodă se bazează pe ecuația mișcării la pornirea în gol [10], [98]:

$$M = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{9,549} \cdot J \cdot \frac{dn}{dt} \quad (4.7)$$

în care: n este turația rotorului înregistrată ca funcție de timp [rot./min]; momentul de inerție J se poate determina dintr-o probă de oprire în gol, fiind necesară o probă suplimentară de lansare în gol a mașinii.

Funcția de timp $M(t)$ se obține pe baza derivării numerice a funcției turației $n(t)$, accesibilă prin măsurare directă.

Pe baza funcțiilor de timp $M(t)$ și $n(t)$ rezultă dependența cuplului funcție de turație $M(n)$ pe care o căutăm.

Folosind un sistem de achiziție și prelucrare a datelor, se înregistrează variația în timp a turației arborelui motorului. În acest caz schema de montaj este cea prezentată în figura 4.4.

Preluând direct semnalul de turație, ce poate prezenta mici oscilații datorate traductorului de turație, prin prelucrările ulterioare, mai ales când se utilizează derivarea numerică a turației, poate să apară o amplificare substanțială a erorilor aleatoare, ceea ce conduce în final la rezultate inacceptabile. La o eșantionare destul de fină și precisă a turației, pe un interval de timp în care turația nu variază semnificativ, derivata turației poate obține valori care diferă mult între ele, tocmai datorită acestor mici oscilații produse de traductorul de turație. Prin medierea semnalului de turație pe un bloc de achiziție, pe un număr de perioade ale tensiunii de alimentare ce poate fi stabilit de operator, se poate înlătura acest dezavantaj.

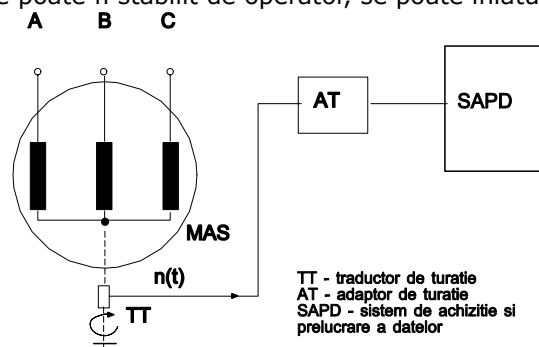


Figura 4.4. Schema bloc de măsură pentru determinarea turației la arbore, într-o probă de pornire lentă în gol, la un motor de inducție.

Se subliniază că în timp ce integrarea atenuază "zgomotul" experimentului, procesul de derivare îl amplifică. Din acest considerent este necesar ca datele inițiale să fie ajustate înaintea procesului de derivare. De obicei se face o ajustare polinomială, folosind metoda celor mai mici pătrate, urmând apoi procesul de derivare.

Uneori este suficient să se elimine "zgomotul" păstrând esența informației, fără a fi necesară exprimarea analitică a dependenței pentru interpretarea rezultatelor. Pentru aceasta se ajustează datele, cu alte cuvinte se înlocuiește tabelul conținând datele experimentale, cu un alt tabel de date apropiate, reprezentând puncte pe o curbă suficient de "netedă". Prelucrarea se face cu ajutorul polinoamelor, prin metoda celor mai mici pătrate.

Se folosesc formule de ajustare liniare, utilizând un număr impar de puncte [7]:

- după trei puncte:

$$\begin{aligned} \tilde{y}_i &= \frac{1}{3}(y_{i-1} + y_i + y_{i+1}) \\ \tilde{y}_{i-1} &= \frac{1}{6}(5y_{i-1} + 2y_i + y_{i+1}) \\ \tilde{y}_{i+1} &= \frac{1}{6}(-y_{i-1} + 2y_i + 5y_{i+1}) \end{aligned} \quad (4.8)$$

- după cinci puncte:

$$\begin{aligned} \tilde{y}_i &= \frac{1}{5}(y_{i-2} + y_{i-1} + y_i + y_{i+1} + y_{i+2}) \\ \tilde{y}_{i-1} &= \frac{1}{10}(4y_{i-2} + 3y_{i-1} + 2y_i + y_{i+1}) \\ \tilde{y}_{i+1} &= \frac{1}{10}(y_{i-1} + 2y_i + 3y_{i+1} + 4y_{i+2}) \\ \tilde{y}_{i-2} &= \frac{1}{5}(3y_{i-2} + 2y_{i-1} + y_i - y_{i+2}) \\ \tilde{y}_{i+2} &= \frac{1}{5}(-y_{i-2} + y_i + 2y_{i+1} + 3y_{i+2}) \end{aligned} \quad (4.9)$$

Derivarea numerică a datelor experimentale se face pe baza relației:

$$y'_k = \frac{y_{k+1} - y_{k-1}}{x_{k+1} - x_{k-1}} \quad (4.10)$$

Pentru punctele de la începutul și sfârșitul tabelului experimental, deci pentru cele care nu se încadrează între alte două puncte măsurate, se folosesc relațiile:

$$\begin{aligned} y'_0 &= \frac{-3y_0 + 4y_1 - y_2}{x_2 - x_0} \\ y'_n &= \frac{3y_n - 4y_{n-1} + y_{n-2}}{x_n - x_{n-2}} \end{aligned} \quad (4.11)$$

4.2.2. Determinarea momentului de rotație prin măsurarea puterii de intrare, sau metoda bilanțului energetic

Metoda bilanțului energetic (sau bilanțului puterilor) se bazează pe constatarea că momentul de rotație dezvoltat de motor se poate scrie [10], [98]:

$$M = \frac{9,549}{n_1} P_i - M_f \quad (4.12)$$

cu P_i - ce reprezintă puterea interioară; n_1 - turația sincronă [rot./min]; M_f - momentul de rotație corespunzător pierderilor mecanice.

Puterea interioară, sau puterea electromagnetică P_i se determină folosind formula:

$$P_i = P_1 - \sum p_s \quad (4.13)$$

în care: P_1 - reprezintă puterea activă absorbită de motor; $\sum p_s$ - suma pierderilor din statorul mașinii în regim de pornire lentă:

$$\sum p_s = p_{cu1} + p_{Fe} + p_{sup}, \quad (4.14)$$

unde:

p_{cu1} - reprezintă pierderile prin efect termic în înfășurările statorice

$p_{cu1} = 3 I_1^2 R_f$, cu I_1 - curentul efectiv pe fază și R_f - rezistența electrică pe faza statorică;

p_{Fe} - pierderile în fier care se obțin dintr-o probă de funcționare în gol, printr-o separare de pierderi la o tensiune egală cu valoarea tensiunii la care se face pornirea în gol;

p_{sup} - pierderile suplimentare, ce au o pondere mică, se pot evalua cu aproximație [77], [98].

Pierderile în înfășurările statorice au ponderea cea mai mare din totalul pierderilor, motiv pentru care este importantă măsurarea precisă a rezistenței electrice a fazei statorice și considerarea influenței temperaturii asupra acesteia. De aceea este indicat ca rezistența electrică pe fază să se determine prin măsurarea directă la finele procesului.

În cazul în care se folosește un sistem de achiziție și prelucrare a datelor pentru efectuarea măsurărilor, schema de montaj este prezentată în figura 4.5.

Cele două metode de determinare a momentului de rotație prezentate mai sus pot să utilizeze rezultatele obținute din aceeași probă de pornire în gol, când este necesar să se măsoare simultan valorile momentane ale curenților și tensiunilor pe cele trei faze ale motorului și valorile momentane ale turației, în regimul tranzitoriu de pornire lentă.

Folosind un Sistem de Achiziție și Prelucrare a Datelor (SAPD) dedicat pentru încercarea mașinilor electrice se obține caracteristica mecanică statică la mașina de inducție, testele efectuându-se la funcționarea în gol. Acest lucru aduce avantajul eliminării cuplării mașinii la arbore și economie de energie electrică, aspecte importante mai ales la mașinile de putere mare. De asemenea, testele fiind de scurtă durată, nu se solicită suplimentar mașina.

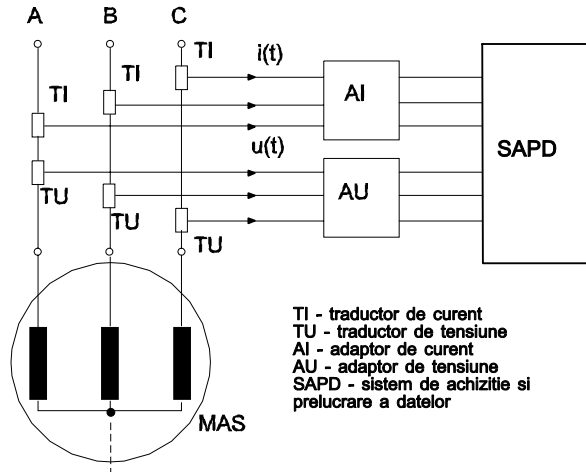


Figura 4.5. Schema bloc de măsură pentru determinarea cuplului la un motor asincron, prin bilanțul puterilor, într-o probă de pornire lentă în gol.

4.2.3. Determinarea cuplului pe baza componentelor în coordonate dq0

Principiul de determinare are la bază ecuația mașinii asincrone în sistem ortogonal [21]:

$$\begin{aligned}
 u_d &= -R_d i_d - \frac{d\psi_d}{dt} + \psi_q \frac{d\vartheta}{dt} \\
 u_q &= -R_q i_q - \frac{d\psi_q}{dt} + \psi_d \frac{d\vartheta}{dt} \\
 u_0 &= -R_0 i_0 - \frac{d\psi_0}{dt} \\
 u_{d'} &= -R_{d'} i_{d'} - \frac{d\psi_{d'}}{dt} \\
 u_{q'} &= -R_{q'} i_{q'} - \frac{d\psi_{q'}}{dt} \\
 u_{0'} &= -R_{0'} i_{0'} - \frac{d\psi_{0'}}{dt},
 \end{aligned}
 \tag{4.15}$$

în care:

$u_{d,q,0}, i_{d,q,0}, \psi_{d,q,0}$ - sunt respectiv componentele statorice ale tensiunii, curentului și fluxului magnetic în coordonate dq0;

$u_{d',q',0'}, i_{d',q',0'}, \psi_{d',q',0'}$ - sunt respectiv componentele rotorice ale tensiunii, curentului și fluxului magnetic în coordonate dq0;

$$R_d = R_q = \frac{2}{3} R_s; \quad R_0 = R_s \quad (R_s \text{ rezistența electrică a fazei statorice});$$

$$R_d = R_q = \frac{2}{3} R_r; \quad R_o = R_r \quad (R_r \text{ rezistența electrică a fazei rotorice}).$$

Curenții și tensiunile în coordonate dq0 se determină pe baza valorilor măsurate ale curenților și tensiunilor reale în coordonatele fazelor.

Rezultă relația pentru cuplul electromagnetic [6]:

$$m_{em} = \frac{3}{2} p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (4.16)$$

cu p – reprezentând numărul de perechi de poli.

Rezolvarea prin mijloace analogice a acestor transformări implică probleme legate de calibrarea aparaturii la fiecare măsurătoare și erori datorate schimbării parametrilor instrumentației în timpul măsurătorilor.

Metodele de rezolvare numerică a problemei implică unele erori, mai ales datorită traductoarelor necesare pentru măsurarea mărimilor (curenți, tensiuni). Erori mici în determinarea valorilor măsurate, dar mai ales în defazajele mărimilor, conduc la erori relativ mari în rezultatele finale. Acest aspect este amplificat de „zgomotul” din aceste mărimi măsurate (curenți, tensiuni).

Pentru aceasta, sistemul de măsură trebuie să determine tensiunile și curenții cu precizie ridicată și, de asemenea, să determine extrem de precis defazajele dintre cele două mărimi.

Deși principiul de determinare a momentului de rotație, având la bază prelucrări numerice bazate pe relația (4.16) a fost cunoscut de mai mult timp, realizări practice care să fie utilizabile simplu și precis atât în laborator cât și în mediul industrial au apărut mult mai târziu, tocmai datorită acestor exigențe legate de precizia sistemului de achiziție.

Relativ recent au apărut echipamente dedicate pentru măsurarea cuplului electromagnetic pe baza componentelor ortogonale, obținute din măsurarea mărimilor în coordonatele fazelor (4.15), (4.16).

Un exemplu de astfel de echipament este analizorul de putere D6000 – LEM NORMA care rezolvă această problemă printr-un software și un hardware adecvat, inclusiv în ceea ce privește traductoarele folosite.

4.3. Echipament dedicat pentru determinarea cuplului electromagnetic în regim dinamic LEM - Norma D6000

Analizorul de putere LEM – Norma D6000 este un echipament digital complex care măsoară valorile momentane ale tensiunii și curentului dintr-un circuit electric, cu o precizie foarte ridicată, în banda de frecvență de la 0 la 400 kHz (1 MHz). Este format dintr-o structură hardware pe care este implementată o structură software ce permite achiziția și prelucrarea mărimilor măsurate.

Cu aceste mărimi, pe baza relației (4.12), echipamentul furnizează în final cuplul dinamic al mașinii trifazate ca funcție de timp.

Sistemul calculează momentul electromagnetic din întrefierul motorului de inducție pe baza măsurării curenților și tensiunilor pe fazele mașinii, fără a fi necesară cuplarea motorului cu altă mașină. În acest sens se folosesc șunturi neinductive coaxiale și traductoare cu sondă Hall, special construite pentru acest tip de aplicație, care necesită precizie ridicată în măsurarea curenților și tensiunilor.

Sistemul din seria D6000 este proiectat și construit complet modular. Varianta descrisă în continuare are 6 instrumentele de bază pentru măsurarea curenților și tensiunilor (3 canale de tensiune și 3 canale de curent, separate galvanic), în curent continuu, sau alternativ. Aceste mărimi sunt măsurate prin eșantionare, simultan pe

toate canalele, asigurându-se o precizie ridicată inclusiv prin folosirea unor traductoare adecvate, cu performanțe ridicate. Spre exemplu, pentru a determina cu precizie foarte mare defazajele dintre undele de tensiune sau curent, traductoarele uzuale de curent (inclusiv cele bazate pe șunturi de înaltă precizie) nu sunt utilizabile deoarece prezintă o mică inductivitate care la frecvențe mari produce întârzieri suplimentare în funcțiile măsurate. De aceea echipamentul LEM – Norma D6000 este prevăzut cu șunturi speciale (șunturi coaxiale - triaxiale) care practic introduc în circuitul de măsură doar o rezistență extrem de mică. Traductoarele speciale folosite fac ca prețul echipamentului să fie destul de ridicat.

În figura 1 este prezentat panoul frontal al analizorului de putere LEM – Norma D6000.

Pe ecranul 1 poate fi afișată starea sistemului 2, starea canalelor 3, mărimile măsurate 4, meniul 5. Panoul frontal mai conține butoanele funcționale 6 – cu ajutorul cărora se navighează prin meniu, tastele cu funcțiile sistemului și tastele alfanumerice 7 – 17. Opțional echipamentul poate conține o imprimantă termografică 18.

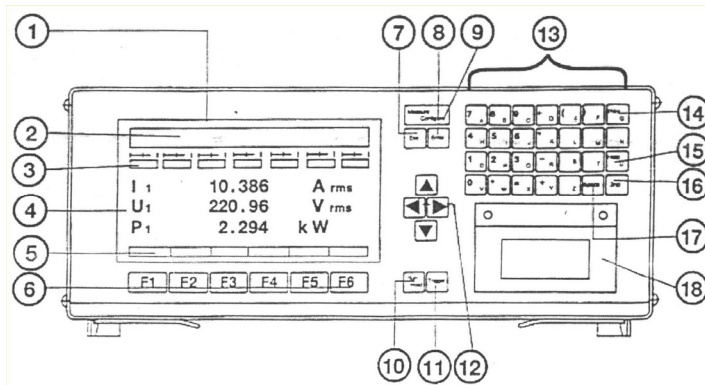


Figura 4.6. Echipamentul LEM – Norma D6000 – panoul frontal.

Panoul din spate al echipamentului, pe care se realizează și conexiunile în circuitul de măsură, este prezentat în figura 4.7. Sertarele 25, 27, 29 reprezintă interfețele de tip 61U ce corespund canalelor pentru măsurarea tensiunii, iar sertarele 24, 26, 28 reprezintă interfețele de tip 61I ce corespund canalelor pentru măsurarea curenților.

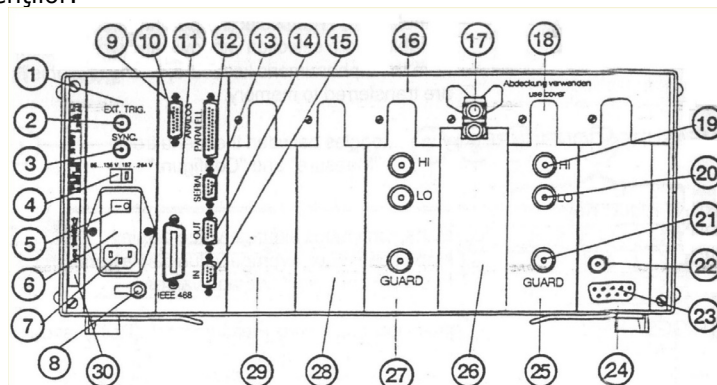


Figura 4.7. Echipamentul LEM – Norma D6000 – panoul din spate.

Versiunea M (motor) a echipamentului conține o interfață complementară 11 (de tip 61D4) pentru calculul cuplului electromagnetic, pe baza măsurării mărimilor electrice de intrare (tensiune și curent), conform celor descrise la paragraful 4.2.3. În plus, interfața poate monitoriza, prin intermediul unor traductoare atașate suplimentar, caracteristica statică – cuplul și turație – la 4 motoare simultan, mărimi obținute prin intermediul unor traductoare de cuplu, respectiv de turație.

Analizorul D6000 permite măsurarea și reprezentarea grafică a variației în timp a mărimilor măsurate precum și calculul unor funcții deduse din aceste valori măsurate.

Pe baza valorilor momentane măsurate se calculează după caz, pentru fiecare canal de curent, respectiv de tensiune, valoarea medie, valoarea efectivă, valoarea medie redresată, valoarea pozitivă și valoarea negativă de vârf, factorul de formă, factorul de vârf, frecvența.

Valorile măsurate ale tensiunii și curentului, pe fiecare fază, permit calculul următoarelor mărimi:

- puterea activă P [W];
- puterea aparentă S [VA];
- factorul de putere $\cos\varphi$;
- unghiul de defazaj dintre tensiune și curent [$^{\circ}$];
- puterea reactivă [Var];
- modulul impedanței [Ω];
- rezistența echivalentă [Ω];
- reactanța echivalentă [Ω].

Echipamentul permite calculul și afișarea următoarelor mărimi care privesc toate fazele mașinii:

- media valorilor efective ale tensiunilor pe cele trei faze;
- media valorilor efective ale curenților pe cele trei faze;
- media valorilor redresate ale tensiunilor pe cele trei faze;
- puterea activă totală;
- puterea aparentă totală;
- factorul de putere mediu pe cele trei faze;
- puterea reactivă totală.

De asemenea, în concordanță cu standardele DIN VDE, ÖVE, sau ANSI/IEEE, se pot calcula următoarele mărimi:

- factorul de distorsiune;
- factorul armonic telefonic.

Sistemul permite și analiza armonică a mărimilor măsurate, până la armonica 99.

Mărimile și funcțiile enumerate mai sus fac parte dintre cele pe care echipamentul le are implementate ca mărimi și funcții definite (conform unor relații analitice stabilite). Există și posibilitatea de definire a unor funcții conform unor relații stabilite de utilizator, prin editarea formulelor de calcul.

Câteva dintre exemplele de aplicare ale analizorului de putere în regimuri tranzitorii și în condiții staționare se referă la regimul de pornire al mașinilor de inducție, efectele alimentării de la surse sinusoidale și nesinusoidale, regimuri de scurtcircuit monofazat, sau polifazat și altele.

Schema conexiunilor, utilizată pentru măsurarea mărimilor electrice la un motor de inducție trifazat cu un analizor LEM – Norma D6000, este prezentată în figura 4.8.

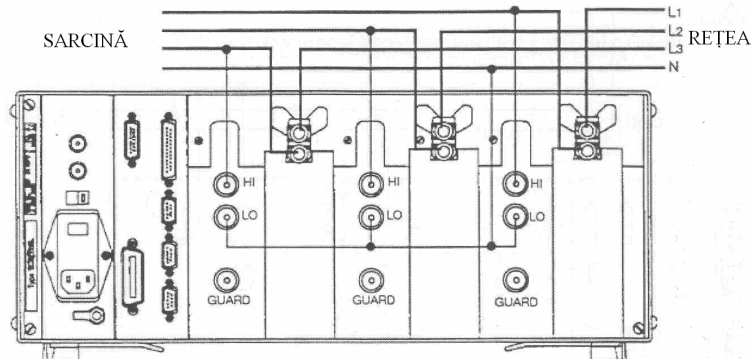


Figura 4.8. Schema conexiunilor – sarcină nesimetrică alimentată cu 4 conductoare.

În exemplul de măsurare prezentat, pe partea de măsurare a tensiunii echipamentul se conectează prin intermediul traductoarelor de tensiune cu sondă Hall, încorporate în echipamentul de bază (asigură o precizie de 0,15% pentru frecvențe sub 15 Hz și de 0,04 Hz între 15 Hz și 400 kHz), iar pe partea de măsurare a curentului echipamentul se conectează prin intermediul șunturilor triaxiale (asigură o precizie de 0,03% pentru determinarea amplitudinii curentului și o eroare neglijabilă de determinare a fazei, de $0,1^\circ/100$ kHz).

Sistemul este prevăzut opțional și cu traductoare de curent cu sondă Hall, care pot fi folosite în alte aplicații (de exemplu domeniul de măsură pentru curenți de 500 A).

Precizia sistemului este ridicată: 0,05 % pentru măsurarea curenților și tensiunilor, și 0,1 % pentru determinarea puterilor.

Dintre avantajele utilizării acestei instalații pentru măsurare a momentului de rotație se amintesc următoarele:

- gama largă a domeniului de măsură, limitată doar de domeniile traductoarelor de tensiune și curent folosiți;
- echipamentul poate fi folosit simplu și cu precizie ridicată atât în laborator, cât și în mediul industrial;
- nu necesită manoperă suplimentară de montare (se utilizează conexiunile electrice la partea de alimentare), nefiind necesară intercalarea la arbore de dispozitive suplimentare, între motor și mașina de acționare;
- motorul de încercat nu este supus la suprasarcini;
- sistemul de măsură se poate utiliza și în regim dinamic, inerția rotorului neavând influență. Acest sistem poate sesiza cuplurile parazite și tranzitorii, ce nu pot fi sesizate cu dispozitive mecanice datorită caracteristicii de răspuns ale acestora.
- flexibilitate mare în măsurare, deoarece pe lângă cuplu sunt furnizate practic informații despre toate mărimile electrice;
- se pot defini și implementa prin software și alte tipuri de relații și mărimi care pot interesa pe utilizator.

Deși principiul de determinare a cuplului în regim dinamic, pe baza componentelor în coordonate dq0 a fost cunoscut de mai mult timp, apariția acestui tip de echipament dedicat a fost condiționată de evoluția sistemelor de adaptare, a traductoarelor și a interfețelor de proces.

În figura 4.9 se prezintă un exemplu de utilizare a echipamentului Norma D6000 la determinarea curentului de pornire și momentului electromagnetic în cazul unui motor de inducție având puterea nominală de 1,5 kW la 1500 rpm, 220 V. Din datele achiziționate

În regimul de pornire a motorului de inducție (valori momentane ale curentului și tensiunii pe cele trei faze ale mașinii) se calculează momentul electromagnetic al motorului de inducție. Pornirea s-a făcut la o tensiune redusă (65 V).

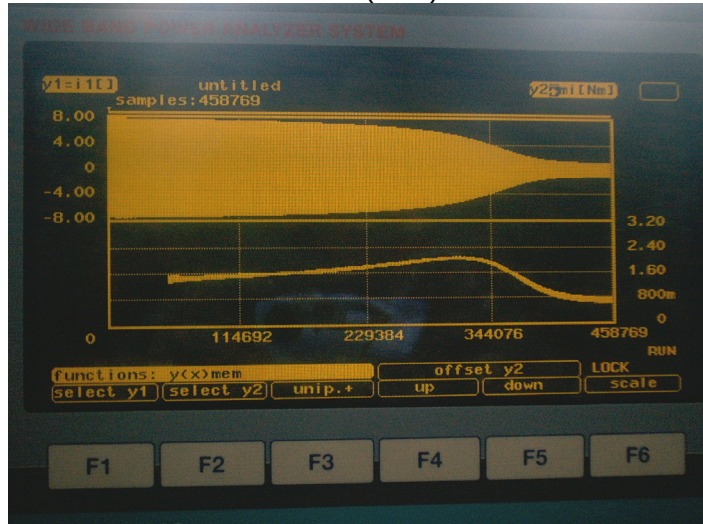


Figura 4.9. Curentul de fază și momentul electromagnetic la pornirea motorului de inducție de 1,5 kW, la alimentare cu tensiune redusă (65 V)

Repetând proba la o tensiune ceva mai mare (80V), s-a constatat o reducere a timpului de pornire, valori mai mari ale momentului electromagnetic, precum și apariția unor componente dinamice de cuplu la începutul pornirii. În figura 4.10 se poate urmări această înregistrare a momentului electromagnetic determinat la tensiunea de 80V.

