



UNIVERSITATEA „POLITEHNICA” din BUCUREȘTI
ȘCOALA DOCTORALĂ DE INGINERIE ELECTRICĂ

REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

**CREȘTEREA SECURITĂȚII NUCLEARE PRIN
UTILIZAREA CONSOLELOR MODERNE ȘI
SIMULAREA FUNCȚIONĂRII MOTOARELOR
ASINCRONE**

Doctorand: Ing. Bogdan Florin Venescu

Conducător: Prof. Dr. Ing. Mihai IORDACHE

BUCUREȘTI 2021

CUPRINS

INTRODUCERE.....	4
CAPITOLUL 1	6
SECURITATEA REACTORILOR NUCLEARI ENERGETICI	6
1.1. Semnale analogice utilizate în sistemele de control și securitate - schemă generală pentru un echipament de prelucrare digitală	6
1.2. Erorile de măsurare ale semnalelor analogice din sistemele de control și securitate	7
1.3. Metode de reprezentare a semnalelor prin descompunere	8
1.4. Perturbații și erori specifice domeniului nuclear	9
1.5. Concluzii	9
CAPITOLUL 2	11
SISTEMUL DE CONTROL COMANDĂ AL REACTORULUI NUCLEAR TRIGA SSR 14MW	11
2.1 Funcțiile sistemului de control-comandă	11
2.2 Criteriile și bazele de proiectare pentru sistemul de control-comandă	11
2.3. Circuitele sistemului de control-comandă	12
2.3.1. Canale nucleare de măsură	12
2.3.2. Canale ne-nucleare de măsură	13
2.3.3 Operarea automată	14
2.4. Concluzii	15
CAPITOLUL 3	16
CREȘTEREA SECURITĂȚII NUCLEARE PRIN INTRODUCEREA NOILOR ARHITECTURI ALE CONSOLEI CENTRALE	16
3.1 Funcțiile noilor sisteme de protecție, control și monitorizare.....	16
3.1.1. Sistemul de protecție al reactorului (Reactor Protection System - RPS)	16
3.1.2. Sistemul de control și monitorizare – CMS (Control and Monitoring System)	16
3.1.3. Criteriile și bazele de proiectare a noilor sisteme de protecție și control și monitorizare	17
3.2. Descrierea noilor sisteme de protecție, control și monitorizare.....	17
3.3. Funcționarea sistemului de control și monitorizare (CMS)	18

3.4. Analiza și evaluarea intercomparată a securității sistemelor	19
3.5. Analiza comparativă a performanțelor canalelor de măsură nenucleare, redundante ...	21
3.6. Arhitectura noilor sisteme de protecție a reactorului și de control și monitorizare.....	22
3.7. Concluzii privind rolul și beneficiile sistemului de protecție a reactorului	25
CAPITOLUL 4	26
ANALIZA MOTORULUI ASINCRON AL POMPEI DIN CIRCUITUL PRIMAR, ÎN REGIM PERMANENT	26
4.1. Introducere	26
4.2. Ecuațiile de stare ale motorului de inducție în regim permanent sinusoidal	26
4.3. Analiza în regim permanent sinusoidal când se utilizează schema echivalentă și programul <i>ASINOM</i> – analiza simbolică cu metoda <i>nodală modificată</i>	28
4.4. Analiza în regim permanent sinusoidal când se utilizează ecuațiile de stare în mediul de programare Matlab	30
4.5. Analiza în regim dinamic când se utilizează ecuațiile de stare în mediul de programare Matlab	33
4.6. Analiza în regim permanent a motorului asincron cu metoda forței brute	35
4.7. Observații și concluzii	37
CAPITOLUL 5	39
ESTIMAREA PARAMETRILOR MOTORULUI ASINCRON UTILIZÂND METODA PĂTRATULUI ERORII MĂRIMII DE LA IEȘIRE (FUNCȚIA DE TRANSFER)	39
5.1. Introducere	39
5.2. Descrierea metodei funcțiilor de transfer	39
5.3. Estimarea parametrilor unui motor asincron pe baza funcțiilor de transfer.....	40
5.4. Observații și concluzii	43
CAPITOLUL 6	45
CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI CONCLUZII.....	45
C1. Concluzii generale	45
C2. Contribuții originale.....	47
C3. Perspective de dezvoltare ulterioară	48
BIBLIOGRAFIE.....	51

Cuvinte cheie: Securitate nucleara, sistem de control comanda, motor asincron, functii de transfer

INTRODUCERE

Formularea problemei

Progresul tehnologic reprezintă motorul oricărei economii și face parte din strategia de dezvoltare pe care țările o au în vedere permanent. Susținerea ramurilor industriale se poate face eficient prin asigurarea învățământului superior specializat, prin investiții în cercetare academică și industrială, prin promovarea centrelor de cercetare și a parcurilor de inovare tehnologică precum și prin asigurarea energiei electrice necesare. Din acest punct de vedere, al producerii de electricitate, se constată faptul că tehnologiile noi au permis realizarea unor centrale electrice performante cu impact redus asupra mediului. Energetica nucleară este considerată o sursă verde de energie electrică și beneficiază din plin de tehnologii noi pentru creșterea productivității și a siguranței în exploatare.

Obiectivele cercetării

Scopul principal al prezentei tezei de doctorat îl constituie creșterea securității nucleare în contextul utilizării instalațiilor nucleare existente în exploatare în România prin introducerea tehnologiilor de ultimă oră și prin cercetarea continuă pentru cunoașterea și îmbunătățirea funcționării componentelor cu rol important pentru Centralele Nucleare-Electrice. Unul dintre obiectivele tezei este de a prezenta modul în care aplicarea noilor tehnologii în camera de control și comandă a reactorului Triga SSR 14MW poate conduce la creșterea siguranței în exploatare și minimiza riscul accidentelor într-o centrala nucleare-electrică. Am analizat pe larg funcțiile sistemului de bază precum și criteriile care stau la baza proiectării unor console moderne de control-comandă, punând accent pe modul în care sunt reduse riscurile de accident nuclear. Studiile internaționale, analiza accidentelor și incidentelor nucleare din centralele nucleare-electrice, implicarea analiștilor, [25-28].

Un alt obiectiv al tezei de doctorat este de a studia comportamentul static și dinamic al principalilor parametri ai motoarelor asincrone utilizate în energetica nucleară pentru pompele ce acționează agentul de răcire din circuitul primar al centralelor. Simularea funcționării motoarelor electrice, stabilirea cu ajutorul programelor de calculator a comportamentului acestora în fazele de pornire precum și la funcționarea în sarcină face obiectul multor studii, inclusiv în România [6]. Împreună, cele două obiective principale ale tezei au drept scop creșterea siguranței în exploatare a reactorilor nucleari, mărirea încrederii în componentele și tehnologiile utilizate, realizarea unei interfețe om-mașină intuitive, precum și asigurarea calității superioare a unuia dintre cele mai importante componente de siguranță pentru reactoarele nucleare: motoarele pompelor sistemului primar de răcire a reactorului.