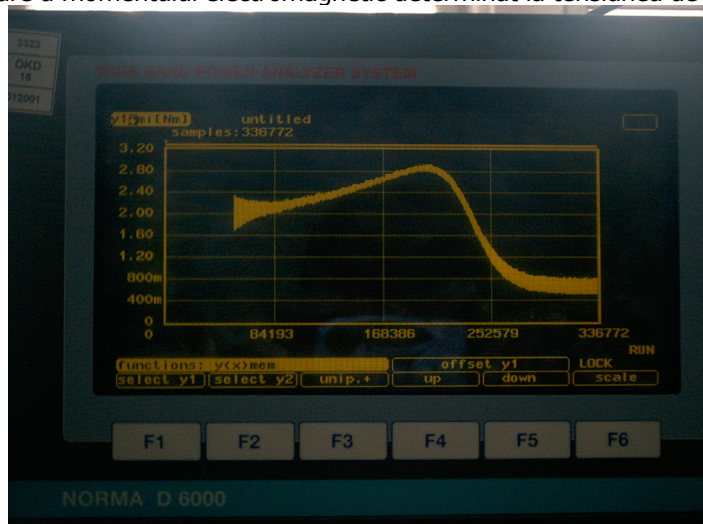


Figura 4.10. Momentul electromagnetic la motorului de inducție de 1,5kW, la alimentare cu tensiune redusă (80 V)

În figurile 4.9 și 4.10 pe abscisă s-a notat numărul curent al eșantionului. Timpul se poate calcula simplu ținând seama că se efectuează 65536 de eșantioane într-o secundă. Prin urmare, ultima eșantionare (336772) corespunde la $t=5,14$ s.

4.4. Determinări experimentale

În continuare vor fi prezentate câteva exemple de utilizare a Sistemului de Achiziție și Prelucrare a Datelor la determinarea caracteristicii mecanice la mașini de inducție.

Exemplul 1

În Laboratorul D109 de Testare a Mașinilor Electrice din cadrul Facultății de Electrotehnică din Timișoara a fost realizat un stand de probă care conține în principal o mașină de inducție (MAS) și o mașină de curent continuu (mașina-frână – GCC), cu ajutorul căreia se încarcă mașina de inducție în regim staționar, în scopul de a determina caracteristica mecanică statică (moment de rotație funcție de turație). Pentru măsurarea directă a momentului de rotație la arborele mașinii de inducție, între aceasta și mașina de curent continuu s-a montat un traductor de moment de rotație (TM).

Pe acest stand de probă au fost prevăzute a se efectua două tipuri de probe:

- probe de regim staționar, când mașina de încercat, în regim de motor, se încarcă prin intermediul generatorului de curent continuu conectat la o rezistență reglabilă de sarcină. Acest mod de lucru a fost folosit pentru determinarea caracteristicii statice a motorului de inducție prin măsurare directă a momentului de rotație la arbore cu ajutorul traductorului de moment de rotație;
- probe de regim tranzitoriu, când mașina de încercat, în regim de motor, se pornește în gol: Acest regim a fost folosit pentru determinarea caracteristicii mecanice prin determinarea momentului de rotație prin metoda accelerației și prin metoda bilanțului puterilor. Cele două metode se aplică pentru măsurători care se obțin dintr-un singur experiment, o singură probă de pornire în gol a motorului de inducție.

Pentru a mări inerția ansamblului a fost montat un disc metallic pe arborele mașinii de inducție, iar pentru măsurarea turației la arborele mașinii a fost montat un traductor de turație T_n , pe arborele mașinii de încercat, în partea opusă cuplajului.

Schema electrică de montaj a standului este prezentată în figura 4.11.

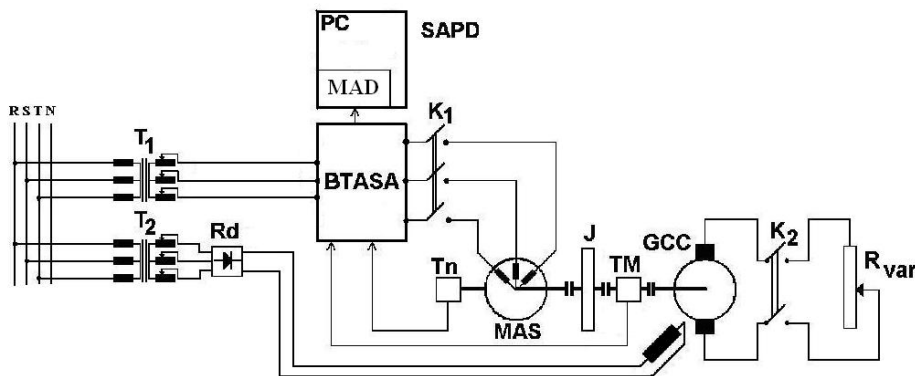


Figura 4.11. Schema electrică a standului pentru determinarea momentului de rotație la motorul de inducție

Măsurătorile sunt făcute utilizând un Sistem de Achiziție și Prelucrare a Datelor (SAPD), un ordinator de tip PC, prevăzut cu un Modul de Achiziție de Date (MAD). Mașina de inducție de încercat, funcționând în regim de motor, este alimentată de la un transformator reglabil T1 prin intermediul Blocului Traductoarelor și Adaptoarelor de Semnale Analogice (BTASA). Mașina de curent continuu este antrenată mecanic de motorul de încercat și are circuitul de excitație

alimentat prin intermediul transformatorului reglabil T2 și redresorului trifazat Rd. Mașina de curent continuu funcționând în regim de generator este conectată la bornele unei rezistențe reglabile de sarcină R_{var} . Reglarea sarcinii cu care se încarcă mașina de încercat se poate face atât prin modificarea rezistenței R_{var} , cât și prin modificarea curentului de excitație a generatorului de curent continuu, prin intermediul tensiunii la bornele transformatorului reglabil T2.

În figura 4.12 se prezintă o imagine cu standul de probă realizat. Se pot distinge, de la stânga la dreapta, mașina de curent continuu – mașina-frână pe post de generator de curent continuu (Gcc), traductorul de moment de rotație, discul inertial, mașina de inducție de încercat și traductorul de turație.

Mașinile folosite în standul de probă au următoarele date nominale:

Motorul de inducție testat

puterea nominală,	P_N	=	2,2 kW
tensiunea nominală,	U_N	=	220 / 380 V
curentul nominal,	I_N	=	9,15 / 5,3 A
frecvența nominală	f_N	=	50 Hz
factorul de putere nominală,	$\cos \varphi_N$	=	0.8
turația nominală	n_N	=	1420 rpm
clasa de izolație			E
serviciul tip de funcționare			S1
masa	m	=	27 kg

Rezistența înfășurărilor statorice a fost măsurată și are valoarea $R_1=2,55 \Omega$.

Mașina de curent continuu (frâna)

puterea nominală,	P_N	=	2,7 kW
tensiunea nominală,	U_N	=	220 V
curentul nominal,	I_N	=	15 A
turația nominală	n_N	=	1500-2300 rpm
clasa de izolație			B
masa	m	=	70 kg

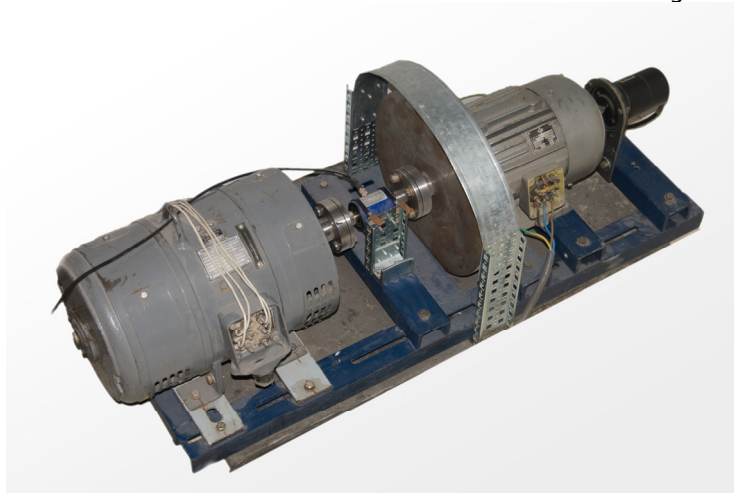


Figura 4.12. Standul pentru determinarea momentului de rotație a motorului de inducție

În figura 4.13. se prezintă un detaliu al standului cu traductorul de moment de rotație.

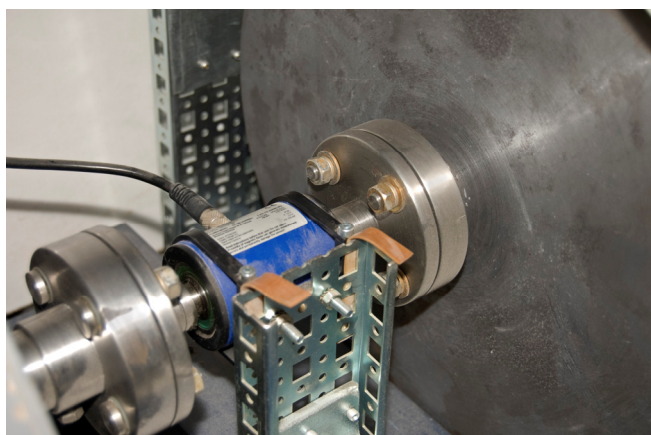


Figura 4.13. Detaliu al standului pentru determinarea caracteristicii mecanice a motorului de inducție

Traductorul de moment de rotație folosit este de tip FAST TM-HD-Rd-75.0-V06, poate fi utilizat până la 75 Nm și furnizează la ieșire o tensiune continuă de 17,50 mV/Nm. Tensiune de alimentare a traductorului este cuprinsă între 9 Vcc și 12 Vcc.

Traductorul de turație furnizează o tensiune de 0,06 V/rot/min și este de tip RADIO ENERGIE REo 444.

Pe acest stand de încercări au fost realizate mai multe seturi de teste.

Testele au fost realizate la tensiune scăzută, pentru a nu suprasolicita înfășurările mașinii de inducție.

A fost realizată o probă de încărcare în sarcină, în regim staționar. Pentru alimentarea motorului de inducție pe o anumită treaptă de tensiune, prin intermediul generatorului de curent continuu s-a fixat un anumit nivel al sarcinii. După stabilizarea turației, s-au măsurat cu SAPD turația respectiv momentul de rotație prin intermediul traductoarelor respectivelor mărimi. Aceste perechi de mărimi au fost măsurate până a fost parcursă întreaga caracteristică mecanică, obținându-se valorile din tabelul 4.1.

Tabelul 4.1.

Momentul de rotație la arbore funcție de turație obținute prin măsurare directă la arborele motorului de inducție (2,2 kW/1500 rpm) la alimentarea cu tensiunea de 60 V.

n [rpm]	M [Nm]	n [rpm]	M [Nm]
250	1,496	900	2,027
300	1,502	950	2,090
350	1,513	1000	2,187
400	1,525	1050	2,223
450	1,554	1100	2,186
500	1,607	1150	2,122
550	1,658	1200	2,051
600	1,708	1250	1,994
650	1,761	1300	1,823
700	1,799	1350	1,612
750	1,842	1400	1,151
800	1,895	1450	0,621
850	1,953	1475	0,224

Cu ajutorul acestor valori a fost ridicată caracteristica mecanică din figura 4.14.

În continuare s-a efectuat o probă de pornire în gol a motorului de inducție având inerție rotorică mărită, prin alimentarea tot la tensiunea de 60 V prin intermediul transformatorului reglabil T1.

Tabelul 4.2. prezintă câteva blocuri de achiziție obținute cu Sistemul de Achiziției și Prelucrare a Datelor din proba de pornire în gol a motorului de inducție de 2,2 kW, 1500 rpm, alimentat la tensiunea scăzută de 60 V. Achiziția mărimilor se face pe blocuri de achiziție ce conțin 3-5 perioade ale tensiunii de alimentare, selectabile de operator. Se achiziționează valorile momentane ale tensiunii pe cele trei faze (A, B, C) ale motorului, curentului prin cele trei faze ale motorului și turația la arborele motorului cu ajutorul traductorului de turație. Pentru fiecare bloc de achiziție se calculează valorile efective ale tensiunilor (U) și ale curenților (I). Pentru fiecare perioadă se calculează puterea activă (P) absorbită de motor, prin integrarea puterii momentane calculate din produsul valorii momentane ale tensiunii și curentului pe fiecare fază, se calculează puterea reactivă (Q) și factorul de putere ($\cos\phi$) și frecvența pe fiecare fază a mașinii. De asemenea, se calculează media pe cele trei faze a valorii efective a tensiunii, curentului, factorului de putere și frecvenței și puterea activă totală absorbită, respectiv puterea reactivă totală absorbită (valori ce se afișează pe linia „Media”).

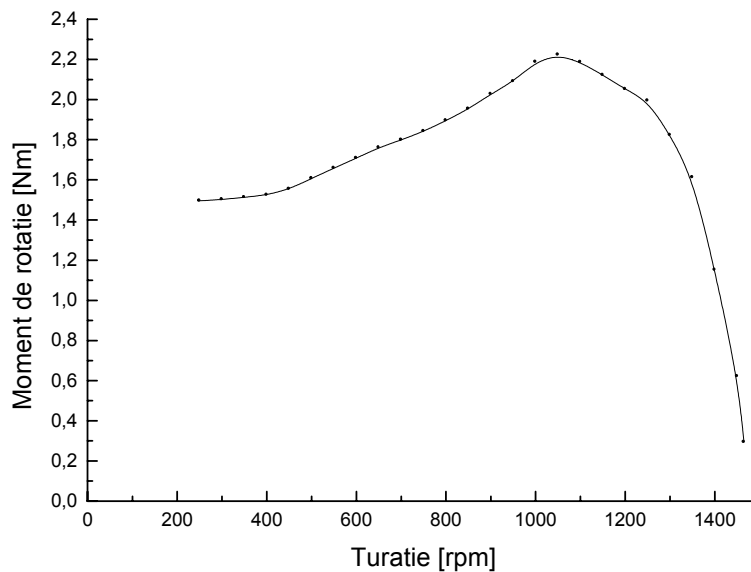


Figura 4.14. Caracteristica mecanică statică a motorului de inducție de 2,2 kW/1500 rpm obținută prin măsurarea directă la arbore la alimentarea cu tensiune scăzută (60 V).

Tabelul 4.2.

Câteva blocuri de achiziție obținute din proba de pornire în gol a motorului de inducție (2,2 kW/1500rpm) la alimentarea cu tensiunea (60 V)

NR	Timpul s		<i>U</i> V	<i>I</i> A	<i>P</i> W	<i>Q</i> VAR	COSFI	FRECV Hz
0	0	Faza A	57.768	0.016	-0.002	0.929	-0.0023	50
		Faza B	57.465	0.011	0.001	0.613	0.0015	50
		Faza C	57.31	0.01	0.035	0.598	0.0577	50
		Media	57.515	0.012	0.033	2.139	0.0156	50
		Turația	0					
10	6.04	Faza A	56.294	6.325	213.612	284.894	0.5999	49.96
		Faza B	56.568	6.293	212.008	286.002	0.5955	50.02
		Faza C	56.041	6.239	208.002	281.071	0.5949	50
		Media	56.301	6.286	633.622	851.966	0.5968	49.99
		Turația	526.841					
20	12.09	Faza A	56.775	3.376	163.162	100.556	0.8513	50.04
		Faza B	56.807	3.303	159.065	99.523	0.8477	50.01
		Faza C	56.474	3.3	159.389	96.58	0.8552	50.01
		Media	56.685	3.326	481.616	296.659	0.8514	50.02
		Turația	1293.285					
30	18.13	Faza A	57.615	0.89	37.239	35.281	0.7259	50.02
		Faza B	57.608	0.832	32.969	34.804	0.6877	49.99
		Faza C	57.29	0.821	34.91	31.528	0.7421	49.98
		Media	57.504	0.848	105.117	101.614	0.7187	50
		Turația	1466.091					
40	21.15	Faza A	57.483	0.89	37.13	35.162	0.7261	50
		Faza B	57.516	0.837	33.175	34.883	0.6892	50
		Faza C	57.169	0.824	34.857	31.701	0.7398	49.94
		Media	57.389	0.85	105.163	101.746	0.7184	49.98
		Turația	1465.193					

Rezultatele probei de pornire în gol a motorului de inducție, alimentat la tensiunea de 60 V sunt prezentate în tabelul 4.3. Din tabelul 4.2 au fost reținute pentru fiecare bloc de achiziție valorile ce corespund mediei pe cele trei faze ale tensiunii, curentului, factorului de putere și frecvenței, respectiv puterea activă totală absorbită și puterea reactivă totală absorbită.

Tabelul 4.3.

Rezultate prelucrate din măsurile obținute din proba de pornire în gol a motorului de inducție (2,2 kW/1500rpm) la alimentarea cu tensiunea (60 V)

<i>t</i> [s]	<i>U</i> [V]	<i>I</i> [A]	<i>P</i> [W]	<i>Q</i> [VAR]	Cos φ	<i>f</i> [Hz]	<i>n</i> [rpm]
0	57,515	0,012	0,033	2,139	0,0156	50	0
0,61	56,26	6,698	608,928	952,487	0,5386	50,01	45,427
1,21	56,265	6,66	610,944	943,625	0,5435	50,01	95,048
1,81	56,248	6,627	613,227	935,039	0,5484	50,02	147,074
2,42	56,269	6,606	615,208	930,013	0,5517	50,01	201,105
3,02	56,275	6,565	616,355	921,275	0,5561	50,03	253,41
3,63	56,246	6,528	619,756	910,516	0,5627	49,99	304,454
4,23	56,282	6,486	624,013	899,974	0,5698	49,99	358,332
4,84	56,297	6,449	627,374	890,369	0,576	50,04	411,227
5,44	56,315	6,357	630,938	869,135	0,5875	50,03	468,292

106 Măsurarea momentului de rotație al mașinii de inducție - 4

6,04	56,301	6,286	633,622	851,966	0,5968	49,99	526,841
6,65	56,24	6,207	634,173	833,412	0,6056	50,01	587,685
7,25	56,342	6,107	640,063	809,91	0,62	50,02	651,374
7,86	56,258	5,987	641,981	780,356	0,6353	50,02	718,114
8,46	56,288	5,852	642,846	750,536	0,6505	49,97	788,594
9,06	56,286	5,671	643,07	709,549	0,6716	50,01	865,178
9,67	56,303	5,425	639,817	655,968	0,6982	50,03	944,254
10,27	56,344	5,108	628,525	591,877	0,728	50	1028,202
10,88	56,391	4,689	605,617	512,44	0,7634	50,02	1116,327
11,48	56,453	4,091	559,227	409,063	0,8071	50,01	1206,571
12,09	56,685	3,326	481,616	296,659	0,8514	50,02	1293,285
12,69	56,88	2,466	369,569	201,152	0,8783	50	1363,149
13,29	57,101	1,729	259,773	142,239	0,877	49,97	1414,166
13,9	57,285	1,261	182,716	116,37	0,8433	49,99	1441,469
14,5	57,362	1,024	140,301	106,567	0,7961	50,01	1454,884
15,11	57,462	0,92	119,974	103,617	0,7566	50,01	1461,225
15,71	57,49	0,878	111,152	102,823	0,7338	50,01	1464,567
16,31	57,474	0,863	107,55	102,722	0,7228	50	1465,28
16,92	57,4	0,849	105,183	101,533	0,7191	50	1464,825
17,52	57,439	0,851	105,111	102,186	0,7167	49,99	1465,148
18,13	57,504	0,848	105,117	101,614	0,7187	50	1466,091
18,73	57,476	0,849	104,468	102,413	0,7137	50	1466,512
19,34	57,484	0,852	104,973	102,68	0,7145	50,04	1466,692
19,94	57,462	0,848	105,037	101,521	0,7186	50,02	1466,338
20,54	57,435	0,852	105,178	102,323	0,7164	50,02	1465,097
21,15	57,389	0,85	105,163	101,746	0,7184	49,98	1465,193
21,75	57,46	0,85	105,107	101,936	0,7175	50,02	1466,07
22,36	57,435	0,853	105,372	102,338	0,717	49,99	1466,607
22,96	57,416	0,85	105,433	101,489	0,7201	50,03	1466,812
23,56	57,317	0,852	105,246	101,857	0,7182	49,99	1466,287

Din datele achiziționate rezultă variația turației rotorice în funcție de timp, în procesul pornirii în gol, ca cea prezentată în figura 4.15. Se observă că turația motorului de inducție crește în timpul pornirii și se stabilizează în jurul valorii de 1465 rpm după circa 15 secunde.

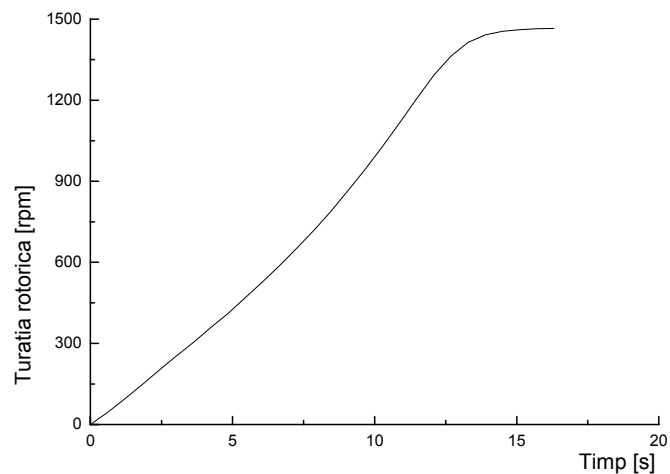


Figura 4.15. Variația în timp a turației rotorice a motorului de inducție de 2,2 kW/1500 rpm în procesul pornirii în gol, la alimentarea cu tensiune scăzută (60 V).

Aplicând algoritmul prezentat în paragraful 4.2.1, având măsurate turația n și timpul t , obținem derivata numerică a turației, în funcție de timp, prezentată în figura 4.16, respectiv momentul de rotație în funcție de timp, prezentată în figura 4.17.

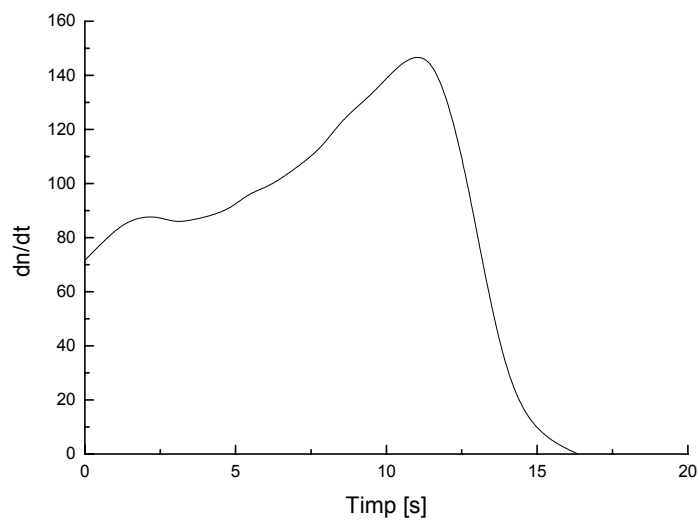


Figura 4.16. Variația în timp a derivatei turației rotorice a motorului de inducție de 2,2 kW/1500 rpm în procesul pornirii în gol, la alimentarea cu tensiune scăzută (60 V).

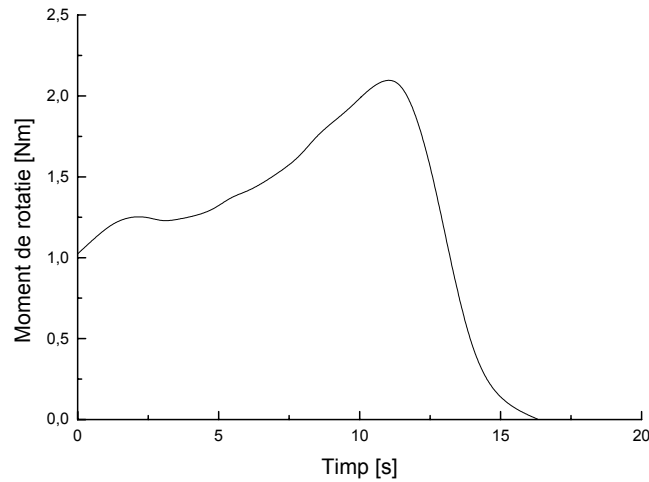


Figura 4.17. Variația în timp a momentului de rotație al motorului de inducție de 2,2 kW/1500 rpm în procesul pornirii în gol, la alimentarea cu tensiune scăzută (60 V).

Determinarea momentului de inerție are o importanță deosebită pentru calculul momentului de rotație cu această metodă.

Momentul de inerție a fost determinat dintr-o probă de autofrânare în gol, prin antrenarea motorului de inducție peste turația de sincronism și lansarea lui liber. Pentru momentul de inerție a rezultat valoarea de: $J=0,1365 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$.

Caracteristica mecanică (moment de rotație la arborele mașinii de inducție în funcție de turația rotorică), se prezintă în figura 4.18.

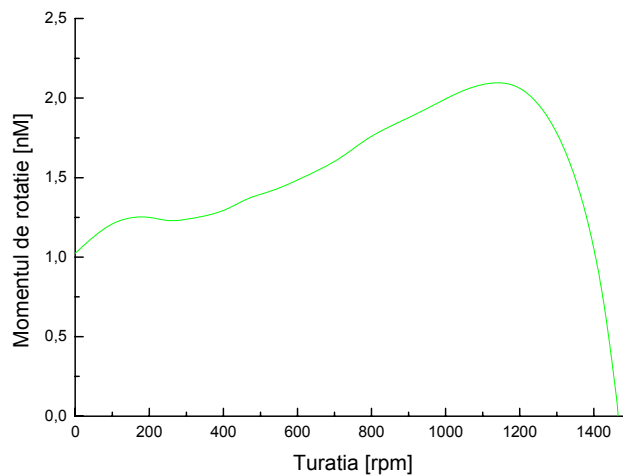


Figura 4.18. Caracteristica mecanică pentru motorul de inducție de 2,2 kW/1500 rpm din procesul pornirii în gol, la alimentarea cu tensiune scăzută (60 V), obținută din derivarea turației.

Utilizând metoda prezentată în paragraful 4.2.2, prin măsurarea puterii de intrare se determină momentul dezvoltat de motorul de inducție pe baza rezultatelor prezentate în tabelul 4.3, obținute din proba de pornire în gol a motorului de inducție.

Pierderile în fier, ce corespund tensiunii de alimentare scăzută și pierderile mecanice se determină din proba de funcționare în gol a motorului de inducție

Variația momentului de rotație în funcție turație, ce rezultă prin aplicarea acestei metode este prezentată în figura 4.19.

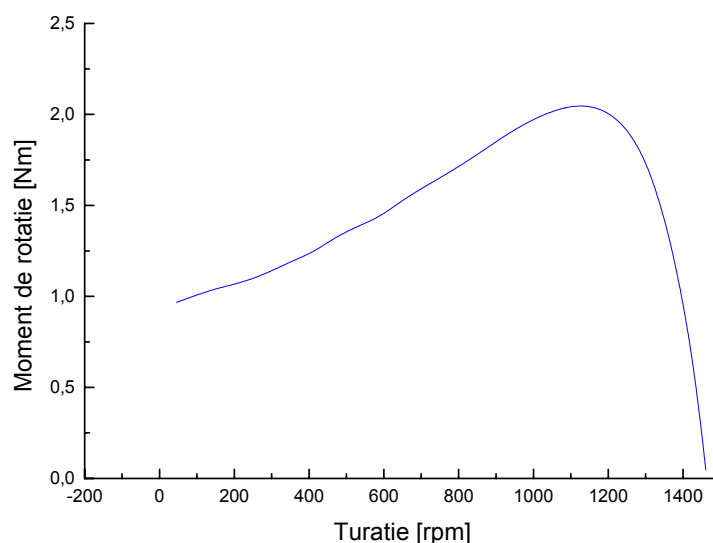


Figura 4.19. Caracteristica mecanică pentru motorul de inducție de 2,2 kW/1500 rpm din procesul pornirii în gol, la alimentarea cu tensiune scăzută (60 V), obținută prin măsurarea puterii de intrare.

În figura 4.20 sunt prezentate împreună caracteristicile mecanice ale motorului de inducție obținute prin cele trei metode:

- prin măsurarea directă cu ajutorul traductorului de moment de rotație;
- determinată din proba de pornire în gol prin metoda accelerației;
- determinată din proba de pornire în gol prin metoda bilanțului puterii de intrare.

Se constată o concordanță relativ bună a rezultatelor obținute prin cele două metode de estimare a momentului (metoda accelerației și metoda bilanțului puterii). Prin măsurare directă s-au obținut valori ale cuplului ceva mai mari decât cele estimate, dar alura curbei este asemănătoare, ceea ce ar permite o etalonare ușoară a metodelor de estimare.

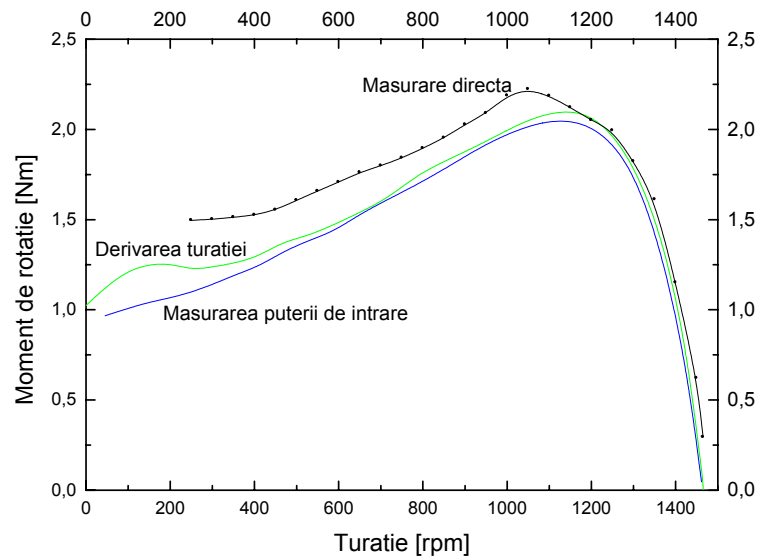


Figura 4.20. Caracteristicile mecanice pentru motorul de inducție de 2,2 kW/1500 rpm, la alimentarea cu tensiune scăzută (60 V).

Exemplul 2

Se prezintă în continuare caracteristica mecanică pentru motor de inducție proiectat pentru utilizare în tracțiune electrică, pentru acționare directă a vagonului de tramvai, având următoarele date nominale: $P_N=130$ kW; numărul de perechi de poli $2p=10$; tensiunea nominală de fază $U_N=380$ V; frecvența nominală $f_N=50$ Hz. Prototipul motorului este prezentat în figura 4.21.

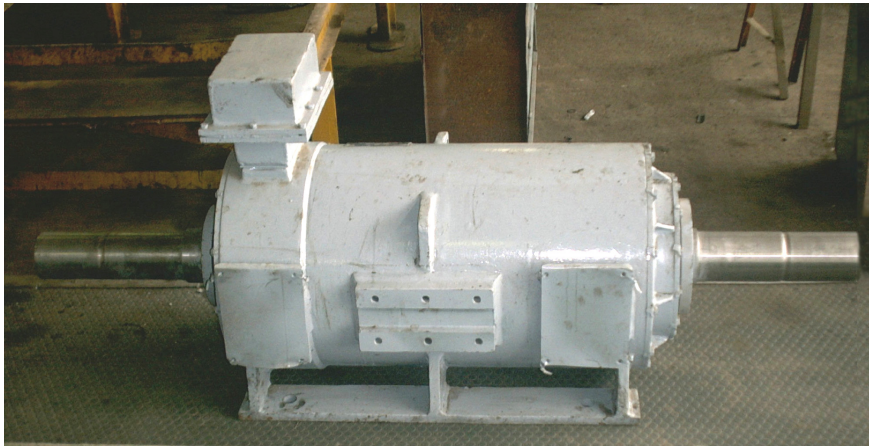


Figura 4.21. Prototipul motorului de inducție având puterea nominală $P_N=130$ kW.

Pentru acest motor s-a calculat caracteristica mecanică ce corespunde tensiunii nominale, pe baza datelor de proiectare, prin neglijarea influenței saturației.

În scopul obținerii caracteristicii mecanice moment de rotație – turație, motorul a fost supus unor porniri lente în gol. Prin alimentarea la tensiune redusă, la pornirea în gol, se consideră că motorul parcurge punct cu punct întreaga caracteristică mecanică. În timpul procesului de pornire lentă în gol au fost măsurate tensiunea și curentul pe fază și a fost calculată puterea activă absorbită, cu Sistemul de Achiziție și Prelucrare a Datelor.

Caracteristica mecanică s-a determinat utilizând metoda bilanțului puterii de intrare, pe baza rezultatelor obținute dintr-o probă de pornire în gol, la tensiune scăzută. Influența saturației s-a luat în considerare prin repetarea probei de pornire în gol pentru trei valori ale tensiunii de alimentare [10], [26].

În figura 4.22 se prezintă caracteristica mecanică obținută pe două căi: cea calculată pe baza datelor de proiectare (considerând parametrii motorului constanți) și cea estimată pe baza unor date experimentale obținute din proba de pornire în gol. Alura ușor diferită a celor două curbe se poate explica prin variația parametrilor reali ai motorului în timpul pornirii, sub influența saturației reactanțelor de dispersie.

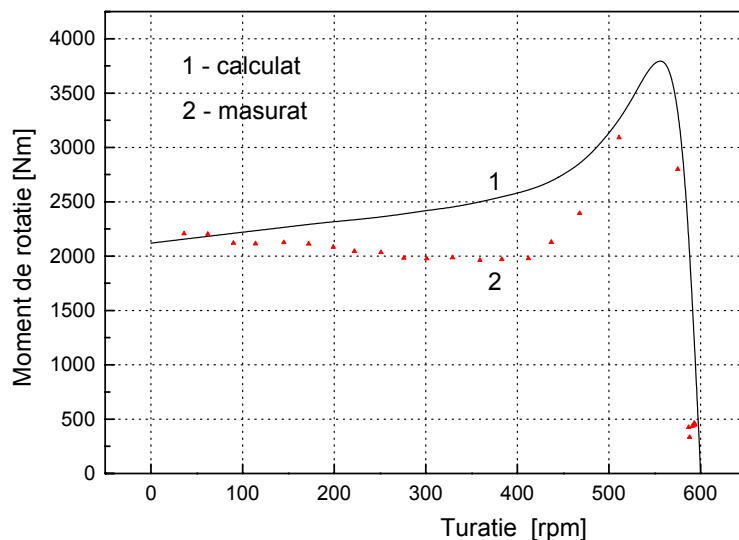


Figura 4.22. Caracteristica mecanică a motorului de inducție având puterea nominală $P_N=130$ kW.

Exemplul 3

În domeniul mașinilor de putere mare măsurarea directă a momentului la arborele motorului de inducție este dificil de realizat și implică cheltuieli materiale și de manoperă importante.

Din acest motiv, pentru estimarea momentelor de rotație în aceste cazuri rămân în discuție metodele de determinare indirectă, prin calcul, din mărimi care sunt mai ușor de măsurat.

Se prezintă în continuare rezultatele determinării caracteristicii mecanice pentru un motor de inducție având puterea nominală de 5250kW, cu tensiunea de alimentare de 10 kV.

În cazul acestui motor determinarea caracteristicii mecanice s-a efectuat prin metoda bilanțului puterii de intrare, descrisă în paragraful 4.2.2, utilizând sistemul de achiziție și prelucrare a datelor. Pentru aceasta, s-au efectuat probe de pornire a motorului la tensiune scăzută.

Turația la arborele mașinii are o variație în funcție de timp conform figurii 4.23. Pe aceeași figură este reprezentată și puterea activă absorbită de motor în procesul pornirii. Tensiunea de alimentare aplicată motorului pe fază este de 2197 V.

Variația tensiunii la bornele motorului și a curentului în înfășurările lui este prezentată în figura 4.24. Este de remarcat faptul că în procesul pornirii, datorită curenților mari absorbiți de motor, tensiunea la bornele motorului suferă o scădere de aproximativ 20%.

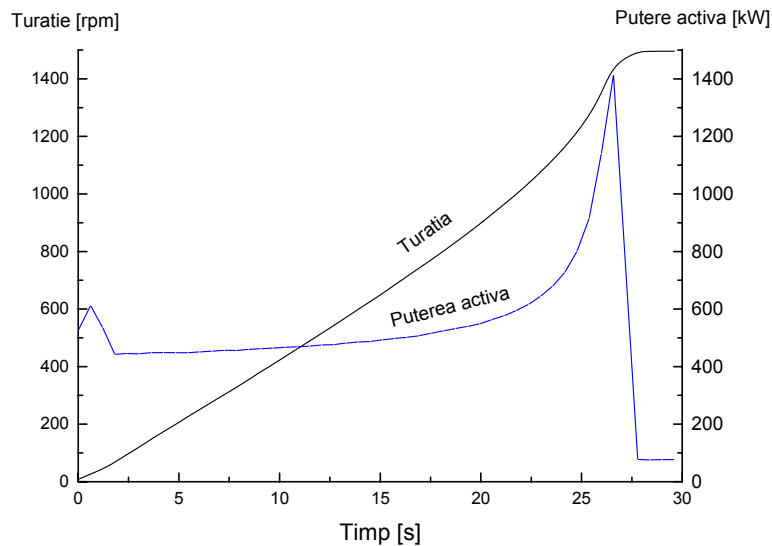


Figura 4.23. Variația turației și a puterii active absorbite de un motor de inducție de 5250 kW, 10 kV, în procesul pornirii, alimentat la o tensiune scăzută (2197 V de fază).

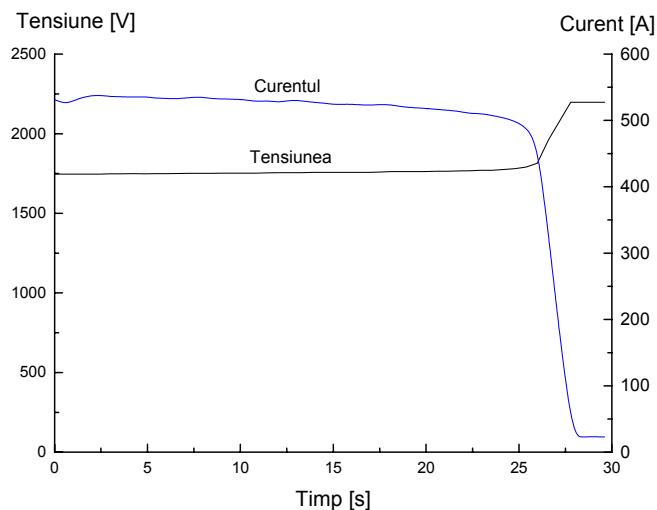


Figura 4.24. Variația tensiunii de alimentare și curentului absorbit de înfășurările motorului de inducție de 5250 kW, 10 kV, în procesul pornirii, alimentat la o tensiune scăzută (2197 V pe fază).

Folosind datele experimentale achiziționate și aplicând algoritmul descris în paragraful 4.2.2. se determină momentul de rotație al motorului de inducție de 5250 kW, corespunzător tensiunii nominale de fază, caracteristica mecanică fiind prezentată în figura 4.25.

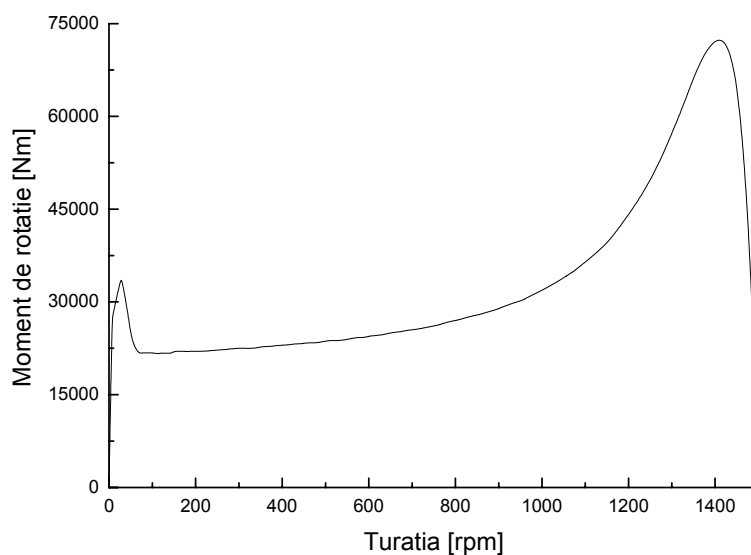


Figura 4.25. Caracteristica mecanică a motorului de inducție cu puterea $P_N=5250\text{kW}$, corespunzătoare tensiunii nominale a motorului.

Exemplul 4

În unele centrale hidroelectrice se folosesc generatoare sincrone construite ca să fie utilizate ca mașini reversibile. În aceste cazuri, mașina funcționează și în regim de pompă, pentru a stoca apa, pompând apa din aval în amonte. Pentru a funcționa în regim de pompă, aceste generatoare sincrone pornesc în regim asincron, fiind prevăzute cu colivii de pornire. Din acest motiv este de interes caracteristica mecanică moment de rotație – turație și pentru aceste mașini, atât pentru cei ce le produc, cât și pentru utilizatorii lor.

Pentru mașinile sincrone reversibile de medie și mare putere metodele de măsurare directă a momentului de rotație la arbore sunt prohibitive atât din punct de vedere al costurilor, cât și din punctul de vedere al timpului necesar.

În continuare se prezintă rezultatele obținute din probe efectuate pe o mașină sincronă reversibilă având puterea aparentă nominală de 13880 kVA. Măsurătorile au fost efectuate cu Sistemul de Achiziție și Prelucrare a Datelor.

Figura 4.26 prezintă hidrogeneratorul reversibil pregătit pentru teste în standul de probă. Acest tip de hidrogenerator care echipează Hidrocentrala Slatina Aval este prevăzut să funcționeze și în regim de pompă. Din acest motiv este proiectat cu o colivie rotorică puternică, permițând pornirea în regim de funcționare asincron. Toate testele de omologare au fost efectuate în colaborare cu Facultatea de Electrotehnică și Electroenergetică din Timișoara – Laboratorul D109.

Datele nominale ale hidrogeneratorului reversibil sunt: puterea aparentă nominală 13880 kVA, tensiunea nominală 6,3 kV, turația nominală 125 rpm.



Figura 4.26. Hidrogeneratorul reversibil de 13880 kVA (Slatina Aval) pregătit pentru teste de pornire în regim asincron în standul de probe.

Pentru determinarea caracteristicii mecanice au fost efectuate teste de pornire în gol, în asincron, cu alimentare la tensiune redusă pe fază ($U=1177$ V). Au fost achiziționate valorile momentane ale tensiunii pe cele trei faze ale mașinii și ale curentului prin cele trei faze ale mașinii, precum și valoarea momentană a turației, prin intermediul unui traductor de turație. Din blocurile achiziționate cu valori momentane se calculează pe fiecare perioadă a tensiunii valorile efective ale tensiunii și curenților pe cele trei faze ale mașinii. De asemenea se calculează puterea instantanee și puterea activă pe fiecare perioadă a tensiunii. Aceste rezultate sunt sintetizate în tabelul din Anexa 1. Pe baza valorilor momentane ale

mărimilor măsurate pot fi calculate oricare alte mărimi derivate. Fiecare linie din acest tabel reprezintă rezultatele sintetizate dintr-un bloc de achiziție.

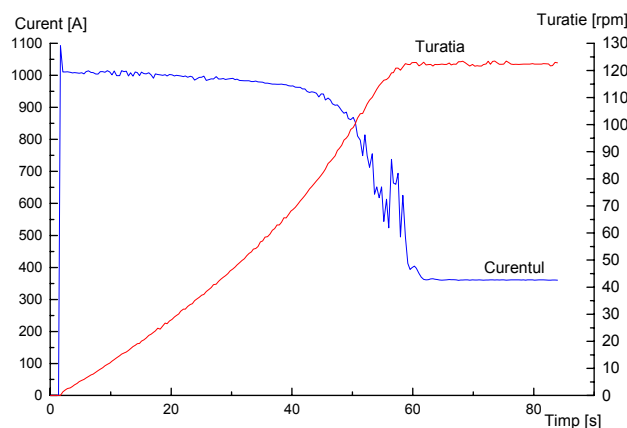


Figura 4.27. Variația în timp a valorii efective a curentului absorbit și a turației rotorice, pentru generatorul sincron reversibil de 13880 kVA pornit ca motor, determinate dintr-o probă de pornire în asincron, în gol, cu alimentare la tensiune scăzută ($U=1177V$).

O problemă deosebită o reprezintă gestionarea unui număr așa de mare de date achiziționate și apoi utilizarea acestor date experimentale pentru prelucrări ulterioare.

În figura 4.27 se prezintă variația în timp a valorii efective a curentului absorbit și a turației, înregistrate în procesul de pornire în asincron a mașinii sincrone reversibile, iar în figura 4.28 variația în timp a puterii active absorbite de la sursa de alimentare și a turației.

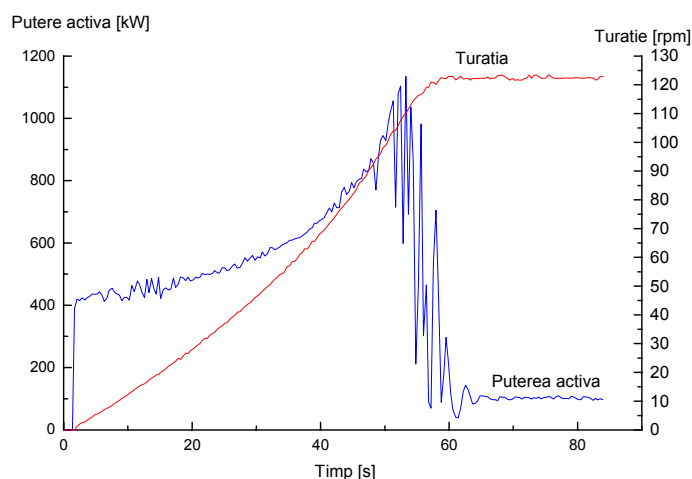


Figura 4.28. Variația în timp a puterii active absorbite și a turației rotorice, determinate dintr-o probă de pornire în asincron, în gol, cu alimentare la tensiune scăzută ($U=1171 V$), pentru generatorul sincron reversibil de 13880 kVA, pornit ca motor.

Utilizând variația turației în procesul pornirii în asincron, în gol, la tensiune scăzută ($U = 1171\text{V}$) aplicând metodologia descrisă în paragraful 4.2.1, se estimează momentul de rotație pentru mașina sincronă reversibilă de 13880 kVA. Caracteristica mecanică rezultată este prezentată în figura 4.29.

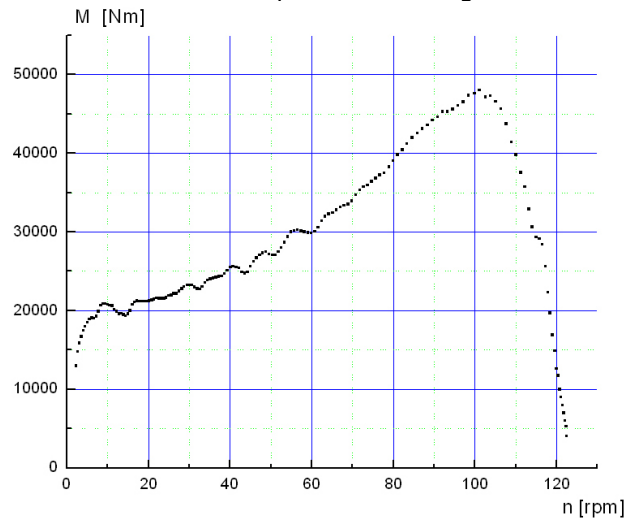


Figura 4.29. Momentul de rotație, determinat dintr-o probă de pornire în asincron, în gol, cu alimentare la tensiune scăzută ($U = 1171\text{ V}$), pentru generatorul sincron reversibil de 13880 kVA pornit ca motor.

Din aceeași probă de pornire la tensiune scăzută, din bilanțul puterii de intrare se calculează prin metoda descrisă în paragraful 4.2.2. momentul de rotație.

Pornirea în gol s-a repetat pentru un alt nivel al tensiunii ($U = 1075\text{ V}$). Având momentul estimat la două nivele ale tensiunii, se poate calcula exponentul m care intervine în calculul momentului de rotație corespunzător tensiunii nominale (4.1).

Astfel, se calculează exponentul m pentru valorile determinate ale momentului de rotație la cele două nivele ale tensiunii, pentru același nivel de turație. Rezultă pentru exponentul m variația în funcție de turație din figura 4.30.

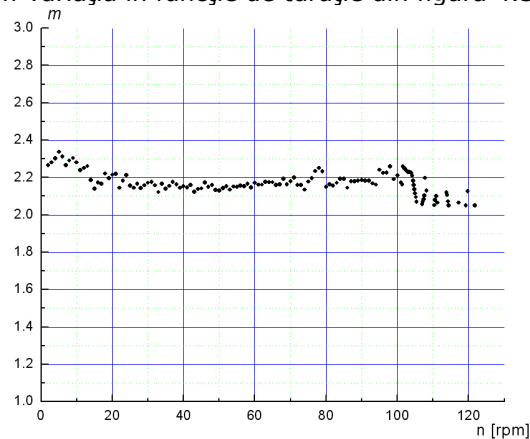


Figura 4.30. Variația exponentului m în funcție de turație.

Se observă că valoarea exponentului m este mai mare decât 2, având o variație descrescătoare cu creșterea turației. În jurul turației de sincronism se

observă o dispersie a valorilor exponentului m , în principal datorită componentelor dinamice ale momentului de rotație. Din acest motiv, rezultate mai bune se obțin prin prelucrarea datelor experimentale utilizând metoda celor mai mici pătrate.

În figura 4.31 se prezintă momentul de rotație determinat prin metoda bilanțului puterii de intrare (descrisă în paragraful 4.2.2) la pornirea în asincron, în gol, corespunzător tensiunii nominale, și momentul de rotație determinat prin metoda caracteristicilor de frecvență [10] pentru cazul mașinii sincrone reversibile de 13880 kVA.

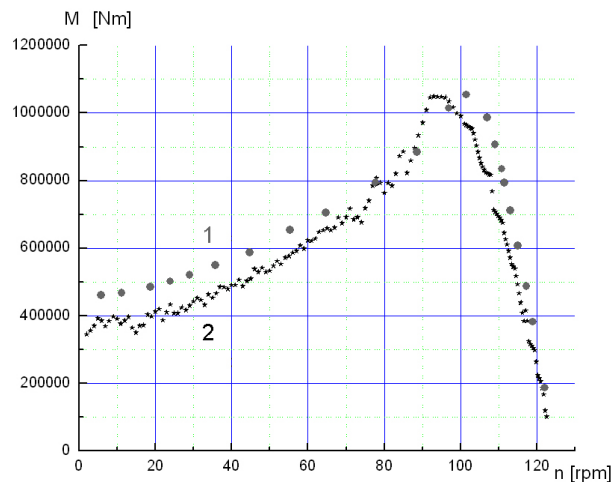


Figura 4.31. Momentul de rotație în funcție de turație corespunzător tensiunii nominale, estimat din bilanțul puterii de intrare determinat dintr-o probă de pornire în asincron, în gol (2), și calculat prin metoda caracteristicilor de frecvență (1).

Din figura 4.31 se observă o suprapunere destul de bună a caracteristicilor mecanice determinate prin cele două metode.

4.5. Concluzii

Metodele de măsurare directă a momentului de rotație la arborele motorului de inducție sunt precise, dar greu de aplicat, mai ales în cazul mașinilor de putere medie și mare, sau în cazul mașinilor cu rotor vertical, pentru că este necesară cuplarea unei mașini de putere comparabilă cu mașina de încercat la arborele acesteia.