Structura și conținutul tezei

Teza este structurată pe 6 capitole, capitolul întâi *Securitatea reactorilor nucleari energetici*, capitolul al doilea *Sistemul de control comandă al reactorului nuclear TRIGA SSR 14MW*, capitolul al treilea *Creșterea securității nucleare prin introducerea noilor arhitecturi ale consolei centrale*, capitolul al patrulea *Analiza motorului asincron, al pompei din circuitul primar, în regim permanent*, capitolul al cincelea *Estimarea parametrilor motorului asincron utilizând metoda pătratului erorii mărimii de la ieșire (a funcției de transfer)* și, în ultimul

capitol, al cincilea sunt prezentate *contribuțiile originale și concluziile generale* ale tezei de doctorat. În final am prezentat bibliografia pe care am utilizat-o la redactarea tezei.

În primul capitol am prezentat elementele principale de care depinde securitatea reactorilor nucleari energetici. Capitolul al doilea al tezei este dedicat sistemul de control comandă al reactorului nuclear TRIGA SSR 14MW. În debutul acestuia, în subcapitolul 2.1., am expus pe larg funcțiile de bază ale sistemului de control-comandă cu rol determinant în securitatea reactorului. Capitolul continuă cu prezentarea principalelor criterii de proiectare pentru sistemul de control-comandă în subcapitolul 2.2. Elementele de bază ale circuitului sistemului de control-comandă ale reactorului TRIGA SSR 14MW sunt prezentate pe larg în subcapitolul 2.3. În prima parte a acestuia, în subcapitolul 2.3.1, am enumerat canalele nucleare de măsură: un canal logaritm de măsură a puterii, de domeniu larg, un canal de măsură a puterii liniare, de domeniu larg, utilizat pentru măsurarea cu precizie a puterii neutronice, trei canale de măsură procentuale.

Capitolul al treilea al tezei scoate în evidență importanța noilor console de control comandă de care beneficiază reactorul TRIGA SSR 14MW. În condițiile noii arhitecturi, securitatea nucleară este îmbunătățită foarte mult, așa cum este prezentat în subcapitolul 3.1.1., Sistemul de protecție al reactorului (Reactor Protection System - RPS). În următorul subcapitol, 3.1.2, am pus accent pe sistemul de control și monitorizare a reactorului. În finalul subcapitolului 3.1, sunt prezentate criteriile și bazele de proiectare a noilor sisteme de protecție și control și monitorizare. Întregul subcapitol asigură bazele proiectării și executării consolelor moderne de comandă și control pentru reactoarele nucleare.

Teza continuă cu capitolul al patrulea, de mare importanță pentru securitatea nucleară, în care am prezentat o serie de simulări ale funcționării motorului asincron în regimuri diferite. Aceste simulări ajută la înțelegerea evoluției unor parametri electrici și a puterii generate de motorul asincron folosit pentru pompele circuitului primar al centralelor nucleare-electrice. Primul subcapitol 4.1, *Simularea motorului asincron în regim permanent*, este împărțit în mai multe subcapitole care ajută la înțelegerea și estimarea parametrilor electrici de funcționare. În introducerea din acest subcapitol, 4.1.1, am explicat rolul motoarelor asincron în circuitul de răcire al reactoarelor nucleare și programele de calculator utilizate. Subcapitolul continuă cu 4.1.2, în care sunt expuse ecuațiile matematice care guvernează funcționarea motorului asincron și parametrilor electrici ai acestuia.

Capitolul al cincilea intitulat *Estimarea parametrilor motorului asincron* prezintă o nouă metodă de identificare a parametrilor motoarelor asincrone. bazată pe anumite măsurători efectuate pe circuitul (sistemul) real. Plecând de la circuitul echivalent pe o fază a unui motor asincron (circuit analogic) în regim sinusoidal, se generează o funcție de transfer (o mărime de performanță) în formă complet (full) simbolică. Amplitudinea și faza funcției de transfer complexă pot fi măsurate prin alimentarea sistemului (circuitului) cu o sursă independentă sinusoidală de tensiune sau curent, de frecvență variabilă.

Simulări numerice efectuate scot în evidență importanța cunoașterii funcționării motoarelor asincron atât în regim tranzitoriu, dar și permanent pentru menținerea securității nucleare la cele mai mari valori posibile. După o scurtă *Introducere*, am prezentat metoda *Funcțiilor de transfer*, iar în final, *Estimarea parametrilor unui motor asincron pe baza funcțiilor de transfer*. Capitolul al cincilea se încheie cu prezentarea concluziilor acestui capitol.

Ultimul capitol al tezei de doctorat 6 este dedicat în întregime concluziilor și contribuțiilor originale desprinse din toate capitolele lucrării.

CAPITOLUL 1

SECURITATEA REACTORILOR NUCLEARI ENERGETICI

1.1. Semnale analogice utilizate în sistemele de control și securitate - schemă generală pentru un echipament de prelucrare digitală

Sistemele electronice de control și securitate pentru instalațiile nucleare asigură detecția stărilor de pericol și declanșarea mecanismelor de oprire de urgență, activarea unor mecanisme suplimentare de răcire a instalațiilor și containerizarea reactorului, precum și declanșarea sistemelor de alarmă în vederea evacuării zonelor expuse.

Majoritatea sistemelor analogice și digitale, utilizate în prezent, realizează funcțiile menționate mai sus cu suficientă precizie și siguranță în funcționare pentru a permite operarea centralelor nucleare-electrice și altor instalații nucleare în limitele de proiect impuse. Totuși, aceste sisteme electronice prezintă deficiențe în funcționare evidențiate printr-o fiabilitate scăzută a echipamentelor, semnale false de declanșare și alarmare, precum și necesitatea unor activități laborioase de mentenanță. Unul dintre punctele slabe ale sistemelor de securitate și control - proces, implementate în instalații critice nucleare sau nenucleare, este sensibilitatea acestora la luarea deciziilor nejustificate de oprire de urgență.

Funcționarea îndelungată la parametrii de securitate apropiați de pragurile maxime de declanșare duce inevitabil la apariția unor erori temporare de interpretare a datelor (paraziți industriali, erori software) sau la defecțiuni hardware și software temporare (întreruperea canalelor de date sau de alimentare). Statistica realizată pentru instalații nucleare indică apariția unui număr ridicat de opriri neplanificate, diferențiat în funcție de tipul instalației și gradul de complexitate al sistemelor logice de decizie.

Introducerea unor sisteme electronice complet digitalizate bazate pe control distribuit și sisteme de operare tolerante la defect înlătură în mare parte deficiențele semnalate. Acestea permit introducerea metodelor moderne de filtrare digitală adaptate în permanență regimurilor de funcționare, precum și a unor algoritmi avansați de tratare a stărilor tranzitorii și situațiilor de avarie [6].

O schemă funcțională simplificată pentru un echipament digital tip microcalculator de proces sau PLC (Programmable Logic Controller) de control și securitate nucleară (figura 1.1) va conține obligatoriu un sistem de conversie analog digitală, unitate centrală de prelucrare numerică, ieșiri analogice spre proces, ieșiri digitale și conexiuni spre o consolă operator.

Schema prezentată în figura 1.1. dispune de un minimum de funcții de autodiagnoză prin prezența unui canal cuplat intrare-ieșire analogic și a unui canal digital care permite verificarea funcțiilor de calcul și de conversie, precum și prin prezența unui dispozitiv "watch-dog" de monitorizare a funcționării sistemului digital. Toate intrările și ieșirile de proces sunt dotate cu circuite de filtrare analogice și cu circuite de protecție.

Pachetul software utilizat prezintă funcții de filtrare numerică a informației și toleranță la defect atât pentru liniile de măsură [9], cât și pentru modulele hard și soft ale echipamentului. Proceduri speciale de autodiagnoză și autoorganizare sunt implementate pentru realizarea funcțiilor de detecție a erorilor hard și soft și păstrarea funcțiilor critice în situații deosebite. Ieșirile digitale sunt astfel configurate ca să poată fi utilizate într-o structură redundantă cu mai multe canale în paralel și sistem de votare "1 din 2", "2 din 3" sau "3 din 5".

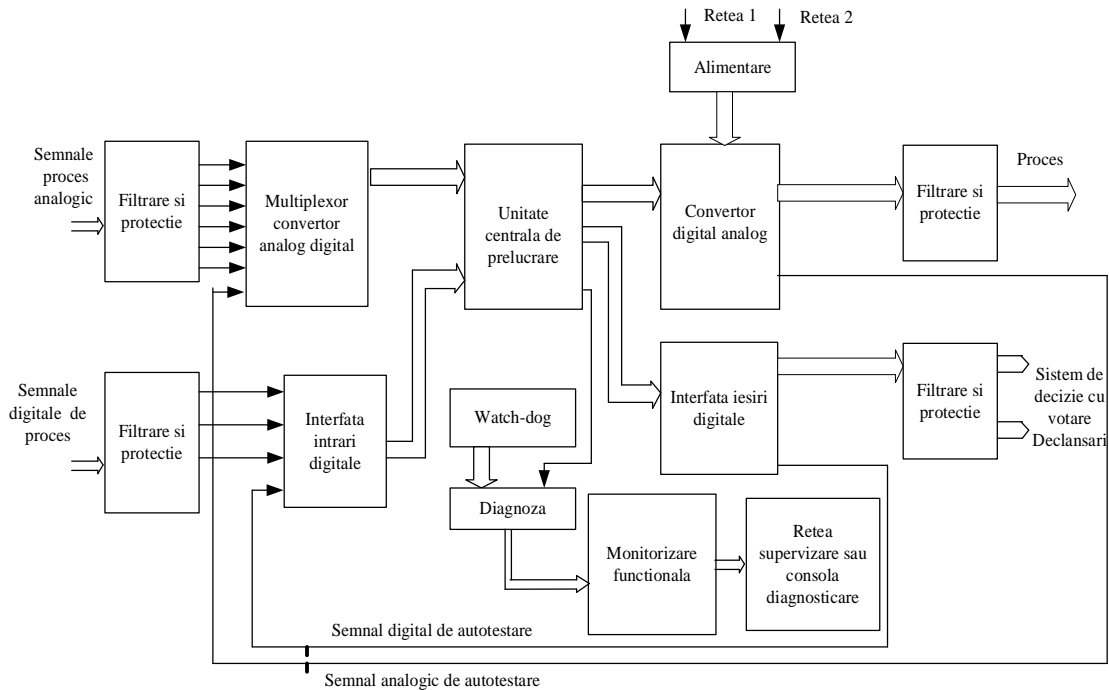


Fig.1.1. Schemă generală pentru un echipament de prelucrare digitală a semnalelor în sisteme de control și securitate nucleară

1.2. Erorile de măsurare ale semnalelor analogice din sistemele de control și securitate

După caracterul lor se disting trei categorii de erori de măsurare: erori sistematice; erori întâmplătoare și erori grosolane. Erorile sistematice au valori care pot fi determinate sau anticipate și apar datorită variațiilor condițiilor de mediu sau îmbătrânirii echipamentelor; aceste erori pot fi micșorate sau anulate în instalațiile nucleare, prin operații de calibrare periodică, autocalibrare sau autozero, precum și prin intercompararea și corelarea unor canale de măsură cuplate în paralel cu funcții similare. Erorile sistematice sunt tolerate în sistemele de control și securitate nucleară fiind prevăzute limite și acțiuni corective încă din etapa de proiectare. Sistemele digitale moderne furnizează în timp real personalului de întreținere valori estimate pentru acest tip de erori și semnalizează depășirea limitelor admise.

Erorile întâmplătoare sunt acelea care apar aleator având mărimea și semnul greu de anticipat; acestea provin din influențe necontrolate ale mediului, paraziți industriali, linii de alimentare cu energie necontrolate, stări tranzitorii ale instalațiilor. Erorile întâmplătoare pot fi micșorate prin filtrarea semnalelor electrice de intrare și implementarea unor strategii complexe de evaluare și decizie pentru funcțiile de control și securitate. Sistemele computerizate moderne întocmesc statistici și furnizează personalului de întreținere date în legătură cu apariția acestor evenimente și cauzele lor probabile.

Erorile grosolane în funcțiile de măsurare a semnalelor pot să apară aleator sau sistematic datorită unor cauze majore, defecțiuni în instalații, intervenții greșite în timpul operațiunilor de mentenanță etc. Aceste erori duc la vicierea totală a valorilor măsurate și nu pot fi eliminate decât prin intervenția umană sau prin utilizarea unor tehnici de toleranță la defect în proiectarea instalațiilor. Totuși aceste erori sunt deosebit de periculoase și necesită semnalizări de urgență și uneori oprirea proceselor industriale pentru remedierea defectelor și analiza cauzelor apariției acestora [10].