Există posibilitatea estimării momentului de rotație exclusiv pe baza mărimilor de intrare, mult mai ușor de măsurat, fără a fi nevoie de traductoare de moment de rotație, a căror costuri cresc cu puterea mașinii de încercat, sau de cuplaje mecanice greoaie, care necesită manoperă suplimentară.

În cazul determinării momentului de rotație pe baza componentelor $dq0$ este nevoie de traductoare de tensiune și de curent de precizie ridicată.

Utilizând măsurarea valorilor momentane ale mărimilor de intrare cu Sisteme de Achiziție și Prelucrare a Datelor, metodele descrise permit estimarea momentului de rotație oricare ar fi variație tensiunii și a curentului. Prin urmare, aceste metode pot fi aplicate și în cazul alimentării motoarelor de inducție prin intermediul convertoarelor statice de frecvență.

Capitolul 5

Studii experimentale privind mașina de inducție, utilizând sisteme de achiziție și prelucrare a datelor

Determinarea caracteristicilor de funcționare în sarcină precum și modelarea funcționării mașinii de inducție, presupune cunoașterea parametrilor reali ai mașinii în diferite regimuri de încărcare, indiferent de sarcină. În calcule și în determinările experimentale se acceptă ipoteze simplificatoare, care fac ca valorile calculate ale parametrilor să conducă la rezultate care să difere mai mult sau mai puțin de comportarea reală a mașinii

În continuare sunt prezentate trei exemple de utilizare a sistemelor de achiziție și prelucrarea datelor pentru determinarea parametrilor și analiza comportării motoarelor de inducție în condiții în care utilizarea aparaturii obișnuite de măsură ar implica erori mari, sau ar fi dificil de aplicat.

5.1. Studiul influenței frecvenței asupra parametrilor mașinilor de inducție [64]

Conform paragrafului 1.3.2, la funcționarea în scurtcircuit se obține schema electrică simplificată din figura 1.7 prin neglijarea curentului în „ramura de magnetizare” a schemei echivalente în **T** din figura 1.4.

Dacă se ia în considerare și curentul de magnetizare al mașinii, impedanța echivalentă corespunzătoare regimului cu rotorul blocat este:

$$\underline{Z}_{sc} = R_{sc} + j X_{sc} = R_1 + j X_1 + \frac{(R'_2 + j X'_2)(R_m + j X_m)}{R'_2 + R_m + j(X'_2 + X_m)} \quad (5.1)$$

După efectuarea calculelor, prin identificarea părților reale și ale celor imaginare, se obține:

$$R_{sc} = R_1 + c_R R'_2; \quad X_{sc} = X_1 + c_X X'_2 \quad (5.2)$$

în care:

$$c_R = \frac{(R'_2 R_m + X'_2 X_m)(R'_2 + R_m)}{R'_2 [(R'_2 + R_m)^2 + (X'_2 + X_m)^2]} + \frac{(R'_2 X_m + X'_2 R_m)(X'_2 + X_m)}{R'_2 [(R'_2 + R_m)^2 + (X'_2 + X_m)^2]} \quad (5.3)$$
$$c_X = \frac{(R'_2 X_m + X'_2 R_m)(R'_2 + R_m)}{X'_2 [(R'_2 + R_m)^2 + (X'_2 + X_m)^2]} - \frac{(R'_2 R_m - X'_2 X_m)(X'_2 + X_m)}{X'_2 [(R'_2 + R_m)^2 + (X'_2 + X_m)^2]}$$

Din (5.3) se constată simplu că:

$$\lim_{X_m \rightarrow \infty} c_R = 1; \quad \lim_{X_m \rightarrow \infty} c_X = 1 \quad (5.4)$$

ceea ce conduce la schema simplificată cunoscută prezentată în figura 1.7.

Cu excepția lui R'_2 , parametrii cuprinși în relația (5.3) sunt dependenți de frecvența f , adică: $c_R = c_R(f)$ și $c_X = c_X(f)$. Considerând variații liniare în raport cu frecvența pentru acești parametri, se obține:

$$c_R(f) = \frac{A_1 S_r + B S_x}{R_2' (S_r^2 + S_x^2)}; \quad c_X(f) = \frac{B S_r - A_2 S_x}{X_2' \left(\frac{f}{50}\right) (S_r^2 + S_x^2)}, \quad (5.5)$$

în care:

$$\begin{aligned} A_1 &= R_2' R_m \left(\frac{f}{50}\right) + X_2' X_m \left(\frac{f}{50}\right)^2; \quad A_2 = R_2' R_m \left(\frac{f}{50}\right) - X_2' X_m \left(\frac{f}{50}\right)^2 \\ B &= R_2' X_m \left(\frac{f}{50}\right) + X_2' R_m \left(\frac{f}{50}\right)^2; \quad S_r = R_2' + R_m \left(\frac{f}{50}\right); \\ S_x &= X_2' \left(\frac{f}{50}\right) + X_m \left(\frac{f}{50}\right). \end{aligned} \quad (5.6)$$

În relațiile (5.5) și (5.6), parametrii R_2' , R_m , X_2' , X_m corespund frecvenței nominale și se determină simplu dintr-o probă de mers în gol și una de funcționare în scurtcircuit, efectuate la 50Hz, utilizând schemele echivalente simplificate. Coeficienții c_R și c_X determinați mai sus au semnificația unor „funcții de corecție” în determinarea parametrilor rotorici din proba de scurtcircuit.

Din relația (5.2) rezultă:

$$R_2' = \frac{1}{c_R(f)} (R_{sc} - R_1); \quad X_2' = \frac{1}{c_X(f)} (X_{sc} - X_1) \quad (5.7)$$

cu schema prezentată în figura 5.1, corespunzătoare regimului de scurtcircuit, care generalizează schema simplificată cunoscută (figura 1.7).

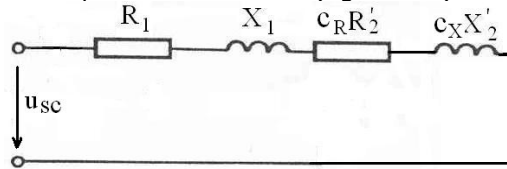


Figura 5.1. Schema echivalentă corectată, corespunzătoare regimului de scurtcircuit.

S-a obținut astfel o schemă echivalentă simplă, prezentată în figura 5.1, care poate fi utilizată la proba de scurtcircuit la frecvență variabilă, în scopul determinării corecte a parametrilor rotorici echivalenți ca funcții de frecvența rotorică.

Pentru exemplificare se consideră cazul unui motor trifazat de inducție, având puterea de 1,1 kW la 1500 rot/min, tensiunea nominală de fază $U_N=220$ V, frecvența nominală $f_N=50$ Hz, curentul nominal $I_N=2,77$ A, cu fazele conectate în stea și având următorii parametri: $R_1=5,31$ Ω ; $R_2'=5,169$ Ω ; $X_1=X_2'=7,96$ Ω ($L_1=L_2=0,02533$ H); $R_m=3,8$ Ω ; $X_m=182$ Ω .

Aplicând relațiile (5.5), cu aceste valori s-a determinat variația în raport cu frecvența a coeficienților c_R și c_X . Rezultatele sunt prezentate în figura 5.2.

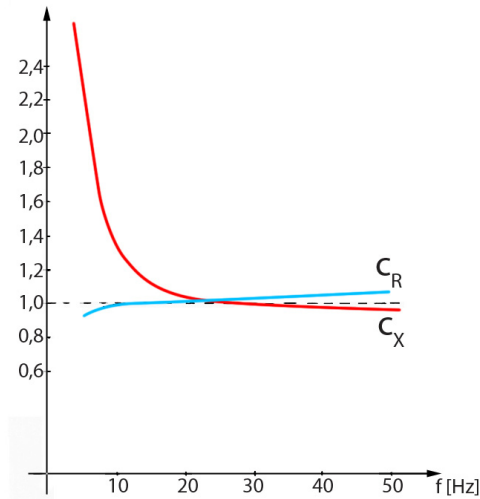


Figura 5.2. Variația coeficienților c_R și c_X în raport cu frecvența f .

Din figura 5.2 se observă creșterea accentuată a coeficientului c_X la scăderea frecvenței sub 15 Hz, ceea ce implică o influență considerabilă a lui asupra valorii reactanței X_2' conform relației (5.7). Prin neglijarea lui c_X , la $f=15$ Hz se introduce o eroare de cca. 12 % în determinarea lui X_2' , la 8 Hz o eroare de 55 %, iar la 6 Hz o eroare de 100 %.

Coeficientul c_R are o variație mai lentă în raport cu frecvența, erorile care se fac prin neglijarea lui în determinarea rezistenței R_2' fiind de maxim ± 6 % în cazul prezentat.

În figura 5.3 s-a reprezentat variația lui c_X în raport cu frecvența pentru mai multe valori ale reactanței de magnetizare (ceilalți parametri fiind considerați constanți). La creșterea lui X_m , curba $c_X(f)$ tinde spre dreapta $c_X=1$. Pentru valori uzuale ale reactanței de magnetizare, curba $c_X(f)$ este considerabil distanțată față de dreapta $c_X=1$. Prin urmare, valoarea reactanței de magnetizare (determinată prin calcul sau experimental) trebuie să fie cât mai apropiată de valoarea reală, întrucât are o influență sensibilă asupra valorilor c_X , în special pentru $f < 20$ Hz.

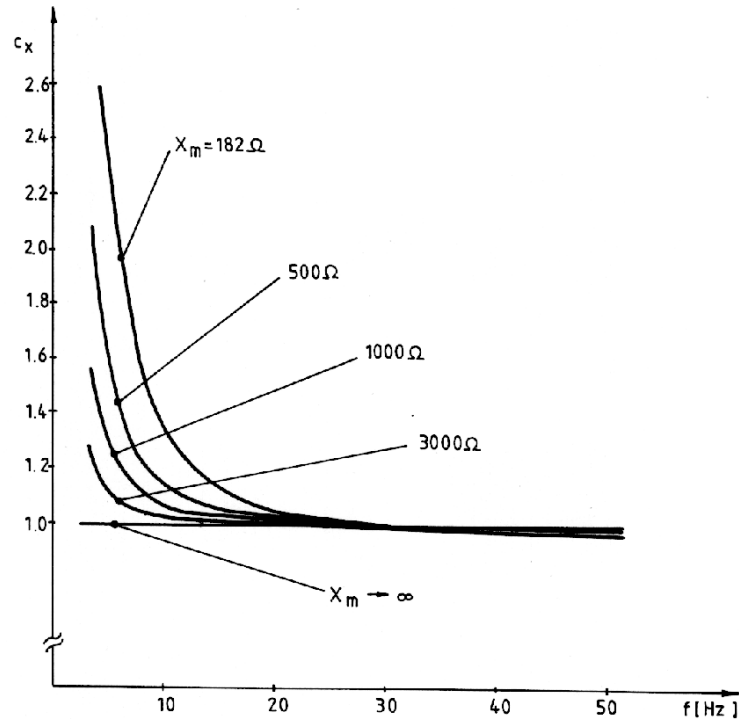


Figura 5.3. Variația coeficientului c_x în raport cu frecvența pentru diferite valori ale reactanței de magnetizare.

Pentru stabilirea valorii reactanței de magnetizare s-a utilizat un program de calcul al parametrilor pe baza datelor constructive ale motorului analizat. S-au obținut valorile prezentate în figura 5.4.

La valori reduse ale tensiunii, reactanța de magnetizare atinge valoarea maximă $X_m = 182 \Omega$ (valoare nesaturată); în exemplu numeric din acest paragraf s-a considerat această valoare întrucât determinările experimentale prezentate în continuare s-au făcut la valori reduse ale tensiunii.

S-a testat motorul de inducție cu colivie simplă în rotor cu datele prezentate anterior utilizând Sistemul de Achiziție și Prelucrarea Datelor.

S-au efectuat măsurători cu rotorul blocat pentru mai multe valori ale frecvenței ($f=5\dots 50$ Hz) la tensiune de alimentare redusă ($U_{sc}=20\dots 40$ V) astfel încât curentul prin înfășurările motorului a avut aproximativ aceeași valoare ($I \approx 2$ A) în toate cazurile, cu scopul de a exclude influența saturației asupra reactanțelor de dispersie. Toate probele s-au făcut aproximativ în aceleași condiții termice, astfel încât s-a presupus că rezistențele R_1 și R_2' au valori fixe, independente de temperatură. S-au înregistrat valorile tensiunilor de fază, curenților, puterilor active și reactive. Pe această bază s-au determinat: Z_{sc} , R_{sc} , $X_{sc} = \omega L_{sc}$. Tabelul 5.1 conține doar valorile R_{sc} și L_{sc} obținute din aceste măsurători. Cu $R_1 = 5,31 \Omega$ și $L_1 = 0,02533$ H, din (5.2) se obțin valorile produselor $c_R R_2'$ și $c_X L_2'$, prezentate în

Tabelul 5.1. Cunoscând și valorile coeficienților c_R și c_X (relația 5.5) se determină R_2' și X_2' .

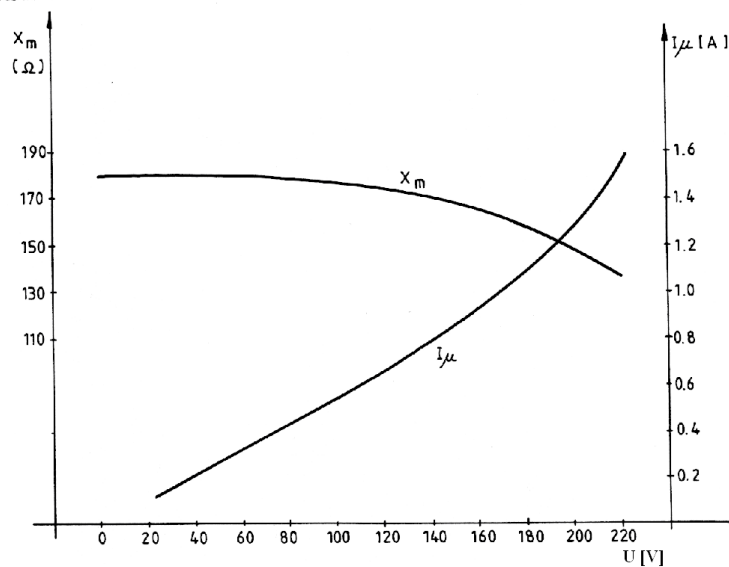


Figura 5.4. Variația reactanței de magnetizare, respectiv a curentului de magnetizare (determinate din calcul, pe baza datelor constructive) în funcție de tensiunea de alimentare.

Tabelul 5.1

Valorile parametrilor echivalenți de scurtcircuit și ai parametrilor rotorici reduși la stator

ai motorului de inducție testat, determinați din proba cu rotorul blocat

f	R_{sc}	$c_R R_2'$	R_2'	L_{sc}	$c_X L_2'$	L_2'
[Hz]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[H]	[H]	[H]
52,06	11,74	6,43	6,0668	0,05051	0,02518	0,02591
50,03	11,698	6,388	6,0421	0,05064	0,02531	0,02601
48,12	11,659	6,349	6,0187	0,05077	0,02544	0,02611
48,09	11,658	6,348	6,0184	0,05077	0,02544	0,02611
46,25	11,621	6,311	5,9958	0,05091	0,02558	0,02622
43,62	11,567	6,257	5,9635	0,05114	0,02581	0,02639
40,22	11,497	6,187	5,9216	0,0548	0,02615	0,02664
37,71	11,446	6,136	5,8908	0,05178	0,02645	0,02685
35,06	11,392	6,082	5,8582	0,05214	0,02681	0,02710
32,02	11,329	6,019	5,821	0,05263	0,02730	0,02742
30,14	11,291	5,981	5,7981	0,05299	0,02766	0,02765
30,9	11,307	5,997	5,8073	0,05284	0,02751	0,02755
28,28	11,253	5,943	5,7757	0,05339	0,02806	0,02788
26,33	11,213	5,903	5,7525	0,05388	0,02855	0,02815
24,1	11,167	5,857	5,7264	0,05452	0,02919	0,02848
22,37	11,132	5,822	5,7068	0,05511	0,02978	0,02874
24,19	11,169	5,859	5,7275	0,05449	0,02916	0,02847

22,97	11,144	5,834	5,7136	0,0549	0,2957	0,02865
22,19	11,128	5,818	5,7049	0,05517	0,02984	0,02877
22,15	11,127	5,817	5,7044	0,05519	0,02986	0,02889
21,45	11,113	5,803	5,6967	0,05546	0,03013	0,02889
21,38	11,112	5,802	5,6960	0,05548	0,03015	0,0289
20,83	11,100	5,790	5,6900	0,05571	0,03038	0,02898
20,05	11,085	5,775	5,6818	0,05604	0,03071	0,0291
19,61	11,076	5,766	5,6772	0,05624	0,03091	0,02926
19,03	11,064	5,754	5,6713	0,05652	0,03119	0,02926
18,05	11,044	5,734	5,6617	0,05702	0,03169	0,02939
17,53	11,033	5,723	5,6569	0,05731	0,03198	0,02946
16,58	11,013	5,703	5,6484	0,05787	0,03254	0,02957
15,54	10,992	5,682	5,6402	0,05856	0,03323	0,02966
14,94	10,980	5,670	5,6359	0,05899	0,03366	0,0297
16,44	11,011	5,701	5,6473	0,058	0,03267	0,02962
13,99	10,960	5,650	5,6300	0,05971	0,03438	0,02968
11,86	10,917	5,607	5,6232	0,06209	0,03676	0,02974
9,4	10,840	5,530	5,6081	0,06689	0,04156	0,02972
8,06	10,791	5,481	5,6105	0,0716	0,04627	0,0298
6,71	10,710	5,400	5,6081	0,07911	0,05378	0,02978
6,73	10,701	5,391	5,5973	0,07854	0,05321	0,02954
5,29	10,554	5,244	5,5906	0,09364	0,06831	0,02982
5,17	10,553	5,243	5,6073	0,09519	0,06986	0,02974

În figura 5.5 și 5.6 a fost reprezentată variația în raport cu frecvența a rezistenței R_2' , respectiv a inductivității L_2' , în valori raportate la valoarea corespunzătoare celei mai mici frecvențe la care s-au făcut măsurătorile ($f_0=5,17$ Hz).

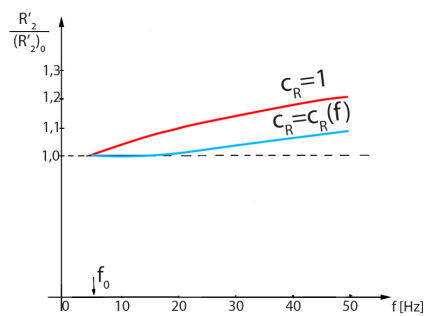


Figura 5.5. Variația rezistenței R_2' în valori raportate, în funcție de frecvența f .

Dacă se utilizează în calcule schema electrică simplificată corespunzătoare scurtcircuitului ($c_R=1$), se constată din figura 5.5 o creștere de cca. 21% a rezistenței

R_2' la $f=50$ Hz, față de valoarea acesteia la f_0 , dacă se ține seama de valorile coeficientului $c_R(f)$, rezultă o creștere corespunzătoare a rezistenței R_2' de 8,2 %.

Similar, pentru inductivitatea L_2' se constată din figura 5.6 o reducere a valorii acesteia la numai 36% din valoarea corespunzătoare la f_0 în varianta $c_x=1$, respectiv o reducere la 87% dacă se utilizează coeficientul $c_x(f)$.

Dependența mărimilor R_2' și L_2' de frecvență este justificată, fiind determinată de efectul de refulare a curentului în barele rotorului (efectul Field).

Din punct de vedere calitativ rezultatele măsurătorilor efectuate pun în evidență acest efect, dar, sub aspect cantitativ, intensitatea efectului rezultă nejustificat de mare dacă se consideră în calcule $c_R=1$ și $c_x=1$; rotorul motorului încercat are o colivie simplă cu bare în formă de pană, cu înălțimea totală $h=12,7$ mm și lățimea medie $b=3,1$ mm, care determină la pornire un efect slab de refulare a curentului din bare, practic neglijabil.

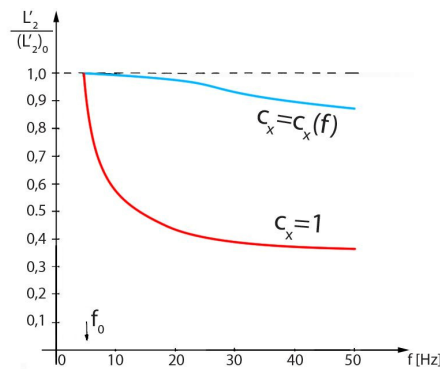


Figura 5.6. Variația inductivității L_2' în valori raportate, în funcție de frecvența f .

Un calcul aproximativ al coeficienților k_r și k_x , utilizați în proiectare [19], [22], la aprecierea cantitativă a efectului Field, conduce la valorile $k_r=1,067$ și $k_x=0,973$ (corespunzătoare la $f=50$ Hz), care exprimă intensitatea redusă a efectului în cazul motorului analizat.

În consecință, dacă proba de scurtcircuit se efectuează la valori reduse ale frecvenței ($f < 20$ Hz), trebuie luată în considerare schema echivalentă completă (inclusiv ramura de magnetizare), altfel apar erori inacceptabil de mari la determinarea parametrilor rotorici. Schema echivalentă propusă reprezintă o generalizare a schemei simplificate cunoscute pentru regimul de scurtcircuit, are un domeniu larg de aplicabilitate, asigură eliminarea erorilor de determinare a parametrilor rotorici din proba de scurtcircuit și permite determinarea modului corect de variație a parametrilor în raport cu frecvența.

Dacă totuși se utilizează schemele simplificate la determinarea indirectă a unor parametri, este necesar să se analizeze în ce măsură ipotezele simplificatoare, care au stat la baza construirii schemei, mai pot fi acceptate sau nu în situația respectivă

5.2. Studiul influenței efectului de saturație asupra parametrilor mașinilor de inducție

În cazul mașinii de inducție cu rotor în scurtcircuit, parametrii rotorici sunt influențați și de fenomenul de saturație a mediului feromagnetic prin care se închid liniile câmpului magnetic de dispersie, pe lângă fenomenul de refulare a curentului în barele rotorice, dependentă de frecvența din rotor. Nivelul saturației de acest tip depinde de valoarea curentului din conductoarele plasate în creștătură.

Se consideră motorul de inducție în execuție normală, cu colivie simplă în rotor, având următoarele date nominale: puterea $P_N=1,5$ kW la 1500 rot/min, tensiunea nominală de fază $U_N=220$ V, frecvența nominală $f_N=50$ Hz, curentul nominal $I_N=3,8$ A, factorul de putere nominal $\cos\varphi_N = 0,79$, turația nominală $n_N=1410$ rpm.

Din probele clasice de încercare s-au determinat parametrii $X_1 = X_2' = 4,68 \Omega$, $R_2' = 3,2 \Omega$.

Reactanța de dispersie statorică X_1 s-a considerat egală cu reactanța de dispersie rotorică redusă la stator X_2' . Pentru determinarea caracteristicilor mașinii de inducție se consideră suficientă cunoașterea cu precizie a sumei $X_1 + X_2'$, fără separarea celor două reactanțe [35].

S-au efectuat probe în regim de scurtcircuit la frecvența constantă și curent absorbit variabil. Măsurătorile s-au repetat pentru mai multe niveluri ale frecvenței, în domeniul frecvențelor în care funcționează motorul (0÷50 Hz). S-a urmărit ca valorile efective ale curentului absorbit de motor să fie între limite largi.

Pentru acest regim, se poate considera egalitatea curentului statoric I_1 și a curentului rotoric redus la stator I_2' . Curentul reprezintă variabila independentă, valorile pe care le ia acesta indicând nivelul de saturație a căilor câmpului magnetic de dispersie.

Se prezintă în tabelul 5.2. rezultatele semnificative din două seturi de măsurători, efectuate la 31 Hz și la 46 Hz, fără detalierea valorilor din blocurile de achiziție și fără calculele intermediare. Rezistențele fazelor statorice s-au măsurat după fiecare set de măsurători, datorită încălzirii mașinii.

Tabelul 5.2.