1.3. Metode de reprezentare a semnalelor prin descompunere

Metoda de descompunere în serie trigonometrică Fourier oferă posibilitatea de descompunere a unui semnal analogic într-o sumă de sinusoides de frecvențe diferite astfel ca, prin metoda superpoziției, să poată fi refăcut semnalul de ieșire, cunoscând răspunsul sistemului la fiecare componentă în parte [11].

Astfel orice funcție $f \in L^2[-1,1]$ se poate reprezenta printr-o serie Fourier care ia forma:

$$f_x = \left(\frac{a_0}{2}\right) \times \mathbf{1} + \sum_{K=1}^{\infty} \left[\left(a_K \cos \frac{K\pi}{l}\right) x + \left(b_K \sin \frac{K\pi}{l}\right) x \right] \quad (1.16)$$

unde: $\left\{ \mathbf{1}, \left(\cos \frac{K\pi}{l}\right) x, \left(\sin \frac{K\pi}{l}\right) x \right\}_{K \in \mathbb{N}}$ este o familie de funcții în spațiul $L^2[-1, 1]$ ortogonale pe intervalul $[-1, 1]$, [43].

Sistemele digitale moderne de prelucrare a informației utilizează fără excepție metode de eșantionare a semnalelor constând în prelevarea unor valori la intervale de timp stabilite, conversia și reprezentarea lor ca valori discrete în corelație cu axa timpului. Informația eșantionată poate fi o succesiune de valori ale aceleiași mărimi analogice de intrare sau succesiuni ordonate ale unui număr mare de canale analogice care urmează a fi prelucrate digital.

Procesul de eșantionare este absolut necesar, deoarece permite prelucrarea digitală a mărimilor analogice de intrare de către o singură unitate centrală, care execută algoritmi specifici pentru fiecare canal, schimbarea algoritmilor în funcție de starea sistemului, precum și introducerea unor valori preselectate pentru operațiuni de autotestare și autoevaluare a performanțelor.

Sistemele digitale moderne de achiziție și prelucrare a informației analogice [12] lucrează de multe ori la limita performanțelor, cu semnale cu caracteristici greu de anticipat, cu frecvență variabilă sau viteze de evoluție ridicată.

Sistemele cu eșantionare permit realizarea unor structuri adaptive conjunctural în funcție de semnalele de intrare, starea de criticitate (Criticitate - stare a unei reacții nucleare în lanț, care se autoîntreține), precum și cerințele de moment ale operatorilor. Astfel păstrând condiția din relația (1.25) intervalul de eșantionare T poate fi variabil.

$T = T_{Ai}$, unde T_A este valoarea rezultată în urma rulării algoritmului de adaptare, iar i este canalul corespunzător, $i = (1, 2, \dots, K)$ pentru care se realizează adaptarea. T_{Ai} va fi foarte mic pentru canalele i cu evoluție rapidă sau aflate la limita de siguranță. T_{Ai} va fi mare pentru canalele cu evoluție lentă sau care evoluează la distanță de limitele de siguranță. Pentru prelucrarea semnalelor analogice $X(t)$ eșantionate se utilizează metoda transformatei Z astfel:

- eșantionarea unui semnal analogic se poate efectua cu ajutorul unui întrerupător comandat (figura 1.2,a), sau cu ajutorul unui circuit de înmulțire (figura 1.2,b).

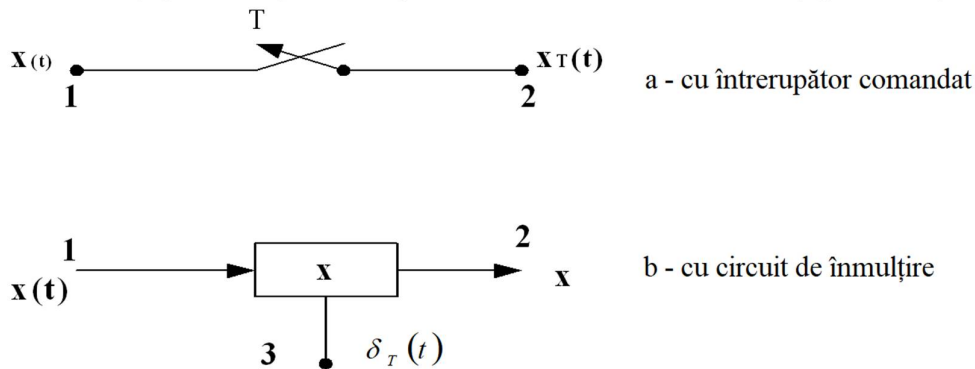


Fig. 1.2 – Metode de eșantionare a unui semnal analogic

1.4. Perturbații și erori specifice domeniului nuclear

În domeniul nuclear sunt de interes erorile induse de traductori de radiații, cabluri și etajele primare de amplificare și conversie. Specific pentru domeniul nuclear este utilizarea traductorilor de radiații tip camere de ionizare, colectroni, detectori cu fotoluminescență și fotomultiplicatori care lucrează cu sarcini electrice sau curenți foarte mici de ordinul a $10^{-14} \div 10^{-4}$ Amperi.

Măsurătorile de curenți foarte mici în mediu industrial sunt susceptibile la un mare număr de surse de erori ceea ce poate duce la apariția unor perturbații inacceptabile în funcționarea instalațiilor nucleare. Principalele surse de eroare în traductori, cabluri și etajele primare de amplificare sunt:

- inducția electromagnetică de semnale parazite în traductori și liniile de măsură;
- curenții de scurgeri pe izolatori și cabluri; acești curenți de ordinul a $10^{-14} \div 10^{-6}$ Amperi apar datorită rezistenței de izolație limitată a materialelor, impurităților și umidității depuse în structura sau pe suprafața acestora, dar și fenomenelor de îmbătrânire fizică;
- semnalele perturbatoare apărute pe liniile de masă și împământare dar și pe liniile de semnal din cauza conexiunilor deficitare și ecranărilor necorespunzătoare;
- impedanța de zgomot a detectorului și primului etaj de amplificare [6] care este de obicei un amplificator de sarcină sau un convertor curent-tensiune cu impedanță foarte mare, (figura 1.7).

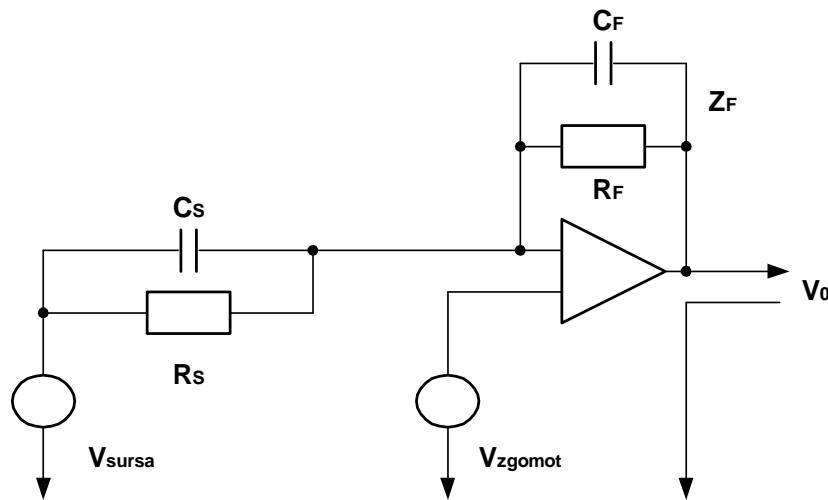


Fig. 1.7 - Etaj primar de amplificare conversie – schemă echivalentă de zgomot

1.5. Concluzii

Securitatea reactorilor nucleari energetici este unul dintre cele mai importante obiective ce trebuie avute în vedere pentru funcționarea unei centrale nucleare-electrice. Acest fapt este scos în evidență de preocupările specialiștilor încă din faza de proiectare a unei centrale, continuate la alegerea tehnologiilor necesare pentru realizarea propriu-zisă a obiectivului nuclear, utilizarea celor mai bune materiale și metode de construcție, precum și la aparatura “state of the art” (de ultimă generație) folosită pentru controlul și securitatea reactorului.

Toate aceste considerente au fost prezentate în capitolul 1 alături de probleme generale legate de prelucrarea semnalelor de proces și metode de procesare digitală a acestora în scopul îmbunătățirii caracteristicilor de stabilitate și siguranță în funcționarea instalațiilor. O altă direcție abordată pentru mărirea siguranței instalației este studiul fiabilității sistemelor de securitate și a metodelor de îmbunătățire prin redundanță, toleranță la defect, autotestare și

autoconfigurare. Am pus în evidență termenul de fiabilitate și securitate a deciziilor automate de oprire de urgență folosite în sistemele de securitate nucleară [14].

Adoptarea unor soluții de sistem corespunzătoare, cu fiabilitate dovedită, implementarea schemelor redundante, a sistemelor tolerante la defect cu autoevaluare și reconfigurare poate duce la creșterea substanțială a siguranței funcționale (siguranța deciziilor), precum și la scăderea volumului de activități de mentenanță.

CAPITOLUL 2

SISTEMUL DE CONTROL COMANDĂ AL REACTORULUI NUCLEAR TRIGA SSR 14MW

2.1 Funcțiile sistemului de control-comandă

Sistemul de control – comandă al unui reactor nuclear trebuie să asigure o bună funcționare a acestuia sub două aspecte principale: primul privind *operarea*, adică să permită aducerea reactorului în stare de funcționare și la parametri doriți de operator, iar al doilea privind *securitatea* reactorului și a instalațiilor conexe, adică să asigure buna funcționare fără a se depăși limitele și condițiile tehnice de funcționare impuse prin raportul final de securitate.

Aceste două aspecte par a fi de competența exclusivă a consolei reactorului, ea fiind cea care permite operatorului atât informarea cu privire la valorile parametrilor de funcționare ai reactorului, cât și posibilitatea de a acționa în vederea corectării acestor valori, prin intermediul barelor de control, iar în cazul apariției unei situații care poate conduce la depășirea limitelor și condițiilor tehnice de funcționare, tot consola este cea care determină oprirea de urgență a reactorului prin declanșarea barelor de control (eliberarea barelor de control din electromagneții care le susțin extrase din zona activă și coborârea lor prin cădere liberă – *scram*).

Dacă în ceea ce privește primul aspect, operarea în sine a reactorului se realizează într-adevăr în principal prin intermediul consolei, cel de-al doilea aspect, securitatea reactorului este determinată atât de parametrii din zona activă și vecinătatea acesteia, care sunt monitorizați prin intermediul instrumentației conținute de consolă cât și de parametrii de funcționare ai instalațiilor conexe reactorului, în special circuitul de răcire a zonei active și dispozitivele de iradiere existente în zona activă. Supravegherea și controlul parametrilor de funcționare ai acestor instalații conexe se realizează însă de sisteme separate de consola reactorului, (circuitul primar are propriul sistem de control – comandă, fiecare dispozitiv de iradiere are de asemenea sistem de control – comandă propriu). Fiecare din aceste sisteme separate de control – comandă poate determina oprirea prin *scram* a reactorului atunci când sunt depășite limitele de funcționare, prin lanțul extern de *scram* la care ele sunt cuplate [15].

2.2 Criteriile și bazele de proiectare pentru sistemul de control-comandă

Parametrii care sunt direct supravegheați de sistemul de control – comandă sunt:

- *puterea neutronică* (fluxul de neutroni), măsurată cu ajutorul a 4 camere de fisiune plasate în cele 4 colțuri ale zonei active;
- *temperatura în combustibil*, măsurată cu ajutorul termocuplelor existente în elementele combustibile instrumentate;
- *pozițiile barelor de control*.

Sistemul de control - comandă a reactorului TRIGA SSR 14MW este conținut de o consolă de operare. Dimensiunile consolei permit poziționarea acesteia astfel încât operatorul să poată observa atât zona de experimente (hala reactorului), cât și instrumentația. Modulele electronice și releele sunt conținute în sertare culisante sau pe spatele ușilor din spatele consolei dând posibilitatea accesului la echipamente pentru realizarea unor diferite acțiuni de mentenanță sau ajustări. Aparatele de măsură și indicare, butoanele cu apăsare și înregistratoarele sunt plasate astfel încât să se asigure o citire și accesibilitate optime. Un

Înregistrator de 10 inch cu două penițe este utilizat pentru afișarea valorilor de putere liniară și logaritmică pe tot domeniul de lucru. La proiectarea consolei s-a ținut cont să fie afișate și anunțate doar variabilele și condițiile importante pentru securitate și necesare pentru operarea sigură [16].

2.3. Circuitele sistemului de control-comandă

2.3.1. Canale nucleare de măsură

Canalele nucleare de măsură constă în:

- un canal logaritmic de măsură a puterii, de domeniu larg,
- un canal de măsură a puterii liniare, de domeniu larg, utilizat pentru măsurarea cu precizie a puterii neutronice,
- trei canale de măsură procentuale.