Sinteza rezultatelor măsurătorilor la două niveluri de frecvență: 46 Hz și 31 Hz

Nr. crt.	Tensiunea pe fază	Curentul pe fază	Puterea activă totală	Rezistența statorică	Reactanța rotorică la frecvența de încercare f	Inductivitatea rotorică	Frecvența	Rezistența rotorică redusă la stator	Reactanța de dispersie rotorică redusă la stator
	U_f	I_f	P_{sc}	R_1	X_{2fv}	L_2'	f	R_2'	X_2'
	[V]	[A]	[W]	[Ω]	[Ω]	[H]	[Hz]	[Ω]	[Ω]
1	114,320	10,564	2670,600	4,283	3,20474	0,011064	46,10	3,69351	3,47586
2	102,835	9,464	2123,377	4,203	3,36851	0,011683	45,89	3,69902	3,67020
3	100,248	9,103	1986,709	4,213	3,44647	0,011834	46,35	3,77845	3,71788
4	99,984	9,222	2004,805	4,180	3,40024	0,011849	45,67	3,67779	3,72261
5	85,751	7,669	1404,09	4,243	3,74220	0,012906	46,15	3,71456	4,05439

126 Studii experimentale privind mașina de inducție - 5

6	69,173	6,217	7 891,135	3,993	3,93668	0,013588	46,11	3,69196	4,26879
7	55,378	4,904	557,313	4,057	4,13068	0,014267	46,08	3,68128	4,48207
8	41,207	3,626	304,078	4,043	4,25484	0,014737	45,95	3,66585	4,62986
9	31,125	2,740	172,331	4,003	4,29951	0,014886	45,97	3,64807	4,67643
10	15,432	1,365	42,116	3,933	4,33130	0,014992	45,98	3,60127	4,70998
11	6,787	0,605	8,178	3,897	4,28744	0,014824	46,03	3,55091	4,65722
1	88,021	10,073	2157,52 0	3,920	2,33578	0,011938	31,14	3,16787	3,75045
2	87,019	10,230	2122,22 0	3,573	2,33800	0,011735	31,71	3,18622	3,68654
3	80,883	9,155	1823,32 2	4,230	2,37968	0,012654	29,93	3,02146	3,97542
4	79,504	8,833	1709,85 0	4,223	2,50215	0,012875	30,93	3,08167	4,04486
5	65,155	7,068	1110,01 2	4,170	2,71681	0,013903	31,10	3,23651	4,36786
6	57,452	6,286	859,744	3,950	2,79379	0,014316	31,06	3,30269	4,49741
7	46,025	4,955	541,094	3,960	2,92264	0,015010	30,99	3,38622	4,71546
8	41,378	4,432	433,700	3,993	2,97911	0,015280	31,03	3,36651	4,80037
9	28,979	3,192	213,829	3,700	3,02137	0,015497	31,03	3,29551	4,86846
10	17,846	1,956	80,535	3,700	3,06125	0,015671	31,09	3,31658	4,92320
11	9,579	1,056	23,217	3,693	3,07250	0,015739	31,07	3,24663	4,94448
12	9,537	1,053	23,066	3,693	3,06292	0,015720	31,01	3,24083	4,93860

Măsurătorile au fost efectuate utilizând Sistemul de Achiziție și Prelucrarea Datelor SAPDME1

Variațiile parametrilor rotorici în funcție de curentul prin înfășurări sunt prezentate în figurile următoare: în figura 5.7 pentru 31 Hz, iar în figura 5.8 pentru 46 Hz.

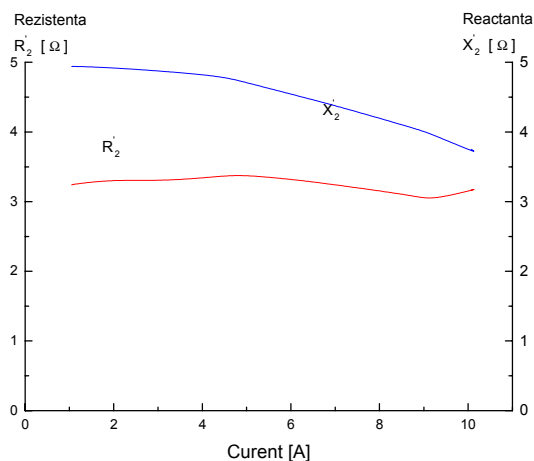


Figura 5.7. Variația parametrilor rotorici în funcție de curent la frecvența de 31 Hz.

Analizând rezultatele pentru întreaga gamă a frecvențelor la care s-au făcut măsurătorile, rezultă că rezistența rotorică redusă la stator este practic constantă în raport cu curentul, la un anumit nivel al frecvenței. Valorile rezistenței R_2' ușor diferite de la punct la punct (Tabelul 5.2) sunt cauzate de erorile de măsurare, întrucât rezistența nu este afectată de saturația magnetică.

Reactanța de dispersie rotorică redusă la stator X_2' scade cu creșterea curentului, la același nivel al frecvenței, putând fi aproximată bine cu o dependență liniară de forma:

$$x_2'(i) = a \cdot i + b \quad (5.8)$$

Determinarea coeficienților a și b se poate face prin metoda celor mai mici pătrate [23].

Comparând curbele din figura 5.7 cu cele din figura 5.8 se constată (așa cum era de așteptat) că la frecvența mai mare (46 Hz) valorile rezistenței R_2' sunt mai mari, iar cele ale reactanței X_2' sunt mai mici, din cauza efectului pelicular din barele rotorului, care este tot mai intens pe măsură ce frecvența crește.

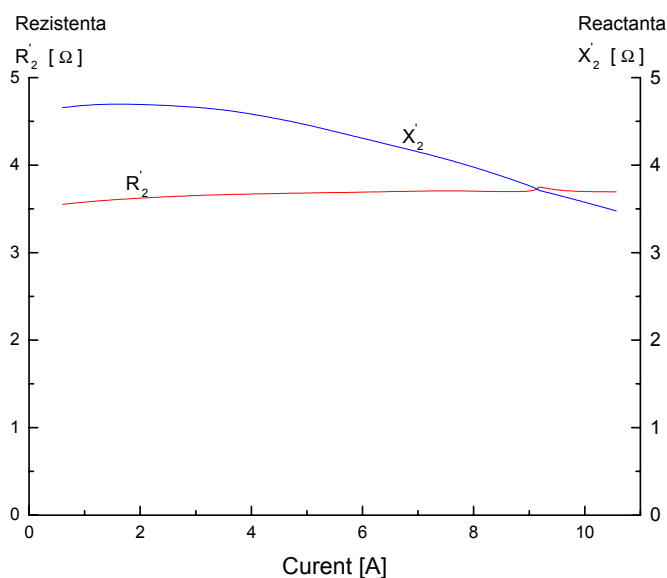


Figura 5.8. Variația parametrilor rotorici în funcție de curent la frecvența de 46 Hz.

Prin analiza rezultatelor măsurătorilor efectuate la mai multe frecvențe s-a constatat că variația reactanțelor în funcție de curent reprezintă niște funcții liniare având coeficient unghiular practic constant.

De exemplu, pentru măsurătorile din tabelul 5.2 s-au obținut pentru funcțiile $x_2'(i)$ următoarele valori pentru coeficienții a și b ai funcției (5.8):

- la 31 Hz, $a = -0,135$; $b = 5,23$;
- la 46 Hz; $a = -0,130$; $b = 4,96$;

5.3. Realizarea unei sarcini artificiale prin metoda amestecului de frecvență

Încercarea la încălzire este una din încercările de bază la care este supusă o mașină de inducție, prin care se certifică funcționarea corespunzătoare în sarcină a ei.

Încercarea la încălzire a motorului de inducție se face prin alimentarea motorului cu tensiunea nominală, înfășurările statorului fiind parcurse de curenții nominali.

Încercarea la încălzire a mașinii este importantă să se facă în standul de probă al fabricii producătoare. Acest lucru implică găsirea unei mașini de putere comparabilă cu mașina de încercat, care să constituie sarcină pentru aceasta. În plus, cele două mașini trebuie să fie cuplate mecanic, ceea ce implică de multe ori un consum de manoperă foarte mare pentru cuplarea și alinierea mașinilor. În ceea ce privește mașinile de putere mare, în cele mai multe situații mașina nu se poate încerca în sarcină nominală la producător.

Realizarea probei de încălzire la beneficiar, cu mașina în stare montată și cu sarcina de lucru cuplată, poate conduce uneori, în cazul în care mașina nu se încadrează în limitele de încălzire prevăzute, la cheltuieli suplimentare, de demontare a mașinii și de readucerea ei în fabrica producătoare, pentru remedierea deficiențelor.

Principalele dezavantaje implicate de aplicarea în practica industrială a acestei metode de încercare în sarcină, prin cuplarea mașinii de încercat cu o altă mașină, sunt:

- consum mare de manoperă în operațiile de cuplare mecanică și centrare a mașinilor;
- consumuri mari de energie în timpul probelor, care implică funcționarea simultană a mașinii de încercat și a unei mașini de antrenare de aceeași putere.

S-a pus problema efectuării unor probe de încălzire prin metode echivalente, pentru a evita dificultățile de mai sus.

În acest sens ar intra în discuție următoarele variante de realizare a probelor de încălzire:

a) Motorul se poate încerca în condițiile în care se crește curentul prin înfășurările statorice ale motorului, încărcând motorul în sarcină, la tensiune redusă, până se obține valoarea nominală a curentului. În astfel de probe de încălzire în sarcină redusă, în care tensiunea de alimentare este mai mică decât tensiunea nominală, rezultatele măsurătorilor corespund doar cu aproximație regimului nominal [50]. Chiar dacă se obțin curenții nominali în înfășurări, ceea ce asigură obținerea încălzirii mașinii datorită înfășurărilor, se pierde parțial efectul de încălzire datorit pierderilor în circuitul magnetic al mașinii.

Aplicarea metodei de încercare în sarcină redusă, prevăzută de standarde, prezintă de asemenea dificultăți în ceea ce privește cuplarea mecanică a motorului de încercat cu mașina pe care o antrenează, mai ales în cazul mașinilor de putere mare și îndeosebi în cazul motoarelor cu ax vertical, pentru care dotarea standurilor uzinale nu permite cuplarea cu altă mașină. Totuși, în acest caz puterea mașinii cu care se încarcă mașina de încercat poate fi de putere mai mică decât aceasta.

b) Motorul poate fi încercat în gol, la o tensiune mai mare decât tensiunea nominală, care să permită obținerea în înfășurări a curentului nominal. În acest caz rezultatele sunt distorsionate pe de-o parte datorită saturației circuitului magnetic și pe de altă parte din cauza faptului că pierderile în fier sunt mai mari decât cele corespunzătoare tensiunii nominale.

c) Necesitatea încercării mașinilor de inducție la încălzire în sarcină nominală a condus la punerea la punct a unei metode prin care se creează o sarcină artificială la valori nominale ale curentului și tensiunii de alimentare, mașina de încercat nefiind cuplată mecanic cu altă mașină auxiliară.

Sarcina artificială se creează alimentând mașina de încercat cu două tensiuni alternative înseriate, de frecvențe diferite, conform schemei de principiu dată în figura 5.9. Metoda a fost concepută de A. Ytterberg [90] și poartă numele de metoda celor două frecvențe, sau metoda amestecului (mixajului) de frecvențe. Pentru fabricile producătoare de mașini de inducție de mare putere, această metodă este singura soluție practică de verificare a încălzirii mașinii, în condițiile similare cu cele de încălzire în sarcină nominală a mașinii, cu mașina rotind în gol, fără a fi cuplată la arbore. Deși principiul teoretic al metodei este cunoscut [25], [48], [50], aplicarea ei în practică pentru mașini de puteri mari implică experiență în ceea ce privește utilizarea și stabilitatea mașinilor din standul de probă, care intră în componența schemei de încercare și în ceea ce privește corelarea frecvențelor de încercare.

Mașina de inducție MI supusă încercării de sarcină artificială este alimentată de la două surse trifazate cu sisteme simetrice de tensiuni de frecvențe diferite, sursele fiind înseriate. Sursa principală de alimentare poate fi rețeaua, sau poate fi un generator sincron GS_1 acționat de o mașină de antrenare M_1 , astfel încât tensiunea principală are frecvența egală cu frecvența nominală f_1 a mașinii de încercat. În serie cu sursa principală de alimentare este conectată cea de a doua sursă, generatorul sincron GS_2 , care furnizează un sistem de tensiuni de valoare redusă având frecvența f_2 , mai mică decât cea corespunzătoare sistemului de tensiuni furnizat de sursa principală. În acest fel mașina de încercat funcționând în regim de mers în gol este alimentată cu o sumă de două tensiuni alternative trifazate de frecvențe diferite, mod de alimentare cunoscut sub numele de „metoda celor două frecvențe”.

Pentru această metodă de alimentare, se consideră că în mașină se stabilesc două câmpuri magnetice învârtitoare având atât amplitudinile cât și viteza de rotație diferite între ele. Admițând principiul suprapunerii efectelor se poate considera că în întrefier apare un câmp magnetic învârtitor care are amplitudinea inducției modulată cu o frecvență egală cu diferența valorilor frecvențelor tensiunilor celor două sisteme simetrice. Presupunem cele două tensiuni alternative de frecvențe diferite:

$$\begin{aligned} u_1(t) &= U_{1m} \sin \omega_1 t \\ u_2(t) &= U_{2m} \sin \omega_2 t. \end{aligned} \quad (5.8)$$

Prin însumarea celor două tensiuni se obține tensiunea rezultantă $u(t)$:

$$U(t) = u_1(t) + u_2(t) = U_{1m} \sin \omega_1 t + U_{2m} \sin \omega_2 t \quad (5.9)$$

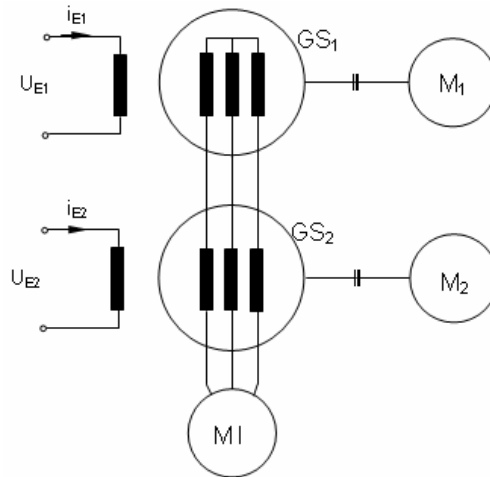


Figura 5.9. Schema de principiu pentru alimentarea cu mixaj de frecvență.

Cu notațiile:

$$\begin{aligned}\omega &= \omega_1 - \omega_2 \\ \nu\omega &= \omega_1 + \omega_2 \\ \omega_1 &= \frac{\omega}{2}(1 + \nu),\end{aligned}\quad (5.10)$$

efectuând calculele, se obține [23]:

$$\begin{aligned}u &= (U_{1m} - U_{2m})\sin \omega_1 t + U_{2m} \cdot 2 \cdot \cos \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t \cdot \sin \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t = \\ &= (U_{1m} + U_{2m})\sin \omega_1 t + i_{2m} \cos \frac{\omega}{2} t \cdot \sin \frac{\nu\omega}{2} t\end{aligned}\quad (5.11)$$

Dacă ω este foarte mic, ceea ce înseamnă că ν este mult mai mare decât 1, se poate aproxima:

$$\omega_1 \cong \frac{\nu\omega}{2}\quad (5.12)$$

și astfel se obține:

$$u = \left[(U_{1m} - U_{2m}) + 2U_{2m} \cdot \cos \frac{\omega}{2} t \right] \cdot \sin \frac{\nu\omega}{2} t\quad (5.13)$$

Cu alte cuvinte tensiunea de alimentare prin metoda mixajului de frecvențe reprezintă o funcție cu variație periodică de frecvență f_1 , a cărei amplitudine are o variație lentă și periodică în timp (amplitudine modulată); ca urmare și curentul absorbit de mașina de încercat va avea o amplitudine lent variabilă în timp.

O variație în amplitudine a inducției câmpului magnetic învârtitor din întrefier determină în înfășurare un curent cu frecvența egală cu diferența frecvențelor tensiunilor celor două surse. Interacțiunii dintre câmpul magnetic învârtitor din întrefier și curentul din înfășurarea rotorului determină un cuplu electromagnetic care, într-o semiperioadă are caracter de cuplu motor accelerând rotorul, crescându-i turația, iar în semiperioada următoare are caracter de cuplu generator determinând frânarea rotorului, adică reducându-i turația. În acest fel mașina va

absorbi de la rețea puterea activă în semiperioada de accelerare și va ceda putere activă în rețea pe timpul semiperioadei de frânare. Energia activă absorbită de mașină în semiperioada de accelerare va fi transformată în energie termică disipată în mașina de încercat, respectiv energie cinetică acumulată în masele în rotație. În semiperioada de frânare energia mecanică acumulată va fi transformată în energie activă cedată rețelei, respectiv în energie termică disipată în mașină. Astfel, apare un schimb de putere activă între rețea și mașina de încercat care oscilează cu o frecvență egală cu diferența dintre frecvențele tensiunii de alimentare ($f_1 - f_2$). Amplitudinea tensiunii la bornele mașinii de încercat și amplitudinea curentului din înfășurarea statorului va oscila cu aceeași frecvență. În acest fel în mașina de încercat se va disipa o putere activă egală cu suma pierderilor mașinii, corespunzătoare serviciului nominal tip, în condițiile în care valorile tensiunii respectiv curentului prin înfășurările mașinii sunt cele nominale.

Experiența obținută în urma aplicării acestei metode la încercarea mașinilor de putere mare permite alegerea convenabilă [23] a raportului dintre frecvențele de alimentare ($f_1 / f_2 = 0,8 \div 0,9$) și a raportului dintre tensiunile de alimentare ($U_2 / U_1 \approx 0,2$).

Un raport al tensiunilor de 0,2 înseamnă că pentru sursa suplimentară de tensiune este suficientă o putere de 20% din puterea motorului de încercat. Sursa principală de alimentare necesită o putere aparentă nominală cel puțin egală cu a motorului de încercat.

Dintre avantajele aplicării metodei mixajului de frecvențe la încercarea de încălzire a mașinilor de inducție se pot aminti:

- eliminarea necesității cuplării mecanice a unei mașini de putere comparabilă cu a mașinii de încercat și reducerea consumurilor de manoperă la montaj;
- consum redus de energie electrică, corespunzătoare pierderilor în mașină.

Prin analiza regimului de funcționare la alimentarea prin mixaj de frecvențe a motorului de inducție pot fi evidențiate următoarele caracteristici [23]:

- încălzirea înfășurărilor obținută prin metoda mixajului de frecvențe diferă cu câteva procente față de încălzirea obținută prin încercarea în sarcină nominală tip. Supratemperatura obținută astfel are valoare superioară celei obținute prin metodele clasice;
- pierderile ce se stabilesc în mașină în regimul de alimentare cu mixaj de frecvență diferă calitativ și cantitativ de cele corespunzătoare serviciului nominal tip;
- frecvența joasă a oscilațiilor mărimilor electrice ale mașinii determină oscilații de amplitudine considerabilă a echipamentelor mobile ale aparatelor clasice utilizate, ceea ce face dificilă măsurarea valorilor acestor mărimi; Efectuarea măsurărilor este simplificată în cazul utilizării unui Sistem de Achiziție și prelucrare a Datelor;
- variația vitezei unghiulare și a amplitudinii câmpului magnetic din mașină conduc la apariția de pierderi suplimentare în circuitul feromagnetic și în circuitele electrice ale acesteia;
- oscilația de putere activă impusă de metodă poate avea o influență negativă asupra funcționării rețelei electrice și a mașinilor din platforma de încercare.

În figura 5.10 se prezintă schema utilizată la încercarea de încălzire prin metoda mixajului de frecvențe, pe standul de probe al UCM Reșița, al unui motor de inducție având următoarele date nominale: puterea nominală $P_n = 5250$ kW; tensiunea nominală $U_n = 10000$ V; curentul nominal $I_n = 346$ A; turația nominală de sincronism $n_1 = 1500$ rot/min; frecvența nominală $f_n = 50$ Hz.

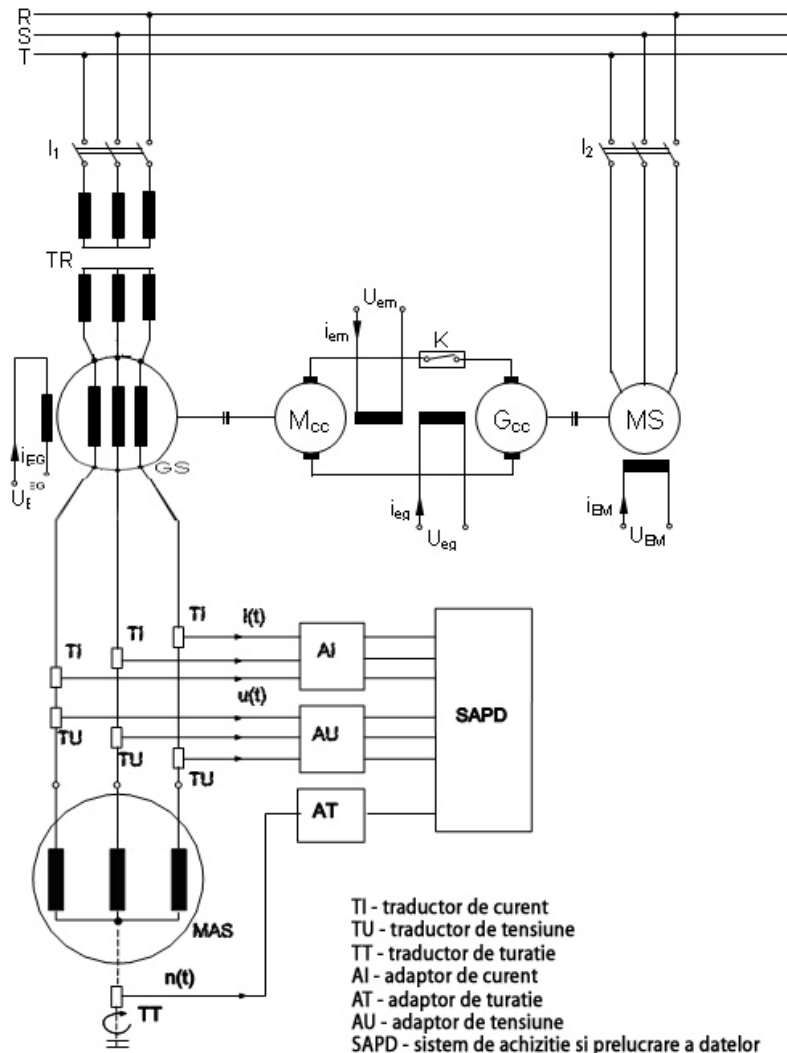


Figura 5.10. Schema de încercare în sarcină artificială prin alimentarea cu amestec de frecvență pentru motorul de inducție de 5250 kVA, 10 kV.

În acest caz, s-a utilizat ca sursă principală de alimentare rețeaua națională, conectarea motorului realizându-se prin intermediul unui transformator trifazat TR. Ca sursă auxiliară s-a utilizat un generator sincron de putere nominală 6000 kVA, la tensiunea nominală de 3600 V, 50 Hz / 600 rpm. Motorul de curent continuu de antrenare are puterea nominală de 2700 kW la 600 rpm.

Conectarea la rețea a motorului de încercat se realizează prin intermediul întreruptorului I_1 . Pornirea motorului de inducție de încercat MAS se realizează în condițiile în care generatorul sincron GS este neexcitat. După pornire, motorul MAS funcționează în gol atât timp cât curentul de excitație al generatorului sincron rămâne nul. Se reglează turația motorului de curent continuu M_{cc} corespunzător frecvenței f_2 ce este necesar să o furnizeze sursa auxiliară GS. Fiind stabilă

frecvența f_2 în raport cu frecvența f_1 a rețelei, pentru încărcarea în sarcină a motorului MA se crește curentul de excitație al generatorului GS până când curentul absorbit de motor atinge valoarea curentului nominal în sarcină.

Răcirea motorului încercat este realizată în circuit închis, aerul cald fiind răcit prin intermediul unui răcitor cu apă.

Corespunzător acestui regim de alimentare cu mixaj de frecvență se măsoară încălzirile în punctele prevăzute prin construcția motorului: pentru: bobinaj stator, miez magnetic statoric, aerul de răcire și apa de răcire.

Măsurătorile au fost efectuate cu Sistemului de achiziție și Prelucrare a Datelor.

Se prezintă în figura 5.11 variația în timp a tensiunii și a curentului la bornele motorului de 5250 kW, în timpul probei de încălzire în sarcină artificială prin amestec de frecvențe. În figura 5.12. este prezentat un detaliu al acestei variații. Cu linie plină este trasată variația tensiunii de alimentare (1), iar cu linie punctată este trasată variația curentului (2).

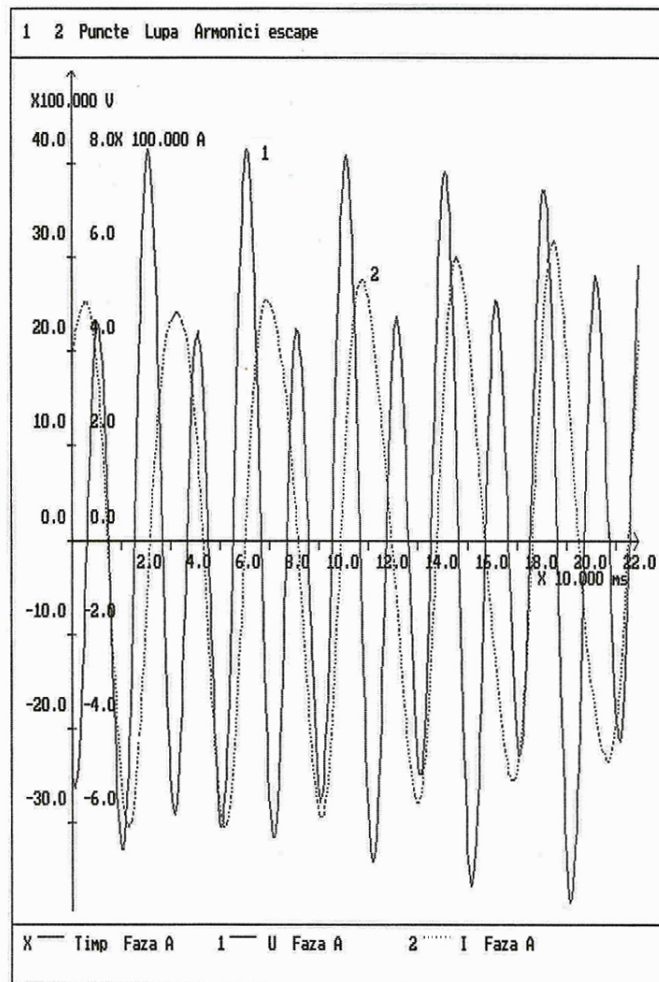


Figura 5.11. Variația în timp a tensiunii și curentului pentru un motor de 5250 kVA, 10 kV, în proba cu mixaj de frecvență.