Pentru măsurarea puterii neutronice există două canale (bucle) de măsurare de domeniu larg (unul logaritmic iar celălalt liniar) care afișează valoarea puterii pe un înregistrator cu două căi, una logaritmică iar cealaltă liniară, amplasat pe panoul frontal al pupitrului de comandă. Canalul liniar de pe înregistrator măsoară puterea reactorului ca procent din limita maximă a domeniului de putere selectat. Împărțirea domeniului maxim, de 30 MW, în subdomenii este impusă de necesitatea controlării riguroase a puterii reactorului, începând chiar de la valori foarte mici ale acesteia, din momentul atingerii criticității.

Semnalul canalului logaritmic de putere, reprezentat schematic în figura 2.1, mai este utilizat pe de o parte pentru stabilirea ratei minime de numărare (fluxul minim) care permite acționarea barelor de control la pornire și pe de altă parte, pentru determinarea perioadei reactorului, care este indicată pe panoul stâng al pupitrului, pe un instrument analogic cu scala neliniară, gradată de la - 30 sec la + 3 secunde. Pe canalul de măsurare a perioadei reactorului este prevăzut și pragul de perioadă minimă (3 secunde) care determină *scram* reactor [17].

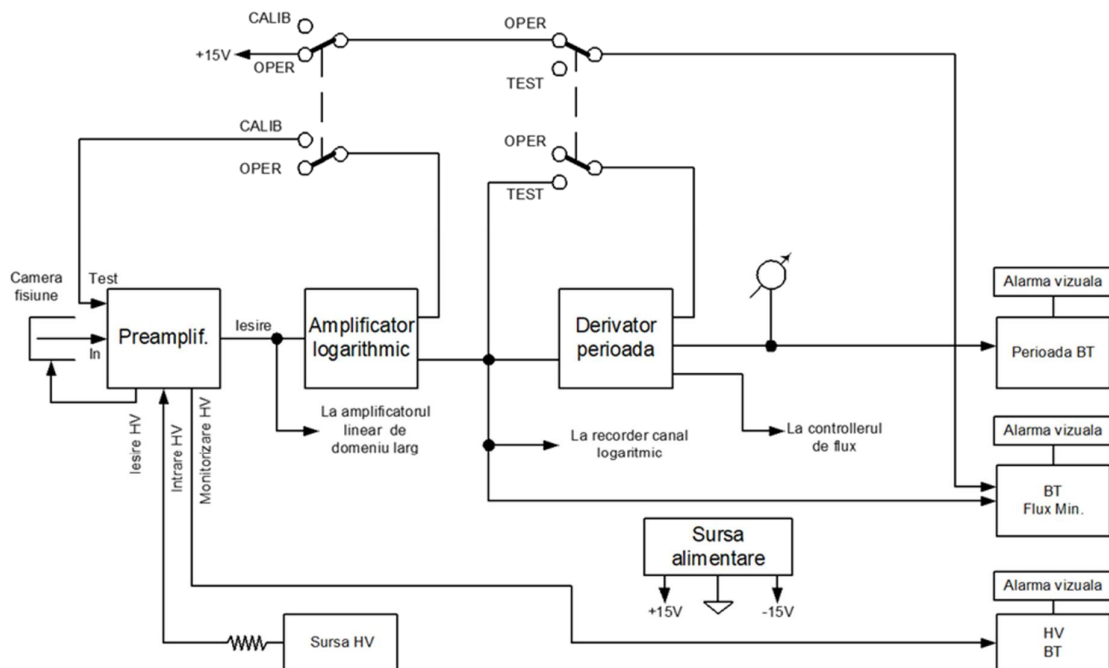


Fig 2.1. Canalul logaritmic de putere de domeniu larg,

Canalul logaritm de măsură a puterii de domeniu larg utilizează metode de numărare și Campbell sau tehnici statistice pentru a realiza o citire cu acuratețe a puterii pe 10 decade. Semnalul de ieșire al acestui canal este afișat pe înregistrator de către una din penițele acestuia.

Semnalul de perioadă este derivat din cel de putere logaritm, afișat și utilizat ca intrare de scram în circuitul care conține logica de securitate. Un bistabil de tripare, condus de ieșirea canalului de domeniu larg, asigură semnalul de interblocare ce împiedică extragerea barei (barelor) de control din zona activă dacă fluxul de neutroni măsurat se găsește sub o anumită valoare prestabilită.

Canalul de măsură a puterii liniare utilizează semnalul provenit de la preamplificatorul canalului de măsură a puterii logaritmice. Acest canal utilizează tehnici de numărare și Campbell și operează pe 10 decade. Obținem astfel o precizie de măsurare cuprinsă între $\pm 1.5\%$ și $\pm 2.5\%$ pe cele 19 decade. Precizia bună și lipsa sensibilității la prezența fondului gama au condus la adoptarea acestei soluții în locul utilizării metodei cu cameră de ionizare compensată și picoampermetru.

2.3.2. Canale ne-nucleare de măsură

Măsurarea temperaturii în combustibil se realizează prin trei canale de măsurare identice, reprezentate schematic în figura 2.4, fiecare primind semnalul de la termocuplele situate în elementele combustibile instrumentate, prin intermediul unui comutator care permite fiecărui canal să monitorizeze câte două termocuple. Valoarea temperaturilor măsurate este afișată pe trei instrumente indicatoare analogice (unul amplasat pe panoul stâng și celelalte două pe panoul drept al pupitrului de comandă).

A realiza o funcționare sigură a reactorului din punctul de vedere al securității nucleare înseamnă a respecta limitele și condițiile tehnice de funcționare impuse prin raportul final de securitate, limite și condiții care constituie anexă la autorizația de funcționare emisă de organul de reglementare. Valorile acestor limite sunt astfel stabilite încât să asigure de fapt integritatea elementului combustibil, pentru ca acesta să păstreze în interiorul lui producția de fisiune.

Între aceste limite, de importanță primordială este de fapt temperatura în combustibil, deoarece în cazul depășirii ei integritatea elementului combustibil nu mai poate fi garantată, limitele impuse celorlalți parametri fiind de fapt subordonate acestui scop.

De aceea în funcția de securitate, cele trei canale de măsurare a temperaturii în combustibil sunt introduse prin logică 1 din 3, adică oricare din cele 3 temperaturi măsurate ar depăși pragul de comutare a circuitului basculant bistabil asociat canalului, determină declanșarea barelor de control – scram reactor [17].