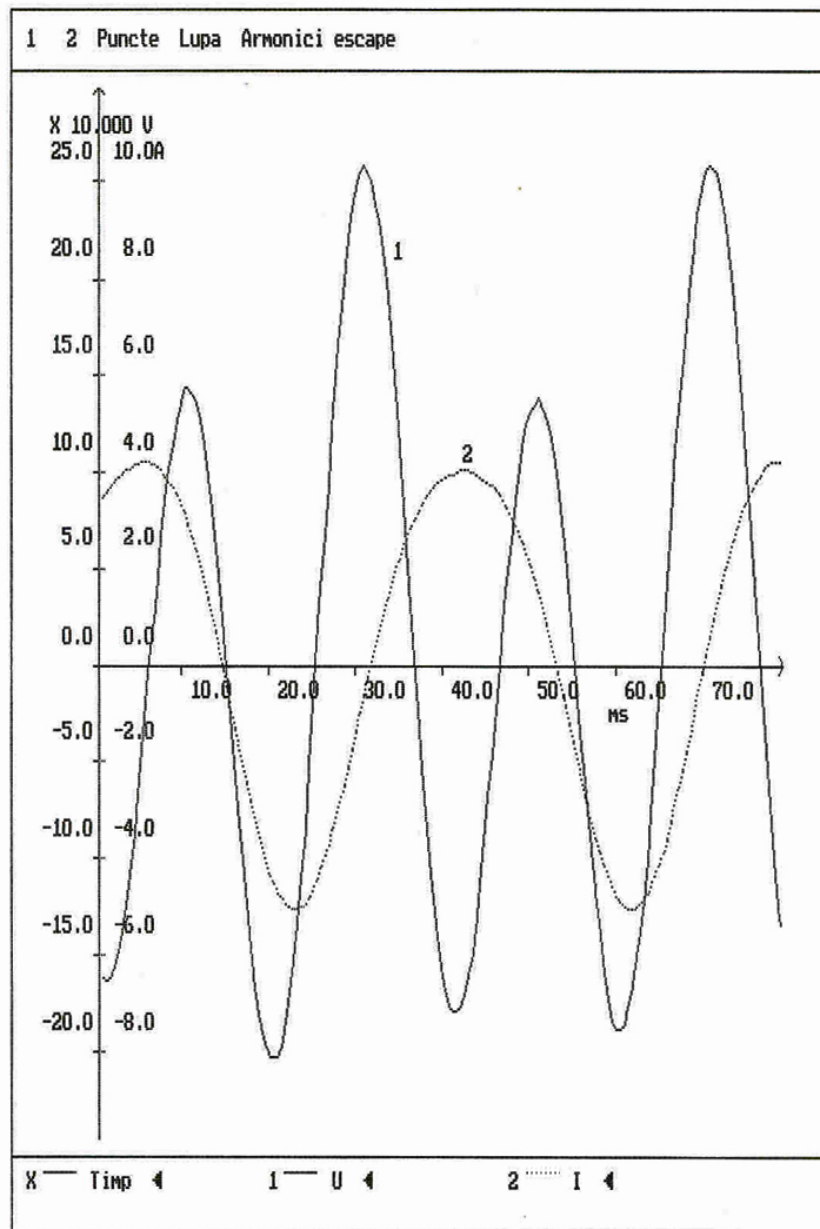


Figura 5.12. Variația în timp a tensiunii și curentului (detaliu) pentru un motor de 5250 kVA, 10 kV, în proba cu mixaj de frecvență.

Pentru motorul încercat, în urma probei de încălzire în sarcină prin metoda mixajului de frecvență s-a constatat că supratemperaturile obținute se încadrează în limitele admise pentru clasa de izolație a motorului.

5.4. Concluzii

În acest capitol s-au prezentat câteva exemple de studiu experimental al mașinii de inducție, prin măsurarea valorilor momentane ale mărimilor de intrare, utilizând Sisteme de Achiziție și Prelucrare a Datelor. Pe baza acestor mărimi, prin algoritmi specifici, se calculează parametrii mașinilor, sau se poate studia comportarea mașinii.

În urma studiului privind influența frecvenței de alimentare asupra parametrilor motorului de inducție autorul propune o schemă electrică echivalentă generalizată corespunzătoare regimului de scurtcircuit, care ține seama și de ramura de magnetizare, pentru cazul în care parametrii mașinii se calculează din experimente efectuate la frecvență redusă.

Se constată facilitățile obținute prin utilizarea unor astfel de sisteme de achiziție și prelucrare a datelor, în special în cazul în care mașina electrică este alimentată cu tensiuni de frecvență variabilă pe domenii mai largi. Spre exemplu, proba de încercare în sarcină prin metoda amestecului de frecvență este dificil de realizat utilizând aparate de măsură clasice.

Capitolul 6

Concluzii generale

Pornind de la premiza conform căreia cunoașterea parametrilor și a comportării mașinii de inducție este o preocupare continuă atât pentru producătorii cât și pentru utilizatorii ei, lucrarea de față și-a propus să identifice modul în care utilizarea Sistemelor de Achiziție și Prelucrare a Datelor poate rezolva această problemă, în condițiile în care aceste sisteme de măsurare achiziționează valorile momentane ale mărimilor. Lucrarea a fost orientată spre mașina de inducție deoarece este cea mai utilizată mașină ca motor, iar aplicațiile sunt în expansiune datorită asocierii ei cu electronica de putere.

Determinarea valorilor momentane ale mărimilor ce caracterizează funcționarea mașinii de inducție se poate face cu aparate de măsură clasice (analogice sau numerice), sau utilizând Sisteme de Achiziție și Prelucrare a Datelor.

Sistemul de Achiziție și Prelucrare a Datelor este de tip modular, hardware și software, putând fi construit în jurul unui ordinator de tip PC, sau de uz industrial. Acest sistem permite încercarea mașinilor electrice aplicând metode moderne de testare. Sistemul utilizează programe de achiziții de date pentru măsurarea mărimilor atât din procese tranzitorii cât și din regimuri permanente în care evoluția în timp a mărimilor este periodică, în particular sinusoidală. De asemenea, sunt folosite programe de prelucrare a mărimilor măsurate de sistem, prelucrare care poate fi făcută în timpul procesului de măsurare, on-line, sau după terminarea procesului de măsurare, off-line, pe baza datelor salvate de către sistem sub formă numerică.

În Laboratorul de Testare a Mașinilor Electrice (D109) al Facultății de Electrotehnică și Electroenergetică din Timișoara, s-au realizat două Sisteme de Achiziție și Prelucrare a Datelor dedicate testării mașinilor electrice, la care autorul și-a adus contribuția.

Sistemul SAPDME1 s-a realizat pe structura unui calculator de tip PC la care s-a adăugat un Modul de Achiziții de Date și Blocul de Traductoare și Adaptoare de Semnale Analogice, pe care s-au implementat programe dedicate de achiziție și prelucrare a datelor, de tip modular, scrise în limbajul Turbo Pascal. Întregul sistem (hard și soft) a fost proiectat și realizat de colectivul de cercetare din care autorul face parte în cadrul Laboratorului D109. Programele de prelucrare elaborate permit sintetizarea rezultatelor testelor sub formă tabelară sau grafică, corespunzător solicitărilor.

Pe baza experienței acumulate la realizarea primului sistem, a fost realizată varianta mai nouă – sistemul SAPDME2. Acesta a fost integrat pe structura unui ordinator de tip PC, utilizând Modulul de Achiziție de Date PC-MIO 16 E-1 de la National Instrument și programe dedicate de achiziție și prelucrare scrise în G - Programming pe platforma LabVIEW. Pentru conectarea la mașina electrică s-a folosit tot un Bloc de Traductoare și Adaptoare de Semnale Analogice. Și acest sistem permite obținerea rezultatelor sub formă tabelară și a dependențelor între mărimi sub formă tabelară și grafică.

Cele două sisteme de achiziție și prelucrare a datelor, SAPDME1 și SAPDME2, au fost testate și în final verificate metrologic. Pentru măsurarea mărimilor de tip tensiune și curent eroarea este sub 0,2%, iar pentru măsurarea puterilor electrice eroarea este sub 0,5%.

Utilizarea Sistemelor de Achiziție și Prelucrare a Datelor în domeniul mașinilor electrice are un impact favorabil în următoarele direcții principale:

- permite folosirea unor metode de testare cunoscute, dar care nu au putut fi aplicate în mod curent și eficient în practică datorită numărului mare de date necesar a fi achiziționate (măsurate) la intervale relativ mici de timp, precum și restricțiilor legate de precizie;
- face posibilă dezvoltarea unor noi metode de testare, în special de regim tranzitoriu;
- asigură perfecționarea modelelor matematice și a schemelor echivalente, mai ales în cazul parametrilor variabili cu frecvența, sau care depind de saturație;
- dă posibilitatea introducerii unor corecții în calculele de proiectare prin efectuarea unor teste de finețe asupra prototipului la nivel industrial;
- permite dezvoltarea unor sisteme de monitorizare a mașinilor electrice datorită achiziției și prelucrării în timp real a datelor.

Toate rezultatele experimentale prezentate în teză au fost obținute cu ajutorul celor două Sisteme de Achiziție și Prelucrare a Datelor aflate în dotarea Laboratorului D109 de Testare a Mașinilor Electrice, în urma unor contracte de cercetare desfășurate în laborator, sau în mediul industrial, la care autorul a colaborat.

Se precizează că aceste Sisteme de Achiziție și Prelucrare a Datelor au fost utilizate până în prezent inclusiv în scopul testării unor mașini electrice în cadrul unor teze de doctorat elaborate la Facultatea de Electrotehnică și Electroenergetică din Timișoara.

După părerea autorului, principalele contribuții ale lucrării sunt următoarele:

- elaborarea unui studiu bibliografic privind metode de identificare a parametrilor și de determinare a caracteristicilor mecanice pentru motorul de inducție;
- conceperea, proiectarea și realizarea Blocului de Traductoare și Adaptoare de Semnale Analogice (BTASA) pentru Sistemele de Achiziție și Prelucrare a Datelor SAPDME1 și SAPDME2;
- contribuții la realizarea modulului de protecție pe intrare a Modulului de Achiziție de Date (MAD) al SPDME1 și la realizarea surselor separate de alimentare ale MAD pentru separarea galvanică a intrării lui față de masa calculatorului;
- contribuții la realizarea modulelor software pentru programul GENERAL de achiziție și de prelucrare a datelor ce rulează pe SAPDME1;
- proiectarea sistemului și integrarea modulelor produse de firma National Instrument pentru realizarea SAPDME2 pe platforma LabVIEW;
- realizarea de programe dedicate de achiziție și prelucrare a datelor pentru încercarea mașinilor electrice sub mediul LabVIEW, pentru SAPDME2;
- conceperea procedurilor și schemelor de măsurare și realizarea testelor pentru verificarea metrologică a celor două Sisteme de Achiziție și Prelucrare a Datelor SAPDME1 și SAMDME2;
- realizarea unui stand experimental cu motor de inducție, traductor de moment de rotație, traductor de turație și generator de curent continuu (frână) pentru ridicarea caracteristicii mecanice din probe de regim staționar, prin măsurare directă a momentului de rotație cu traductor și din probe de pornire cu turație lent variabilă;
- realizarea testelor pe mașini de inducție și mașini sincrone și prelucrarea și interpretarea rezultatelor utilizând sistemele SAPDME1 și SAPDME2, atât în laborator cât și în mediul industrial;
- determinarea caracteristicii mecanice la motoare de inducție de putere medie și mare din probe de regim tranzitoriu (în teză se dau exemple pentru motoarele de 130 kW și de 5250 kW);
- determinarea cuplului electromagnetic la motoare de inducție cu ajutorul echipamentului dedicat LEM-Norma D6000, prin măsurarea mărimilor de intrare;

- realizarea unui studiu privind influența saturației mediului feromagnetic asupra reactanțelor de dispersie ale motorului de inducție;
- realizarea unui studiu privind influența frecvenței tensiunii de alimentare asupra parametrilor motorului de inducție;
- propunerea autorului privind corectarea schemei echivalente simplificate, corespunzătoare regimului de scurtcircuit al motorului de inducție;
- colaborare la conceperea schemelor de alimentare, la realizarea montajelor experimentale și la efectuarea probelor de încălzire în sarcină fictivă (amestec de frecvențe) utilizând SAPDME1 la motorul de 5250 kW;
- colaborare la conceperea procedurilor, la pregătirea montajelor experimentale și la efectuarea probelor, cu utilizarea sistemelor SAPDME1 și SAPDME2, pentru teste pe mașini mici în laborator și în mediul industrial (motoare de inducție până la 5250 kW, motoare sincrone pornite în asincron până la 13880 kVA).

Bibliografie

1. Arie A., Neguș C., Golovanov C., Golovanov N., *Poluarea cu armonici a sistemelor electroenergetice funcționând în regim permanent simetric*, Editura Academiei Române, București, 1994. ISBN 973-27-0378-4.
2. Bachir S., Champenois G., Tnani S., „Stator faults diagnosis in induction machines under fixed speed”, *ELECTROMOTION 10 (2003)*, pp. 679-684.
3. Boldea I., *Parametrii mașinilor electrice*, Editura Academiei Române, București, 1991.
4. Biriescu M., Groza V., Liuba Ghe., Mârzoacă I., **Moț M.**, „Measurement tasks of a data acquisition and processing system for electrical machines testing” *Proceedings 6 Kongressmesse für industrielle Messtechnik*, 7-9 September 1992, Rhein-Main-Hallen, Wiesbaden, pp 502-505.
5. Biriescu M., *Elemente de testare a mașinilor electrice. Lucrări de laborator*, Centrul de Multiplicare al Universității Tehnice Timișoara, 1994.
6. Biriescu M., Groza V., Liuba Ghe., Mârzoacă I., **Moț M.**, „Determination of torque characteristic of induction machine using a data acquisition and processing system”, *9. Kongressmesse für industrielle Messtechnik*, 5-7 September 1995, Rhein-Main-Hallen, Wiesbaden, pp.359-363.
7. Biriescu M. *Mașini electrice rotative. Parametri, caracteristici, încercări*, Editura de Vest, Timișoara, 1997.
8. Biriescu M., „Determinarea curbei cuplului la motoare de inducție trifazate utilizând un sistem de achiziție și prelucrare a datelor”, *Electrotehnica, Electronica, Automatica*, vol. 46, nr. 7-8 iulie-august 1998, pag. 22-27.
9. Biriescu M., Groza V., Crețu V., **Moț M.**, Madescu Ghe., „Testing of electrical machines using a data acquisition and processing system”, *Proceedings of Workshop on Electrical Machines Parameters*, Technical University of Cluj-Napoca 26 Mai 2001, pp. 31-34.
10. Biriescu M., Șorândaru C., Liuba Gh, **Moț M.**, Madescu Gh, „Determination of the asynchronous torque characteristic of the reversible synchronous hydrogenerator”, *Proceedings of 16th International Conference on Electrical Machines – ICEM'2004* (on CD), Cracow, Poland, ISBN 83-921428-0-2, paper 301, 4 pag
11. Biriescu M, G. Liuba Gh, **Moț M.**, Madescu Gh, Șorândaru C, „Asupra încercărilor de omologare a motoarelor asincrone de putere mare”, *Proceedings of the 6-th International Power System Conference*, Timișoara, 2005, ISSN 1582-7194 pag. 59-64
12. Biriescu M., Groza V., Crețu V., Liuba G., Toader D., **Moț M.**, Madescu G., Musuroi S., Șorândaru C., „Aspecte privind testarea mașinilor electrice în electroenergetică”/„Some aspects concerning testing of electrical machines in power engineering” *Proceedings of WEC Regional Energy Forum – FOREN 2006*, Neptun, 11-15 iunie 2006, 7 pag. pe CD, Editura AGIR, ISBN 973-720-032-2.
13. Biriescu M, Groza V., Crețu V., Proștean O., Madescu G., **Moț M.**: *Computer Aided Testing of Electrical Machines*, EUROCON 2007, The International Conference on „Computer as a Tool”, IEEE Region 8, Warsaw, September 9-12, pp.1910-1915, IEEE Catalog Number: 07EX1617C, ISBN: 1-4244-0813-X, Library of Congress: 2006937182;
14. Bolognani S., Zigliotto M. „Essentials of IM Parameters Measurement for FOC Drives Tuning”
15. Bounekla M., Zaim M.E., Rezzoug A., Ait-Ahmed M., „Application of Rosenbrock algorithm to motor parameters identification using transient stator current measurements”, *Conference Publication No. 475, IEE 2000*, Power Electronics

- amd Variable Speed Drives, 18-19 Septembrie 2000
16. Capolino G.A., Cirrincione G., Cirrincione M., Henao H., Grisel R., „Digital Signal Processing for Electrical Machines”, *ACEMP 2001*, Kusadasi, pp. 211-219.
 17. Câmpeanu A., Enache S., „O nouă metodă de determinare a parametrilor mașinii de inducție” *Volumul Primei Conferințe Internaționale de Sisteme Electromecanice*” SIELMEN, Chișinău 16-18 oct. 1997, pag. 241-244.
 18. Câmpeanu A., *Introducerea în dinamica mașinilor electrice de curent alternativ*, Editura Academiei Române, București, 1998.
 19. Cioc I., Bichir N., Cristea N., *Mașini electrice – îndrumar de proiectare*, vol II, Ed. Scrisul Românesc, Craiova 1981.
 20. Cruz S.M.A., Marques Cardoso A.J., „Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors, by extended Park’s vector approach” *Proceedings of ICEM 2002*, Istanbul, pag.1844-1848.
 21. Dordea T., *Mașini electrice. vol.1 – Teorie*, Editura ASAB București, 2002.
 22. Dordea T., Biriescu M., *Proiectarea și construcția mașinilor electrice*, Lito U.T. Timișoara, 1992.
 23. Dordea T., Biriescu M., Liuba G., Madescu G, **Moț M.**, *Mașini electrice. Parte Complementară*. Editura Orizonturi Universitare, Timișoara 2002, ISBN 973-8391-64-4.
 24. Dordea T., Biriescu M., Madescu G. **Moț M.**, Liuba G. „Performances analysis of an induction motor prototype for direct drive traction system of tramcar”, *Proceedings of CNAE 2008*,
 25. Drăgănescu O., *Încercările mașinilor electrice rotative*, Editura Tehnică, București, 1987.
 26. Dymond J.H., Ong R., McKenna P.G., “Locked-Rotor and Acceleration Testing of Large Induction Machine-Methods, Problems and interpretation of the results” *IEEE Trans. on IA*, vol. 36, July/August 2000, pp. 958-964.
 27. Dymond J.H., Mistry B., Ong R., “Acceleration tests... to Determine Salient Pole Synchronous Motor Inrush Current and Torques” *IEEE Industry Application Magazine*, July 2002, pp. 44-50.
 28. Ematsu M.Y., dos Santos P.S., Habitzreuter A., „A Method to Perform Speed Torque Curves on Induction Motors Using the Acceleration Method”, *PS 9-6*
 29. Eigenmann M., Moser C.N., Schwery A., Tu Xuan M., „A new parameter identification method for induction machines”, pp. 2077-2082.
 30. Faiz J., Sharifian M.B.B., Feyzi M.R., Shaarbafi K., „A Complete Lumped Equivalent Circuit of Three-Phase Squirrel-Cage Induction Machine Using Three-Dimensional Finite-Elements Technique”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 17, no.3, September 2002.
 31. Galan N., Vives-Fos R., „The determination of the Parameters of Equivalent Scheme with rotor resistive circuit of asynchronous motor, *Proceedings of ICEM 2002*, Bruges paper 297.
 32. Gastli A., „Identification of induction motor equivalent circuit parameters using the single-phase test”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 14, no.1, March 1999.
 33. Gastli A., Matsui N., „Stator flux V/f PWM inverter with identification of IM parameters”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 39, No. 4, August 1992.
 34. Ghiță C., Diaconu I.D., Chirilă A.I., Iliu D.I., „A least-squares approach for identification of the induction motor parameters”, *Proceedings of 5th international Conference on Electromechanical and Power Systems*, Chișinău, Rep. Moldova, october 6-8, 2005, pp. 811-814.

35. Gratham C, „Determination of induction motor parameter variation from a variable frequency standstill tests”, *Electrical Machine and Power System*, 10, 1985.
36. Groza V., Crețu V., Biriescu M., Mârzoacă I., **Moț M.**, „A data Aquisition and processing system for electrical machines testing”, *Proceedings 5 Kongressmesse fur industrielle Messtechnik*, 17-19 September 1991, Rhein-Main-Hallen, Wiesbaden.
37. Groza V., Biriescu M., Crețu V., Mârzoacă I., **Moț M.**, „PC based data aquisition and processing system for power electric applications”, *Proceedings 6 Kongressmesse fur industrielle Messtechnik*, 7-9 September 1992, Rhein-Main-Hallen, Wiesbaden, pp 496-501.
38. Groza V., Crețu V., Biriescu M., Mârzoacă I., **Moț M.**, „Monitoring and testing environment for high power electrical machines” *CONTI'94, International Conference on Technical Informatics. Proceedings vol.5*, p107-112.
39. Groza V., Biriescu M., Crețu V., Șora Ioana, **Moț M.** „Testing of electrical machines in periodical and quasi-periodical conditions, using a data acquisition and processing system.” *Proceedings of IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, St. Paul Minesota, USA, 1998., pp. 766-770.
40. Groza V., Biriescu M., Crețu V., Liuba G., **Moț M.**, Madescu G, „Testing of electrical machines with a dedicated system for data aquisition and proccesing”, *International Conference on Electrical Machines- ICEM 2006*, Chania, Crete Island, Greece, (Proceedings on CD), 4 pag,
41. Hribernik B., Gorican V., „A programmable dynamometer system for induction motor measurements”, *Electromotion 2* (1995), pp. 125-128.
42. Ignea A., *Măsurarea electrică a mărimilor neelectrice*, Editura de Vest, Timișoara 1996, ISBN 973-36-0270-1.
43. John S. Hsu, „Induction-Motor Field Efficiency Evaluation Using Instantaneous Phasor Method” *IEEE IAC* vol 1, 1998
44. Joksimovic G.M., Penman J., Durovic M., „The New method for Determination of Induction Machine Rotor Inertia”, *IEEE Power Engineering Review*, March 1999, pp. 99-61.
45. Jula N., Cepișcă C., *Interfațarea traductoarelor. Aplicații și perspective*, Editura ICPE, București 2000, ISBN 973-8067-10-3
46. Jurca T., Stoiciu D., *Instrumentație de măsurare. Structuri și circuite*, Editura de Vest, Timișoara 1996, ISBN 973-36-0268-X.
47. Khojet El Khil S., Ilhem S. B., „Investigation of fault detection in induction motor drives”, *ELECTROMOTION 10* (2003), pp. 685-690.
48. Kron A.W., *Messungen an Asynchron motoren bei bifrequenterSpeisung*, ETZ-A, 94, 1973.
49. Lethla T., Joller J., Lethla M, Laugis J., „Parameter Identifications and Comparision of an induction motor models”, *Power Electronics and Variable Speed Drives, 18-19 September 2000, Conference Publication No. 475*, IEE 2000.
50. Liuba G., Biriescu M., „Încercarea la încălzire a mașinilor asincrone de mare putere, pe un stand de probă industrial, prin metoda celor două frecvențe”, *Lucrările Conferinței Naționale de Electrotehnică și Energetică*, Craiova, 1984.
51. Liuba G., Biriescu M., Groza V. Crețu V., Mârzoacă I., **Moț M.**, Șora Ioana, „Asupra încercării mașinilor electrice folosind un sistem de achiziție și prelucrare a datelor” *Analele Universității „Eftimie Murgu” Reșița*, Sesiune jubiliară, Fascicola III, A. Electrotehnică și sisteme automate, 25-26 octombrie 1996 Reșița, pag. 5-12.
52. Liuba G., Biriescu M., Madescu G., **Moț M.**, „Asynchronous performances of large synchronous motors from direct current decay at standstill tests”,

- Proceedings of International Conference OPTIM-2000*, Braşov, 2000, vol.1, pag. 449-452.
53. Madescu Gh, Irimia D., **Moş M.**, „Le calcul de la reactance de magnetisation de la machine a induction”, *Buletinul Ştiinţific al Universităţii ‘Politehnica’ Timişoara, Seria Electrotehnică, Electronică şi Comunicaţii*, Tom 44(58), Fascicola 1, 1999, pag. 105-112.
 54. Madescu Gh, Biriescu M., **Moş M.**, Irimia D., „Effect of magnetic saturation on the starting current of induction motor”, *ELECTROMOTION 2001 Proceedings*, 4th. International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems, June 19-20, Bologna 2001, Italia, ISBN 88-900615-0-2, pp. 37-40.
 55. Madescu Gh., Biriescu M., **Moş M.**, Liuba Gh., „Non-Linear analysis of single-phase induction machine using the anisotropic field model”, *Conference Record of 15th International Conference on Electrical Machines, ICEM 2002*, 26 - 28 August 2002, Bruges Belgium, paper 134.
 56. Madescu Gh., **Moş M.**, Biriescu M., Ocolişan L., „Performances Optimisation of low -speed Generators for Wind Turbines”, *Scientific Bulletin of the „Politehnica” University of Timişoara*, Tom 47(61), 2002, fascicola 1-2, pp. 29-32, ISSN 1582-7194.
 57. Madescu Gh., Biriescu M., Torac I., **Moş M.**, Ocolişan L., „Direct drive induction generators for low speed wind turbines”, *Proceedings of International Conference SIELMEN 2005*, Chişinău, Republica Moldova, pag 863-866
 58. Madescu Gh., Biriescu M., **Moş M.**, Muller V.: *Analysis of the unsymmetrical induction motor supplied by unbalanced voltage system*, Rev. Ingenierias, Abril-Junio 2007, vol.X, nr.35, pp.48-56, Nuevo Leon, Mexico, ISSN: 1405-0676
 59. Madescu Gh., Biriescu M., Greconici M., Muşuroi S., **Moş M.**: *Field Analysis of Induction Machine Using Two Different Models*, Proceedings of the International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics & Electromotion Joint Conference, Bodrum Turkey, 10-12 September, 2007, pp.616-620, ISBN: 978-975-93410-2-2
 60. Madescu G., Trica A., Budisan N., Prostean O., Biriescu M., **Moş M.**: *Performance optimization of low-speed induction generators for direct drive wind turbines*, International Electrical Power Conference 2007, „Renewable and Alternative Energy Resources”, IEEE Canada, October 25-26, 2007, Montréal, Québec, Canada, on CD;
 61. Madescu G., **Moş M.**: *Generatoare de inducţie pentru instalaţii eoliene cu acţionare directă* . Zilele Academice Timişene, Lucrările Simpozionului „Cercetări în domeniul energiilor neconvenţionale”, Editura Mirton, Timişoara, 2007, pag.33-38,
 62. Metwally I.A., „Simulation of the impulse response of electrical machines”, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 14, No.4, dec. 1999, pp. 861-867.
 63. Micea M.V., *Sisteme de achiziţie numerică a datelor. Îndrumător de laborator*, Universitatea „Politehnica” din Timişoara, Facultatea de Automatică şi Calculatoare, Departamentul de Calculatoare, 2000.
 64. **Moş M.**, Madescu G., Biriescu M., Liuba G. „Determinarea influenţei frecvenţei asupra parametrilor echivalenţi rotorici ai maşinii de inducţie”, *Revista Electrotehnică, Electronica, Automatica (EEA)*, Editura ICPE, ISSN 0376-4745, vol. 49 nr.1-2, ian.-feb. 2001, pag. 10-14.
 65. **Moş M.**, Liuba G., Madescu G., Wonerth A., „Metode de măsurare a cuplului la maşini asincrone”, Zilele Academice Timişene 26-27 Mai 2005, Simpozionul de Electrotehnică şi Energetică, ISBN:973-625-235-3, 7 pag., pe CD.
 66. **Moş M.** „Determinarea cuplului electromagnetic al motorului de inducţie cu