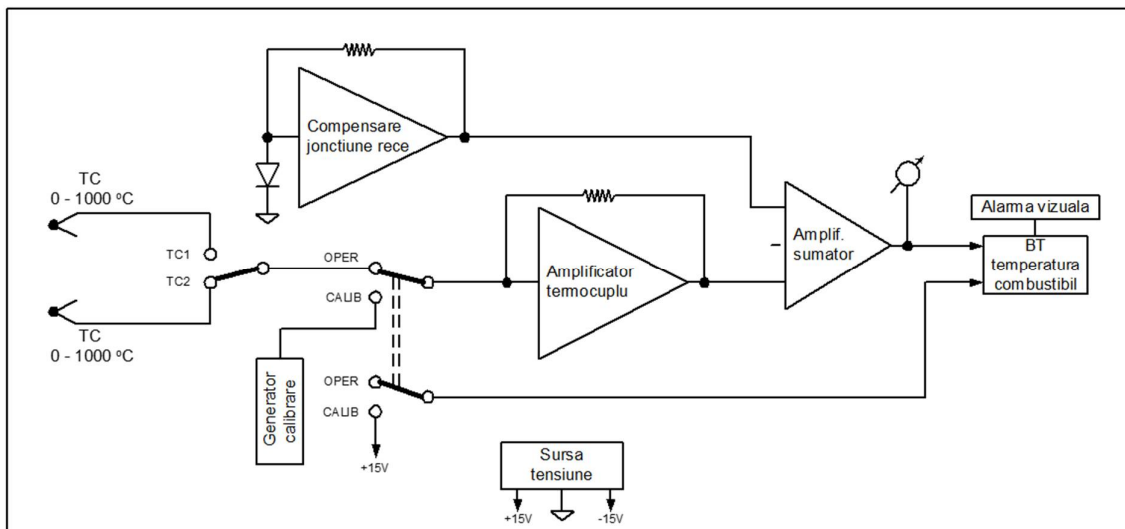


Fig 2.4. Canal de măsură a temperaturii în combustibil

2.3.3 Operarea automată

Reactorul TRIGA SSR 14MW poate fi operat în modul automat: instrumentația, circuitele de interblocare și de securitate descrise în continuare operează (funcționează) doar în modul automat. În modul automat, bara de control utilizată pentru reglare este controlată automat prin intermediul unui amplificator servo care urmărește semnalele de putere și de perioadă. Puterea reactorului este comparată cu puterea cerută la intervale predefinite de timp. Valoarea puterii cerute este fixată cu ajutorul unui switch, a cărui poziție fixează domeniul de putere și a unui potențiomtru, a cărui poziție stabilește valoarea (în procente) a puterii cerute, în cadrul domeniului de putere fixat. Semnalul de control al perioadei care este aplicat unui amplificator servo dă posibilitatea modificării puterii la intervale regulate de timp în scopul menținerii automate a puterii cerute pe intervale mari de operare a reactorului.

Menținerea puterii reactorului la o valoare constantă este realizată de controllerul de flux. Controllerul de flux poate lucra în două moduri:

- modul automat,
- în trepte.

În modul automat, controllerul de flux este un sistem clasic de control în buclă închisă. Bara de control utilizată pentru reglare este deplasată pentru menținerea puterii reactorului la o valoare constantă; modificarea valorii de putere se face la intervale egale de timp. Circuitul de intrare al sistemului de reglare a puterii (vezi figura 2.7) compară valoarea actuală cu valoarea cerută a puterii reactorului. Semnalul de putere (în domeniul 0 – 10V), furnizat de un picoampermetru, este proporțional cu valoarea puterii reactorului, selectată din switch-ul REACTOR POWER de pe consola de operare [16].

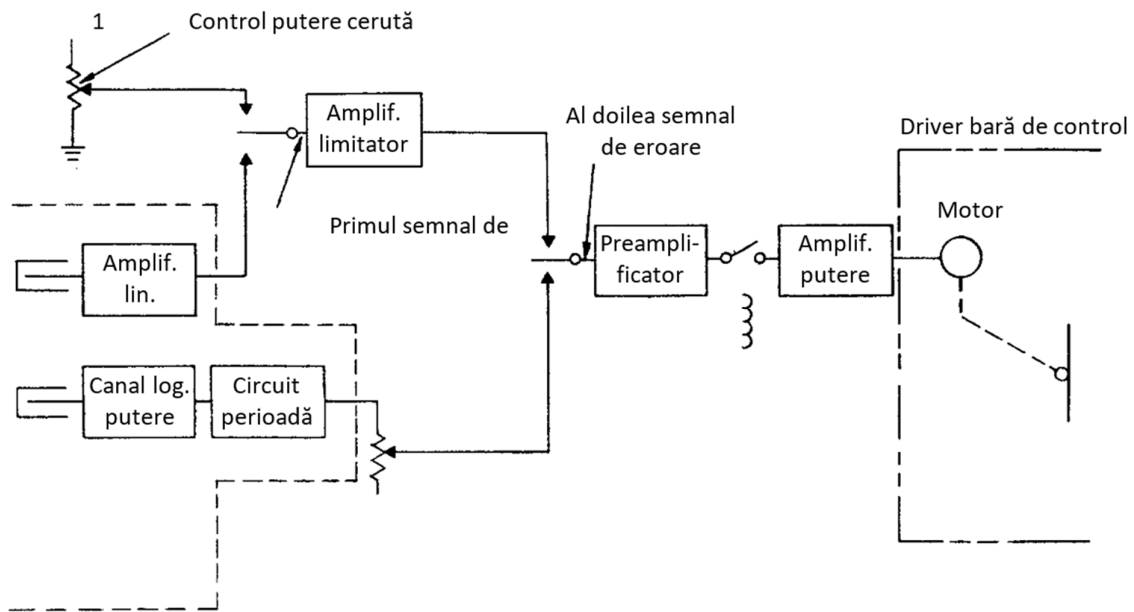


Fig. 2.7. Circuitul de intrare al sistemului de reglare a puterii

2.4. Concluzii

Sistemul de control comandă a reactorului TRIGA SSR 14 MW permite desfășurarea în siguranță a activităților de cercetare ce utilizează fluxul de neutroni generați de reactor. În urma studiului pe care l-am realizat, am extras următoarele concluzii:

- Funcțiile consolei de control comandă a reactorului permit realizarea celor două scopuri pentru care a fost proiectat: operarea reactorului și asigurarea securității nucleare;
- Sistemul de control comandă asigură supravegherea celor trei parametri importanți pentru securitatea nucleară: *puterea neutronică* (fluxul de neutroni), măsurată cu ajutorul a 4 camere de fisiune plasate în cele 4 colțuri ale zonei active, *temperatura în combustibil*, măsurată cu ajutorul termocuplelor existente în elementele combustibile instrumentate și *pozițiile barelor de control*;
- Circuitele sistemului de control comandă cuprind atât canalele nucleare cât și pe cele nenucleare ce asigură informațiile necesare securității în funcționare;
- Operarea automată a reactorului reprezintă o facilitate de înaltă securitate ce permite funcționarea sigură a acestuia prin analiza permanentă a puterii reactorului cu valorile prestabilite.