- ajutorul unui echipament dedicat" Lucrările Simpozionului de Electrotehnică și Energetică Zilele Academice Timișene Mai 2007, pe CD, Editura „Politehnica”, ISBN 978-973-625-436-9.
67. Munteanu R. „Un argument pentru Revista de Instrumentație Virtuală” *Revista de Instrumentație Virtuală*, Vol. 1, 1998, Editura MEDIAMIRA, Cluj-Napoca.
 68. Nandi S., Toliyat H.A., Li X., „Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors – A Review”, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 20, No. 4, december 2004.
 69. Negrea M., Rodriguez P.J. „Magnetic Flux Monitoring for Fault Detection in Electrical Machines”, *Proceedings of International Conferences OPTIM 2004*, pp. 33-38.
 70. Nejiari H., Berbouzid M.E.H., „Monitoring and diagnosis of Induction Motors Electrical Faults Using a Current Park’s Vector Pattern Learning Approach” IEEE 1999
 71. Nicolaide A., *Mașini electrice. Teorie. Proiectare*, Editura Scrisul Românesc Craiova, 1975.
 72. Preda M., Cristea P., *Bazele electrotehnicii*, Editura Didactică și Pedagogică București 1980.
 73. Preda M., Manea F., Cristea P., Leon M. Spinei F., *Electrotehnică. Probleme*, Editura Didactică și Pedagogică București 1966.
 74. Proca A.B., Keyhani A., „Induction motor parameter identification from operating data for electric drive applications”, 1999 IEEE, 8.C.2. pp. 1-6
 75. Razik H., Abed A., Didier G., Weinachter F., Rezzoug A., „Analysis of the current spectral of an induction motor for diagnostic purposes”,
 76. Ramminger, P., Andresen, E.Ch., „Prediction of the Performances Characteristic of small Induction Motors from Measurements without Load Machine”
 77. Renier B., Hameyer, Belmans R., „Comparison of standards for determining efficiency of three phase induction motors”, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol 14, No. 3, September 1999, p.512-517.
 78. Stuart R.D., *Introducere în analiza Fourier cu aplicații în tehnică*, traducere din limba engleză, după ediția a doua (1966), Editura Tehnică București, 1971.
 79. Șora C. *Bazele electrotehnicii*, Editura didactică și pedagogică, București, 1992
 80. Șorândaru C., *Instrumentație Virtuală în ingineria electrică*, Editura Orizonturi Universitare, Timișoara 2003, ISBN 973-8391-52-0
 81. Șorândaru C., **Moț M.**, „LabVIEW Data Acquisition software for Electrical Machines Laboratory”, *Proceedings of International Symposium Remote Engineering Virtual Instrumentation*, Kassel University Press, 2004, ISBN 3-89958-090-7, 8 pag.
 82. Thomson W.T., Fenger M., „Case Histories of Current Signature Analysis to Detect Faults in Induction Motor Drives”, *IEEE- IEMDC 2003*, pp. 1459-1465.
 83. Thomson W.T. „A review of on-line condition monitoring techniques for three-phase squirrel-cage induction motors – past, present and future” *SDEMPED 1999*, pp. 3-18.
 84. Toader D., Buta A., Blaj C., Molnar M., Băloi A., „New aspects about power definition in electric circuits”, *Proceedings of 13th International Symposium on Power Electronics Ee2005*, Novi Sad, Serbia&Montenegro, November 2-4, 2005, Paper No. T4-1.1, pp.1-5
 85. Vas P., *Parameter Estimation Condition Monitoring and Diagnosis of Electrical Machines*, Clarendon Press, Oxford 1993
 86. Viorel I.A., Ciorba R.C. *Mașini electrice în sisteme de acționare* Editura U.T. PRES Cluj Napoca 2002
 87. Vlaicu C., *Sisteme de măsurare informatizate*, Editura ICPE, București 2000, ISBN 973-8067-22-7

88. Wiedenbrug E.J., Wallace A.K. „In-service testing of Three Phase Induction Machines”, *Proceedings of IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drive –SDEMPED’-99*, 1-3 sept. 1999, Gijon-Spain, pp. 219-223.
89. Xian Z.L., Jiang J.G., He L.H., Liu D.H., Cao H.X., „Measurement of Large AC Electrical Machine Stator Windings Parameters at High Frequency”, *IEEE 2003*, pp. 1331-1336.
90. Ytterberg A., *Ny method for fullbelassning av elektriska maskiner utan drivmotor eler avlastringsmaskin*, s.k.skakprov, *Teknisk Tidskrift*, 1921, S42-44.
91. Zdravko Andonov B.S., Slobodan A., Mirčevski, „Catalog data parameter estimation of induction motor electrical drive”, *Proceedings of Intelligent Motion*, May 1996, pag. 593-602.
92. *** *G Programming. Reference Manual Manual* National Instruments ,1998 Edition
93. *** *LabVIEW. Data Acquisition. Basics Manual* National Instruments, 1998 Edition
94. *** *Data Acquisition. PCI – E Series. User Manual. Multifuncțion I/O Board for PCI Bus Computers.* National Instruments, 1997 Edition.
95. *** *Computer-Based Instruments. NI5112 User Manual.* National Instruments, 2001 Edition
96. *** Norma D6000. Wide Band Power Analyser. Digital Torque Measurement, Option 61T1.
97. *** Documentație Traductoare LEM
98. *** *IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*, IEEE Standard 112-1996.
99. *** Manual de utilizare al Sistemului de Achiziție și Prelucrare a Datelor din Lab. D109 a Facultății de Electrotehnică și Electroenergetică din Timișoara.

Anexa 1

Tabel cu mărimi calculate din blocurile de achiziție
din proba de pornirea în asincron a Hidrogeneratorului sincron reversibil de 13880
kW, în gol.

Nr. crt	Timpul [s]	Turația [rpm]	Tensiunea [V]	Curentul				Frecvența [Hz]	Puterea activă				Puterea reactivă [VAR]	Puterea aparentă [VA]	cos fi
				[A]					[W]						
				Media pe cele trei faze	Faza A	Faza B	Faza C		Media pe cele trei faze	Faza A	Faza B	Faza C			
1.	0,06		1.352,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2.	0,5		1.353,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3.	0,99		1.354,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4.	1,37		1.353,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5.	1,7	1,1	864,98	1.115,63	1.078,50	1.084,75	1.092,96	49,96	115.761,2	174.111,8	99.804,9	389.677,9	2.810.129,5	2.837.019,0	0,138
6.	2,09	1,3	863,13	998,75	1.057,20	976,17	1.010,71	49,95	196.085,0	129.741,6	94.109,1	419.945,7	2.582.456,8	2.616.378,8	0,160
7.	2,47	2,0	864,44	1.060,08	999,69	971,27	1.010,34	49,94	161.473,1	68.300,4	185.037,3	414.810,7	2.586.246,0	2.619.300,8	0,159
8.	2,86	2,6	864,36	986,16	994,14	1.053,48	1.011,26	49,92	79.239,7	189.471,9	155.549,1	424.260,8	2.585.397,5	2.619.976,8	0,162
9.	3,3	2,8	864,64	1.052,98	1.010,13	966,28	1.009,79	49,92	171.288,1	72.039,4	173.742,0	417.069,5	2.585.198,3	2.618.625,0	0,160
10.	3,68	3,4	865,57	976,85	1.053,79	991,96	1.007,53	49,93	176.906,7	161.574,8	86.643,1	425.124,7	2.580.303,5	2.615.090,3	0,162
11.	4,01	3,9	863,48	969,63	1.015,52	1.040,08	1.008,41	49,93	116.017,9	191.350,4	120.540,4	427.908,8	2.574.761,0	2.610.076,8	0,164
12.	4,45	4,5	864,38	969,98	1.035,68	1.017,86	1.007,84	49,92	150.152,1	187.769,4	98.750,4	436.671,8	2.575.226,5	2.611.986,8	0,167
13.	4,78	5,1	863,29	998,09	1.053,12	969,90	1.007,04	49,93	199.460,3	132.620,3	103.319,3	435.399,9	2.570.856,3	2.607.465,3	0,167
14.	5,22	5,6	864,72	1.029,60	964,67	1.030,07	1.008,11	49,93	92.450,7	142.037,9	201.578,2	436.066,8	2.576.713,3	2.613.351,3	0,168
15.	5,6	5,9	862,98	984,09	1.053,63	977,09	1.004,94	49,93	195.971,7	150.966,1	96.195,6	443.133,4	2.562.975,3	2.601.001,8	0,170
16.	5,93	6,4	864,97	994,91	990,05	1.049,17	1.011,38	49,94	81.687,3	183.572,9	168.941,9	434.202,1	2.586.348,3	2.622.542,5	0,166
17.	6,32	7,0	868,03	1.037,74	964,92	1.039,74	1.014,13	49,92	85.221,3	130.643,1	196.943,3	412.807,7	2.606.461,0	2.638.948,5	0,157
18.	6,76	7,5	864,91	1.009,49	978,23	1.039,82	1.009,18	49,95	86.319,5	168.751,7	168.272,1	423.343,2	2.582.468,5	2.616.937,8	0,162
19.	7,09	7,9	863,16	974,52	1.005,66	1.045,61	1.008,60	49,93	101.913,7	193.627,6	152.186,2	447.727,5	2.571.027,3	2.609.720,5	0,172
20.	7,53	8,6	864,84	1.043,42	1.006,16	963,24	1.004,27	49,92	190.273,4	84.819,2	179.883,9	454.976,6	2.565.401,8	2.605.434,8	0,175
21.	7,91	9,2	863,37	971,24	1.007,97	1.033,60	1.004,27	49,94	128.561,2	183.373,6	130.487,3	442.422,0	2.561.588,8	2.599.514,3	0,170
22.	8,29	9,7	864,23	1.028,19	970,21	1.037,27	1.011,89	49,95	105.825,3	144.482,1	185.871,9	436.179,3	2.585.216,5	2.621.754,5	0,167
23.	8,68	10,3	868,09	1.050,95	1.001,72	981,84	1.011,50	49,90	151.535,1	98.139,5	183.697,8	433.372,4	2.597.888,3	2.633.787,0	0,165
24.	9,06	11,0	867,82	1.045,56	1.018,12	964,67	1.009,45	49,90	188.278,0	87.807,2	138.871,8	414.957,0	2.594.950,8	2.627.919,3	0,158
25.	9,45	11,5	865,32	1.005,82	987,78	1.050,21	1.014,60	49,95	94.998,7	172.213,7	157.874,2	425.086,6	2.597.749,5	2.632.299,5	0,162
26.	9,83	12,0	864,96	996,09	1.040,96	995,69	1.010,91	49,97	178.326,4	139.156,5	108.465,1	425.948,1	2.588.200,8	2.623.016,3	0,162
27.	10,22	12,7	867,67	975,01	1.030,78	999,38	1.001,72	49,93	117.327,0	186.967,8	111.827,6	416.122,3	2.573.407,0	2.606.833,5	0,159
28.	10,6	13,3	863,27	1.044,87	971,05	1.025,55	1.013,83	49,95	151.671,8	111.424,4	199.859,9	462.956,1	2.583.068,0	2.624.227,3	0,177
29.	10,99	13,9	869,45	977,42	984,53	1.035,96	999,30	49,90	116.014,5	163.132,1	164.466,9	443.613,6	2.566.757,5	2.604.810,5	0,170

30.	11,48	14,7	864,31	977,93	1.034,87	985,06	989,28	49,93	185.927,6	176.573,1	115.256,4	477.757,1	2.546.444,5	2.590.874,8	0,184
31.	11,81	15,3	864,11	1.038,48	1.034,70	970,97	1.014,72	49,97	187.953,7	144.895,7	134.341,4	467.190,7	2.588.675,8	2.630.496,0	0,177
32.	12,19	15,7	869,25	1.021,74	979,69	1.032,85	1.011,43	49,90	116.192,6	150.867,4	173.379,8	440.439,8	2.599.603,8	2.636.650,8	0,167
33.	12,58	16,0	868,26	1.033,80	1.033,35	972,87	1.013,34	49,93	185.101,6	105.635,1	134.251,5	424.988,2	2.605.458,3	2.639.891,5	0,161
34.	12,96	16,6	864,49	980,54	1.029,09	985,99	998,54	49,93	183.649,4	177.115,0	122.548,2	483.312,6	2.544.126,5	2.589.627,5	0,186
35.	13,29	17,2	866,19	1.007,10	994,77	1.023,00	1.008,29	49,97	117.873,6	168.102,8	154.625,3	440.601,6	2.582.267,0	2.619.586,5	0,168
36.	13,68	18,0	865,06	979,98	1.027,42	986,23	997,88	49,92	182.561,3	176.598,8	126.518,4	485.679,5	2.543.722,8	2.589.673,8	0,187
37.	14,06	18,5	869,50	989,39	1.030,89	1.011,82	1.010,70	49,91	154.485,1	158.130,8	138.517,6	451.133,4	2.597.175,0	2.636.065,3	0,171
38.	14,39	19,1	867,33	1.031,43	989,38	1.004,90	1.008,57	49,96	131.076,0	115.425,3	189.534,6	436.035,8	2.587.737,5	2.624.216,5	0,167
39.	14,78	19,2	868,53	991,37	980,26	1.025,46	999,03	49,95	123.305,5	177.903,0	187.920,7	489.129,2	2.549.774,8	2.596.286,3	0,189
40.	15,11	20,0	868,65	1.030,42	1.016,42	994,12	1.010,32	49,97	163.468,4	96.218,5	162.298,5	421.985,4	2.599.121,3	2.633.154,8	0,161
41.	15,49	20,6	867,26	1.019,57	999,15	998,96	1.005,89	49,96	141.506,5	125.163,9	182.703,2	449.373,6	2.578.321,5	2.617.189,0	0,172
42.	15,87	21,1	867,37	1.014,96	1.004,80	985,05	1.004,94	49,97	147.972,4	130.393,9	177.368,5	455.734,8	2.575.082,3	2.615.099,0	0,174
43.	16,31	22,1	868,67	1.026,07	983,66	1.015,35	1.008,36	49,93	130.710,8	129.935,0	188.735,0	449.380,8	2.588.799,0	2.627.512,8	0,171
44.	16,7	22,7	868,20	997,74	1.006,88	999,51	1.001,37	49,95	132.868,0	170.406,8	149.182,7	452.257,6	2.588.697,8	2.608.207,3	0,173
45.	17,08	23,3	868,13	1.007,62	963,36	1.002,94	991,31	49,91	141.762,3	162.875,4	183.166,4	487.804,1	2.534.901,0	2.581.409,8	0,189
46.	17,41	23,8	867,21	1.018,88	986,12	1.008,97	1.004,66	49,94	136.923,4	135.166,7	185.274,1	457.364,2	2.573.249,3	2.613.578,5	0,175
47.	17,8	24,9	867,74	1.004,60	1.001,08	1.002,72	1.002,80	49,96	144.178,9	164.223,3	158.386,0	466.788,3	2.568.424,3	2.610.496,8	0,179
48.	18,18	24,5	867,06	1.006,05	1.004,04	994,97	1.001,69	49,92	168.863,5	166.521,0	155.384,6	490.769,1	2.559.075,0	2.605.709,0	0,188
49.	18,62	25,7	867,84	1.006,73	997,90	996,23	1.000,29	49,92	151.215,0	159.658,2	176.705,5	487.578,7	2.558.309,5	2.604.358,0	0,187
50.	19,01	26,7	868,07	1.013,13	1.004,43	989,32	1.002,29	49,93	162.523,8	149.210,5	167.359,2	479.093,5	2.566.091,5	2.610.432,0	0,184
51.	19,33	26,5	866,93	1.000,32	998,75	995,49	998,19	49,93	165.961,7	162.146,2	162.283,0	490.390,9	2.549.411,3	2.598.147,3	0,189
52.	19,72	27,5	868,70	1.012,11	993,54	1.002,34	1.002,66	49,94	153.170,3	149.359,2	175.863,4	478.392,9	2.568.883,5	2.613.048,5	0,183
53.	20,16	28,1	868,39	1.007,89	1.005,77	991,52	1.001,72	49,95	166.136,8	150.311,2	164.769,0	481.217,0	2.565.124,8	2.609.872,8	0,185
54.	20,54	29,0	867,98	1.001,20	1.001,27	991,53	998,00	49,95	164.594,2	156.494,0	169.367,1	490.455,3	2.552.161,8	2.598.860,8	0,189
55.	20,87	29,5	868,42	1.006,98	996,08	997,97	1.000,35	49,94	158.943,0	155.145,1	173.640,7	487.728,7	2.560.170,0	2.606.213,5	0,187
56.	21,26	30,1	867,72	1.003,35	999,30	994,32	998,99	49,94	162.477,5	156.838,0	171.647,8	490.963,3	2.553.862,0	2.600.626,3	0,189
57.	21,59	31,1	866,41	1.003,18	996,85	994,09	998,04	50,04	165.867,5	163.924,4	172.474,6	502.266,5	2.545.137,3	2.594.223,5	0,194
58.	22,03	31,9	867,97	1.000,80	994,68	993,98	996,49	49,95	165.066,3	157.839,3	175.054,1	497.959,6	2.546.593,5	2.594.822,0	0,192
59.	22,36	31,9	868,16	999,34	998,46	996,42	998,08	49,95	162.355,8	162.195,2	176.106,0	500.657,1	2.550.828,5	2.599.496,8	0,193
60.	22,74	32,9	869,40	991,55	993,97	996,72	994,08	49,95	164.199,8	156.812,4	178.237,5	499.249,6	2.544.186,8	2.592.708,3	0,193
61.	23,18	33,6	868,87	1.004,81	991,47	996,41	997,56	49,95	165.162,4	157.699,2	178.695,4	501.557,0	2.551.436,0	2.600.286,3	0,193
62.	23,51	33,9	868,77	1.000,19	991,96	992,88	995,01	49,94	170.947,2	157.498,8	183.064,3	511.510,3	2.542.402,3	2.593.347,5	0,197
63.	23,89	35,0	868,72	998,87	962,85	993,27	985,00	49,96	170.923,3	158.189,3	175.431,6	504.544,3	2.516.780,8	2.566.856,0	0,196
64.	24,22	35,5	869,43	1.004,55	973,78	988,74	989,02	49,95	176.080,2	154.707,2	171.967,0	502.754,3	2.530.160,3	2.579.626,5	0,195
65.	24,66	36,2	868,73	1.007,08	986,73	986,25	993,35	49,94	177.751,5	155.713,5	186.656,6	520.121,7	2.536.224,8	2.589.008,0	0,201
66.	25,05	37,0	869,43	995,80	991,61	995,26	994,22	49,91	172.341,1	160.902,4	187.556,5	520.800,0	2.540.362,0	2.593.197,3	0,201

67.	25,43	37,3	870,07	990,13	1.003,34	999,53	997,67	49,92	162.748,1	176.082,3	172.121,5	510.951,9	2.553.427,0	2.604.047,0	0,196
68.	25,82	38,4	869,64	969,04	992,23	991,01	984,09	49,96	161.718,7	163.843,7	188.942,2	514.504,5	2.515.162,3	2.567.246,8	0,200
69.	26,31	39,3	869,58	990,24	971,87	999,26	987,12	49,96	169.495,9	167.755,2	189.742,3	526.993,5	2.520.341,0	2.574.847,8	0,205
70.	26,64	39,9	869,73	1.003,76	986,20	977,72	989,23	49,96	180.918,0	168.511,6	183.161,7	532.591,3	2.525.754,5	2.581.296,0	0,206
71.	27,02	40,9	870,32	986,05	1.002,34	978,32	988,90	49,97	160.487,3	184.719,1	174.190,4	519.396,8	2.529.415,8	2.582.192,3	0,201
72.	27,46	41,1	872,26	1.008,66	998,02	981,40	996,03	49,93	191.202,9	157.536,5	172.957,6	521.697,0	2.553.932,3	2.606.671,8	0,200
73.	27,85	42,2	871,12	994,79	980,49	991,46	988,91	49,96	183.585,0	163.499,5	188.768,8	535.853,2	2.528.132,8	2.584.297,5	0,207
74.	28,23	42,9	871,79	988,17	1.003,05	975,25	988,82	49,94	190.657,9	189.865,3	172.365,5	552.888,7	2.526.608,3	2.586.394,3	0,214
75.	28,62	43,6	871,84	990,45	992,43	987,36	990,08	49,96	168.817,6	177.327,4	194.984,0	541.129,0	2.532.476,5	2.589.644,3	0,209
76.	29	44,2	871,82	981,81	1.002,02	978,00	987,28	49,95	180.038,3	189.325,0	182.143,6	551.506,9	2.522.782,5	2.582.361,8	0,213
77.	29,39	45,0	871,76	997,58	990,31	977,69	988,53	49,89	198.128,8	185.136,9	176.780,3	560.046,1	2.524.095,8	2.585.481,0	0,217
78.	29,77	46,0	873,31	1.002,50	986,76	979,89	989,72	49,88	198.763,3	165.133,4	180.489,5	544.386,3	2.535.377,5	2.593.163,3	0,210
79.	30,21	46,7	872,86	981,86	992,36	997,32	990,51	49,89	174.069,0	182.873,0	198.587,8	555.529,9	2.533.342,3	2.593.537,3	0,214
80.	30,59	47,4	874,63	991,34	995,71	972,60	986,55	49,94	178.949,8	194.974,3	177.711,1	551.635,3	2.529.414,8	2.588.868,5	0,213
81.	30,92	48,2	872,96	1.002,51	987,90	974,70	988,37	49,90	202.717,7	187.764,1	181.315,6	571.797,4	2.524.730,3	2.588.670,8	0,221
82.	31,31	49,0	874,54	999,89	972,31	981,09	984,43	49,94	202.009,1	166.851,4	189.311,7	558.172,1	2.521.731,0	2.582.766,8	0,216
83.	31,69	49,8	875,12	1.000,06	980,12	971,25	983,81	49,93	202.587,7	179.513,5	182.125,7	564.226,9	2.520.732,5	2.583.107,5	0,218
84.	32,13	50,5	874,76	985,74	993,06	970,55	983,12	49,92	199.990,5	199.444,2	186.197,4	585.632,1	2.512.914,0	2.580.252,3	0,227
85.	32,52	51,6	874,38	990,58	972,65	985,73	982,98	49,92	198.803,2	173.391,7	214.200,0	584.194,9	2.511.338,3	2.578.391,8	0,227
86.	32,9	52,4	876,01	979,18	986,72	984,48	983,46	49,94	180.121,8	191.268,4	207.185,4	578.575,6	2.518.946,5	2.584.539,0	0,224
87.	33,29	53,0	875,84	987,85	971,61	982,78	980,74	49,89	197.171,0	178.144,9	207.303,0	582.619,0	2.510.118,5	2.576.847,0	0,226
88.	33,62	54,0	877,19	976,73	986,51	978,80	980,68	49,90	184.056,4	198.613,2	204.102,9	586.772,5	2.513.184,5	2.580.774,8	0,227
89.	34	54,3	877,33	989,47	986,80	970,46	982,24	49,90	200.431,8	195.109,2	197.883,3	593.424,3	2.516.485,3	2.585.507,8	0,230
90.	34,38	55,0	878,40	990,30	975,83	972,80	979,64	49,92	208.534,5	188.510,1	200.406,6	597.451,2	2.511.613,0	2.581.694,8	0,232
91.	34,77	56,7	877,75	981,03	982,53	973,37	978,98	49,92	195.446,7	203.840,8	201.618,8	600.906,2	2.507.000,3	2.578.010,5	0,233
92.	35,15	57,0	879,02	980,89	975,98	978,41	978,43	49,93	198.922,9	192.892,6	216.589,1	608.404,6	2.507.419,5	2.580.176,0	0,236
93.	35,54	58,5	879,13	978,84	978,06	972,87	975,92	49,92	199.444,0	201.784,6	207.953,4	609.182,0	2.500.828,8	2.573.955,5	0,237
94.	35,98	58,6	879,75	977,81	977,52	972,12	975,82	49,91	201.340,8	203.237,9	208.582,1	613.160,8	2.501.473,8	2.575.526,5	0,238
95.	36,36	59,6	880,53	977,43	973,52	971,64	974,20	49,93	202.057,7	198.549,0	215.383,6	615.990,3	2.498.663,5	2.573.492,5	0,240
96.	36,75	61,0	880,21	977,48	972,45	969,03	972,99	49,93	201.369,3	202.015,6	213.464,2	616.849,1	2.494.239,0	2.569.383,3	0,240
97.	37,13	61,6	880,84	978,43	971,88	969,17	972,49	49,92	207.726,0	199.970,3	215.654,8	623.351,1	2.493.174,5	2.569.919,3	0,243
98.	37,51	63,0	880,77	976,09	971,67	968,65	972,14	49,91	206.103,6	204.139,7	218.154,6	628.397,9	2.490.707,8	2.568.756,3	0,245
99.	37,9	62,9	881,10	974,65	972,87	969,20	972,24	49,93	209.457,4	206.050,2	219.333,0	634.840,6	2.490.340,5	2.569.984,0	0,247
100.	38,28	64,0	882,38	977,88	972,69	967,03	972,53	49,91	213.781,9	209.880,2	220.992,3	644.654,4	2.492.521,8	2.574.537,5	0,250
101.	38,67	65,6	882,91	977,81	971,93	963,78	971,17	49,92	219.774,7	208.475,5	220.386,9	648.637,1	2.489.390,8	2.572.507,8	0,252
102.	39,05	65,6	883,65	975,54	974,27	961,67	970,49	49,91	222.926,7	218.405,5	221.688,0	663.000,3	2.486.056,3	2.572.944,8	0,258
103.	39,44	66,8	884,57	977,80	960,12	965,31	967,68	49,95	224.735,4	206.695,4	232.130,1	663.580,8	2.480.769,0	2.567.981,3	0,258

150 Anexa 1

104.	39,82	68,1	885,11	964,74	965,02	970,03	966,60	49,93	212.618,0	220.609,7	238.488,1	671.715,8	2.477.069,0	2.566.529,3	0,262
105.	40,15	68,7	886,67	961,24	970,74	968,91	966,96	49,93	213.093,0	223.733,2	237.912,5	674.738,8	2.482.023,3	2.572.102,5	0,263
106.	40,54	69,5	888,41	975,01	953,15	961,82	963,33	49,94	230.592,3	209.249,0	240.940,3	680.781,6	2.475.587,8	2.567.488,8	0,265
107.	40,98	70,6	889,66	977,07	950,27	960,64	962,66	49,93	242.069,6	210.865,8	244.855,4	697.790,9	2.472.720,8	2.569.291,8	0,272
108.	41,36	71,8	889,41	975,91	956,51	955,21	962,54	49,90	246.906,7	220.859,8	244.179,1	711.945,5	2.467.737,3	2.568.383,5	0,277
109.	41,74	72,8	891,62	960,77	943,62	968,04	957,48	49,95	226.913,1	216.240,9	256.646,3	699.800,2	2.463.346,8	2.560.819,8	0,274
110.	42,13	73,8	890,31	946,33	963,44	963,76	957,84	49,92	220.063,0	252.667,0	255.687,5	728.417,4	2.452.275,8	2.558.173,0	0,285
111.	42,51	74,9	894,79	943,68	959,03	946,65	949,78	49,95	226.156,0	252.097,4	235.352,4	713.605,9	2.447.778,3	2.549.676,8	0,280
112.	42,9	76,2	895,25	940,62	945,77	954,39	946,93	49,95	221.498,5	241.743,8	250.154,6	713.396,9	2.440.857,3	2.542.974,5	0,281
113.	43,28	77,1	894,16	933,54	951,11	961,34	948,66	49,93	232.757,1	258.330,5	273.020,6	764.108,2	2.427.053,3	2.544.493,8	0,300
114.	43,67	78,2	896,73	933,40	947,39	960,57	947,12	49,93	239.770,0	259.933,0	278.662,2	778.365,3	2.425.823,5	2.547.640,5	0,305
115.	44,05	79,2	897,47	952,54	926,33	953,30	944,06	49,89	250.924,2	225.235,3	279.719,1	755.878,6	2.426.437,3	2.541.446,5	0,297
116.	44,44	80,2	903,84	950,25	923,20	924,26	932,57	49,96	279.717,1	228.050,2	258.268,7	766.035,9	2.410.046,5	2.528.860,5	0,303
117.	44,82	81,3	900,48	954,78	926,11	945,62	942,17	49,93	270.033,4	235.052,9	289.107,9	794.194,1	2.417.973,5	2.545.062,0	0,312
118.	45,2	82,4	903,23	955,28	933,14	935,82	941,41	49,92	281.753,0	247.717,4	248.204,2	777.674,6	2.429.601,8	2.551.027,8	0,305
119.	45,53	83,6	909,26	922,04	936,21	911,10	923,12	49,96	263.378,8	281.680,6	250.747,7	795.807,1	2.389.335,0	2.518.378,5	0,316
120.	45,97	85,7	907,87	927,39	935,54	924,71	929,21	49,92	250.100,6	280.349,0	273.314,8	803.764,5	2.399.927,0	2.530.946,0	0,318
121.	46,36	86,5	909,32	926,25	910,31	931,34	922,63	49,91	285.008,3	250.117,7	292.706,3	807.832,4	2.383.447,0	2.516.627,3	0,321
122.	46,69	87,3	916,53	919,03	909,53	904,77	911,11	49,99	281.361,0	282.830,4	273.138,2	837.329,6	2.361.271,3	2.505.338,8	0,334
123.	47,13	88,5	918,65	908,70	909,94	902,41	907,02	49,95	274.953,8	279.198,2	273.625,7	827.777,6	2.358.792,8	2.489.823,8	0,331
124.	47,51	90,4	920,05	907,54	911,60	903,67	907,60	49,93	274.872,3	272.579,9	287.654,4	835.106,6	2.361.958,0	2.505.244,3	0,333
125.	47,84	91,2	922,66	902,26	901,61	897,86	900,57	49,94	290.968,7	286.370,3	293.356,6	870.695,6	2.335.829,8	2.482.832,0	0,349
126.	48,23	92,3	928,06	893,96	888,13	887,31	889,80	49,92	283.429,5	279.850,9	293.285,1	856.585,6	2.324.625,5	2.477.415,8	0,346
127.	48,61	94,2	932,14	882,58	885,68	876,55	881,61	49,81	281.794,9	201.945,2	286.668,3	770.408,4	2.342.018,3	2.465.477,5	0,313
128.	48,99	95,1	931,93	888,93	888,13	879,32	885,46	49,94	279.884,2	297.917,1	295.501,4	873.302,8	2.316.572,8	2.475.715,5	0,353
129.	49,32	96,0	940,51	877,53	857,96	859,39	864,96	49,99	314.225,0	309.611,3	305.055,5	928.891,8	2.256.985,3	2.440.680,3	0,381
130.	49,71	98,2	947,31	865,56	874,91	845,19	861,89	49,99	319.652,5	320.728,1	304.087,4	944.468,1	2.260.374,5	2.449.757,5	0,386
131.	50,15	98,9	942,40	878,61	855,84	871,38	868,61	50,03	312.792,1	279.292,7	336.221,6	928.306,4	2.273.422,8	2.455.647,5	0,378
132.	50,48	100,4	950,67	841,50	857,66	864,27	854,48	50,07	302.981,6	340.614,2	335.790,4	979.386,2	2.231.310,8	2.436.790,0	0,402
133.	50,86	102,5	968,40	837,22	791,48	803,78	810,83	50,06	348.426,8	350.490,8	321.419,0	1.020.336,6	2.123.508,0	2.355.923,0	0,433
134.	51,3	104,0	975,49	775,75	794,63	822,17	797,52	50,11	361.361,8	330.901,3	363.641,2	1.055.904,3	2.080.908,4	2.333.476,8	0,453
135.	51,69	104,2	982,08	767,55	741,97	737,49	749,00	49,56	220.994,6	225.707,4	268.203,9	714.905,9	2.087.681,9	2.206.695,8	0,325
136.	52,07	105,9	973,97	844,01	784,61	814,05	814,22	50,31	368.867,3	330.754,7	379.901,5	1.079.523,5	2.120.241,8	2.379.242,8	0,454
137.	52,45	107,7	1.000,73	787,23	716,02	744,81	749,35	50,11	376.790,8	376.290,6	350.649,8	1.103.731,3	1.960.771,4	2.250.077,0	0,491
138.	52,84	109,0	1.007,09	747,60	709,37	680,21	712,39	49,53	221.943,3	178.575,0	198.375,6	598.893,9	2.068.640,9	2.153.589,8	0,278
139.	53,28	110,1	1.002,48	725,44	755,36	784,53	755,11	50,26	370.772,1	377.286,8	386.693,3	1.134.752,3	1.966.639,9	2.270.536,3	0,500
140.	53,66	111,6	1.044,23	629,67	638,00	620,55	628,74	49,45	229.685,2	268.393,6	194.550,4	692.629,3	1.844.176,3	1.969.954,6	0,351

141.	54,05	113,1	1.042,67	628,31	649,36	677,80	651,82	49,72	372.349,8	312.589,9	350.671,9	1.035.611,6	1.755.715,3	2.038.388,4	0,509
142.	54,43	114,4	1.062,37	647,06	594,61	611,84	617,84	49,55	326.761,4	243.038,0	291.685,4	861.484,9	1.770.529,9	1.968.992,6	0,437
143.	54,82	115,4	1.031,10	684,35	652,00	618,80	651,71	49,73	59.977,7	69.815,1	81.639,7	211.432,5	2.005.455,6	2.016.570,4	0,105
144.	55,2	116,4	1.082,41	545,62	544,66	541,01	543,76	49,54	152.623,2	180.144,4	127.574,1	460.341,7	1.704.750,1	1.765.610,8	0,260
145.	55,64	116,7	1.066,52	595,37	612,39	632,17	613,31	49,69	334.427,0	313.015,1	334.645,9	982.088,1	1.698.147,3	1.961.683,3	0,501
146.	56,02	117,4	1.093,55	526,26	515,57	529,46	523,76	49,63	78.224,0	93.641,7	130.611,4	302.477,2	1.691.255,3	1.718.091,0	0,176
147.	56,46	119,1	1.001,82	743,12	738,81	730,99	737,64	50,32	132.146,7	171.205,5	161.605,5	464.957,6	2.167.835,5	2.217.137,0	0,210
148.	56,79	119,2	1.035,25	654,90	675,91	659,99	663,60	50,01	28.050,9	13.047,3	49.130,5	90.228,7	2.059.217,0	2.061.192,8	0,044
149.	57,18	120,9	1.036,51	663,26	650,20	665,09	659,52	50,04	30.231,7	14.971,8	24.491,5	69.695,0	2.049.419,6	2.050.604,3	0,034
150.	57,56	120,8	1.020,64	697,76	694,31	690,29	694,12	50,11	169.456,4	183.940,7	186.013,2	539.410,3	2.055.860,4	2.125.447,3	0,254
151.	57,95	120,1	1.119,17	502,17	494,47	488,75	485,13	49,84	237.502,8	236.371,6	231.484,0	705.358,4	1.505.537,6	1.662.580,5	0,424
152.	58,33	121,3	1.051,05	631,09	625,55	619,41	625,35	49,95	146.262,4	146.534,7	155.469,3	448.286,4	1.920.368,3	1.971.997,6	0,228
153.	58,77	122,5	1.112,06	499,87	495,59	490,60	485,35	49,93	30.046,7	21.752,5	36.915,6	88.714,8	1.650.329,3	1.652.712,0	0,054
154.	59,16	122,2	1.150,13	417,96	413,03	407,06	412,68	49,92	59.584,6	51.941,1	67.229,4	178.755,1	1.412.826,0	1.424.089,5	0,126
155.	59,54	122,2	1.159,99	398,33	393,63	389,03	383,67	49,91	100.574,3	91.309,8	104.467,5	296.351,6	1.337.649,8	1.370.084,4	0,217
156.	59,87	122,9	1.158,45	403,51	400,32	394,34	399,39	49,92	76.175,4	66.492,4	79.120,2	221.788,0	1.370.342,3	1.388.174,3	0,160
157.	60,25	122,9	1.154,95	408,45	405,13	399,06	404,21	49,91	40.049,5	32.484,3	46.483,6	119.017,4	1.395.632,6	1.400.698,3	0,085
158.	60,58	122,9	1.159,13	401,56	399,25	392,84	397,89	49,92	23.203,2	14.154,1	28.501,2	65.858,4	1.382.196,9	1.383.765,0	0,048
159.	61,02	121,7	1.166,99	385,06	382,92	378,30	381,42	49,92	14.649,0	5.323,1	20.693,3	40.665,4	1.334.898,6	1.335.517,9	0,031
160.	61,41	122,2	1.172,44	373,12	371,53	364,37	369,68	49,91	14.319,7	5.224,4	19.086,5	38.630,6	1.299.856,0	1.300.430,0	0,030
161.	61,79	123,0	1.175,02	366,65	364,34	357,69	362,89	49,91	24.551,8	14.924,9	29.408,2	68.884,9	1.277.518,5	1.279.374,4	0,054
162.	62,18	122,1	1.175,43	364,99	362,65	355,13	360,92	49,91	43.344,4	32.778,7	46.530,3	122.653,3	1.266.987,6	1.272.910,6	0,097
163.	62,56	122,2	1.175,16	365,41	363,28	358,18	361,62	49,93	50.004,0	40.479,0	53.065,7	143.548,7	1.266.961,4	1.275.067,5	0,113
164.	62,95	122,2	1.174,89	368,25	365,48	358,75	364,16	49,92	45.479,2	35.610,5	49.258,9	130.348,6	1.277.072,4	1.283.707,4	0,102
165.	63,33	121,7	1.174,75	368,40	366,38	359,68	364,82	49,93	36.831,0	27.315,3	40.842,4	104.988,8	1.281.594,6	1.285.887,8	0,082
166.	63,66	122,3	1.174,96	367,03	364,67	358,41	363,37	49,93	28.964,4	20.001,8	33.915,7	82.861,8	1.278.310,0	1.280.994,1	0,065
167.	64,04	122,2	1.175,60	365,41	363,57	356,76	361,91	49,92	30.023,4	20.396,8	34.544,0	84.964,3	1.273.727,8	1.276.558,4	0,067
168.	64,43	122,2	1.176,78	364,40	362,33	355,49	360,74	49,93	33.167,2	23.261,8	36.860,1	93.289,0	1.270.284,4	1.273.705,3	0,074
169.	64,81	122,3	1.176,14	364,12	362,24	354,73	360,36	49,93	38.509,4	28.437,2	41.992,4	108.939,0	1.267.017,9	1.271.692,6	0,086
170.	65,2	122,2	1.176,11	364,41	362,09	355,29	360,60	49,93	38.228,6	29.029,8	42.315,5	109.573,9	1.267.740,6	1.272.467,3	0,086
171.	65,58	122,2	1.175,48	365,09	362,15	355,94	361,06	49,94	37.572,2	27.961,4	42.257,9	107.791,4	1.268.842,4	1.273.412,8	0,085
172.	66,02	122,7	1.175,22	365,97	362,93	356,65	361,85	49,93	36.850,3	27.263,8	41.916,8	106.030,9	1.271.512,9	1.275.926,3	0,083
173.	66,35	122,1	1.176,07	365,75	362,88	356,63	361,75	49,94	35.097,3	25.489,0	39.722,1	100.308,4	1.272.554,9	1.276.502,1	0,079
174.	66,74	122,4	1.176,81	365,36	362,95	356,28	361,53	49,95	33.926,3	24.388,7	38.624,7	96.939,7	1.272.847,8	1.276.533,9	0,076
175.	67,17	122,3	1.176,33	364,34	362,58	355,80	360,91	49,94	33.989,2	24.612,5	38.208,6	96.810,3	1.270.109,4	1.273.793,6	0,076
176.	67,56	123,2	1.175,29	363,25	360,98	354,45	359,56	49,94	32.728,6	23.544,8	37.388,2	93.661,6	1.264.460,5	1.267.924,6	0,074
177.	67,94	123,3	1.175,98	364,40	361,68	355,83	360,63	49,93	37.007,0	28.045,2	41.606,0	106.658,2	1.267.968,5	1.272.444,5	0,084

178.	68,27	123,4	1.176,22	364,39	362,23	355,48	380,70	49,94	36.486,5	27.086,4	40.844,3	104.437,2	1.268.663,9	1.272.955,3	0,083
179.	68,66	122,9	1.176,47	365,02	362,69	356,02	381,24	49,94	36.613,6	27.570,4	40.888,3	105.052,3	1.270.803,8	1.275.138,5	0,083
180.	69,04	122,2	1.176,34	364,83	362,10	356,00	380,98	49,93	34.493,9	25.280,2	39.420,9	99.195,0	1.270.188,8	1.274.056,1	0,078
181.	69,43	121,7	1.174,88	364,08	360,84	355,63	380,18	49,94	33.018,1	24.589,9	38.517,1	96.125,1	1.266.008,5	1.269.652,5	0,076
182.	69,87	122,2	1.176,21	365,13	361,65	355,92	380,90	49,94	34.318,4	24.625,2	39.755,7	98.699,3	1.269.801,5	1.273.631,6	0,078
183.	70,25	121,6	1.176,51	364,51	362,04	355,69	380,75	49,94	36.785,5	27.779,3	40.884,1	105.448,9	1.269.049,4	1.273.422,9	0,083
184.	70,64	121,7	1.176,91	364,51	362,08	355,62	380,74	49,94	36.242,6	27.195,5	40.991,2	104.429,3	1.269.533,6	1.273.821,5	0,082
185.	70,96	121,7	1.176,18	364,45	362,31	355,80	380,85	49,94	36.645,6	26.798,1	40.629,5	104.073,2	1.269.169,3	1.273.429,1	0,082
186.	71,35	121,7	1.175,63	364,60	361,44	355,85	380,63	49,94	34.475,7	24.962,7	39.652,8	99.091,2	1.268.186,4	1.272.051,8	0,078
187.	71,68	122,2	1.175,19	363,87	361,58	355,52	380,32	49,94	36.447,4	27.356,7	40.697,8	104.501,9	1.266.189,1	1.270.494,1	0,083
188.	72,12	122,4	1.176,03	364,90	361,78	355,79	380,82	49,94	36.604,4	26.990,8	41.271,0	104.866,3	1.268.853,0	1.273.179,0	0,083
189.	72,45	123,4	1.175,78	364,40	362,16	355,71	380,76	49,95	36.479,1	26.221,4	40.209,9	102.910,5	1.268.505,4	1.272.673,0	0,081
190.	72,83	122,3	1.177,40	365,47	362,37	356,32	381,39	49,94	35.021,1	24.798,0	39.068,4	98.887,6	1.272.820,5	1.276.656,1	0,078
191.	73,22	123,3	1.176,91	365,05	362,82	356,03	381,30	49,95	36.513,0	26.342,4	40.516,8	103.372,1	1.271.614,0	1.275.808,8	0,081
192.	73,55	123,4	1.177,23	364,92	362,08	355,53	380,84	49,95	35.525,6	25.662,4	39.910,2	101.098,2	1.270.535,1	1.274.551,0	0,080
193.	73,93	122,9	1.177,25	365,27	362,36	356,01	381,21	49,96	37.092,6	27.018,7	41.407,7	105.519,0	1.271.510,8	1.275.881,5	0,083
194.	74,32	122,3	1.176,60	364,64	361,50	355,55	380,57	49,95	34.899,3	25.285,8	39.346,5	99.531,7	1.268.987,3	1.272.884,6	0,079
195.	74,7	122,3	1.176,39	365,06	361,93	356,35	381,11	49,95	35.545,5	26.858,0	40.823,4	103.226,8	1.270.383,9	1.274.571,0	0,081
196.	75,03	122,3	1.177,03	365,25	361,90	355,83	380,99	49,95	36.593,0	26.680,2	40.825,3	104.098,6	1.270.603,4	1.274.860,6	0,082
197.	75,47	123,5	1.174,93	364,04	361,06	354,57	359,89	49,96	37.537,2	27.409,8	41.822,4	106.769,4	1.264.199,1	1.268.699,8	0,084
198.	75,85	122,9	1.175,27	364,68	362,06	355,66	380,80	49,96	37.031,8	26.993,3	41.017,5	105.042,6	1.267.924,0	1.272.267,8	0,083
199.	76,24	122,3	1.177,06	364,80	362,84	355,80	381,15	49,96	34.868,9	24.915,3	38.962,7	98.746,9	1.271.621,5	1.275.449,8	0,078
200.	76,62	122,2	1.177,01	365,62	361,87	356,18	381,22	49,97	36.680,5	27.457,0	42.035,6	106.173,1	1.271.230,4	1.275.656,5	0,084
201.	77,01	122,3	1.177,34	365,74	362,42	356,32	381,49	49,96	38.494,2	28.493,8	42.842,4	109.830,4	1.272.241,6	1.276.973,5	0,086
202.	77,56	122,2	1.177,55	365,30	362,66	356,23	381,40	49,97	35.646,8	26.020,1	40.079,7	101.746,6	1.272.804,1	1.276.864,4	0,080
203.	77,94	122,3	1.176,92	364,72	362,36	355,38	380,82	49,97	35.681,0	25.744,2	39.940,0	101.365,2	1.270.105,8	1.274.144,3	0,080
204.	78,32	122,3	1.177,74	365,16	362,49	356,00	381,22	49,97	35.688,8	25.591,3	40.102,7	101.382,8	1.272.395,9	1.276.428,5	0,080
205.	78,65	122,3	1.177,15	364,20	361,74	355,07	380,33	49,98	35.559,6	25.036,6	39.325,9	99.922,1	1.268.749,9	1.272.678,5	0,079
206.	78,98	122,3	1.177,42	365,13	362,29	356,21	381,21	49,97	37.172,4	27.211,8	42.362,0	106.746,2	1.271.584,5	1.276.057,3	0,084
207.	79,37	122,4	1.177,70	365,45	362,15	356,01	381,20	49,97	36.974,4	27.177,0	41.972,0	106.123,4	1.271.907,3	1.276.326,8	0,083
208.	79,81	122,5	1.177,65	365,26	362,31	355,89	381,15	49,97	35.139,5	25.360,5	39.916,5	100.416,5	1.272.150,3	1.276.107,3	0,079
209.	80,14	122,4	1.176,22	364,60	360,71	355,11	380,14	49,98	33.860,6	24.052,9	39.016,8	96.930,3	1.267.278,3	1.270.979,9	0,076
210.	80,52	122,4	1.177,38	364,74	361,63	355,40	380,59	49,99	34.175,1	24.286,0	38.906,1	97.367,1	1.270.089,1	1.273.815,9	0,077
211.	80,85	122,3	1.177,02	364,90	361,99	355,76	380,88	49,97	37.010,5	27.222,8	41.518,6	105.751,9	1.270.069,9	1.274.465,0	0,083
212.	81,29	122,4	1.177,62	365,10	361,64	355,92	380,89	49,98	36.868,8	27.140,6	42.042,8	106.040,2	1.270.706,9	1.275.123,8	0,083
213.	81,62	122,5	1.177,45	365,06	362,19	356,14	381,13	49,99	36.582,0	26.783,7	41.064,6	104.430,3	1.271.503,9	1.275.785,1	0,082
214.	82,06	122,4	1.176,63	364,56	361,46	355,87	380,63	49,98	34.943,3	25.451,5	40.047,9	100.442,7	1.269.168,0	1.273.136,4	0,079

215.	82,44	122,4	1.176,67	364,85	360,99	355,69	360,51	49,99	32.923,3	23.662,2	38.361,7	94.947,2	1.269.204,5	1.272.751,0	0,075
216.	82,77	121,7	1.176,41	364,44	360,90	355,38	360,24	49,98	35.329,1	25.898,0	40.365,2	101.592,4	1.267.471,1	1.271.536,1	0,080
217.	83,1	121,8	1.177,06	364,66	361,26	355,75	360,56	49,97	33.392,6	24.434,7	38.838,0	96.665,4	1.269.669,5	1.273.343,9	0,076
218.	83,54	123,0	1.177,18	364,88	361,24	356,03	360,72	49,98	34.688,2	25.362,8	40.089,2	100.160,1	1.270.088,5	1.274.031,8	0,079
219.	83,93	122,8	1.177,38	364,74	360,91	355,65	360,43	49,98	33.864,2	24.230,9	39.094,0	97.189,2	1.269.546,9	1.273.261,5	0,076

Din procesul de pornire s-a achiziționat cu Sistemul de Achiziție și Prelucrare a Datelor valoarea momentană a tensiunii fiecărei fazei și curentului prin cele trei faze ale mașinii, a vitezei de rotație a rotorului și timpul.

Valorile momentane s-au grupat în blocuri de achiziție care au fost salvate în fișiere separate. Pentru acest tabel sunt 219 blocuri de achiziție, salvate în 219 fișiere.

Fiecare mărime care interesează se calculează pentru fiecare fază în parte. Din lipsă de spațiu pe lungimea liniei nu a fost tiparit tot tabloul mărimilor calculate.

Din valorile momentane ale tensiunii și curentului pe fiecare fază a mașinii se calculează valorile efective ale tensiunii și curentului pe fiecare perioadă a blocului de achiziție. De asemenea, puterea momentană se calculează ca produs al valorilor momentane a tensiunii și curentului.

Tensiunea și curentul, pe fiecare linie din tabel, este o medie calculată pe perioadele unui bloc de achiziție din valorile efective calculate pe fiecare perioadă a tensiunii.

Puterea activă se calculează ca medie a valorilor puterii active pe fiecare perioadă a tensiunii, dintr-un bloc de achiziție.

Din valorile măsurate se pot calcula și alte mărimi care interesează.

Analog, se calculează celelalte mărimi, aplicând formulele de definiție