CAPITOLUL 3

CREȘTEREA SECURITĂȚII NUCLEARE PRIN INTRODUCEREA NOILOR ARHITECTURI ALE CONSOLEI CENTRALE

3.1 Funcțiile noilor sisteme de protecție, control și monitorizare

3.1.1. Sistemul de protecție al reactorului (Reactor Protection System - RPS)

Sistemul de protecție al reactorului are rolul de a detecta deviațiile de la condițiile normale de funcționare ale instalației și de a iniția acțiuni pentru menținerea securității nucleare. De asemenea, sistemul este responsabil pentru inițierea semnalelor care declanșează acțiunea de scram în cazul apariției unor evenimente de operare anticipate, a unor condiții sau a accidentelor de bază de proiect.

Sistemul de protecție conține toate echipamentele electrice redundante și circuitele implicate în generarea semnalelor de inițiere a funcției de protecție. Funcția de protecție inițiată de sistemul de protecție este acțiunea de scram (căderea barelor de control). De asemenea, sistemul de protecție administrează interblocările și configurațiile de sistem necesare operării reactorului în diferite regimuri. Interblocările apar în:

- Modurile de operare a reactorului;
- Domeniul de lucru al canalelor nucleare;
- Activarea semnalului de perioadă de creștere a fluxului de neutroni;
- Managementul sistemului de control al reactivității.

Sistemul de protecție este compus din:

- Senzori;
- Transmițere;
- bistabli de tripare;
- module de votare și protecție (V&PL);
- Logică finală de declanșare (FAL).

Odată inițiată o acțiune de scram, aceasta se va desfășura până la finalizare, fără posibilitatea bypass-ării. Revenirea la operare necesită acțiuni deliberate din partea operatorului de reactor [20].

3.1.2. Sistemul de control și monitorizare – CMS (Control and Monitoring System)

Sistemul de control și monitorizare, clasificat ca un sistem de clasa a 2-a nucleară, oferă operatorului de reactor posibilitatea controlării fluxului din zona activă a reactorului cu ajutorul barelor de control și a canalelor nucleare și de monitorizare a variabilelor de proces. Acest sistem conține un pilot automat, utilizat pentru menținerea nivelului de putere a reactorului la o valoare constantă. De asemenea, sistemul de control și monitorizare participă la implementarea interblocărilor:

- Interzicerea extragerii individuale a barelor de control (RWP - Rod Withdrawal Prohibition)
- Interzicerea extragerii barelor de control în bank (BWP - Bank Withdrawal Prohibition).

Alaramele aferente semnalelor achiziționate de acest sistem pot fi declanșate, validate și stocate.

Funcțiile principale ale sistemului de control și monitorizare sunt:

- Achiziția datelor de la instrumentația nucleară din câmpul de măsură;
- Managementul alarmelor și afișarea acestora;
- Stocarea datelor în arhive electronice (variabile de proces, alarme înregistrate, evenimente apărute în operare), afișarea istoricului de operare;
- Generare de rapoarte de operare;
- Supervizarea parametrilor aferenți piscinei reactorului;
- Controlul automat al puterii reactorului;
- Operarea sistemului de control al reactivității;
- Comunicația cu sistemul de control și monitorizare al circuitului primar;
- Autodiagnoză și afișarea stării proprii de funcționare;
- Controlul accesului la consola de operare și pentru modificarea parametrilor proprii de funcționare [21].

3.1.3. Criteriile și bazele de proiectare a noilor sisteme de protecție și control și monitorizare

Din punct de vedere al proiectării, sistemul de protecție al reactorului (RPS):

- conține doar componente hardware,
- este un sistem de clasă 1 de securitate nucleară,
- conține module care respectă criteriul defectării în stare sigură,
- prevede margini conservative.

În vederea îndeplinirii și menținerii cerințelor de securitate pentru sisteme și componente, sistemul de protecție respectă criteriile de:

Redundanță: sistemul de protecție conține componente redundante, începând cu detectorii de flux neutronic (camere de fisiune) și terminând cu Logica finală de declanșare.

Toleranță la defectări singulare: o defectare nu are drept efect pierderea capacității sistemului de a realiza funcțiile de securitate nucleară.

Independență: fiecare dintre redundanțe poate realiza funcțiile cerute și nu este afectată de funcționarea sau defectarea unui echipament care nu face parte din componența sa.

Izolarea funcțională: vor fi evitate interacțiunile între redundanțele sistemului care ar putea apărea în funcționare normală sau la apariția unui defect la oricare din componentele sistemului. Acest gen de interacții pot fi produse de inducții electromagnetice, descărcări electrostatice, scurtcircuite, circuite deschise sau probleme de împământare [22].

3.2. Descrierea noilor sisteme de protecție, control și monitorizare

Majoritatea componentelor sistemului se află în camera de comandă și sunt accesibile chiar și în timpul operării reactorului. Toate componentele sistemului pot fi testate funcțional. Arhitectura sistemului de protecție este modulară în vederea creșterii fiabilității și a disponibilității, a micșorării perioadelor alocate reparațiilor.

Cele trei canale nucleare au posibilitatea autotestării prin intermediul unui modul generator de curent de test. Acest generator furnizează un semnal în curent pentru simulare, semnal ce poate avea o valoare fixă (predefinită) sau variabilă (perioadă). Dacă unul dintre canalele nucleare este trecut în modul „testare”, sistemul de protecție declanșează intern un semnal de scram. Un indicator denumit „Canal nuclear defect” semnalizează operatorului faptul că modulul de măsură aferent canalului este în modul „testare”, sau că sursa camerei de fisiune nu furnizează corect semnal de alimentare. Acest semnal cere scram în logica 2 din 3.

Canalele de măsură a temperaturii au posibilitatea autotestării prin intermediul unui modul generator de temperatură. Dacă unul dintre canalele de temperatură este trecut în modul „testare”, sistemul de protecție declanșează intern un semnal de scram.

Sistemul de protecție a reactorului este calificat seismic în concordanță cu valorile seismice locale, similare reactorului CANDU [24].

3.3. Funcționarea sistemului de control și monitorizare (CMS)

Considerații generale

CMS (Sistemul de control și monitorizare) este implementat într-o platformă industrială Step7 (Siemens) care poate gestiona orice aplicație distribuită, de la cele mai simple la cele mai complexe sisteme ce pot conține mai multe servere de date, unități de supervizare, PLC-uri sau controllere și unități de I/O.

Aplicațiile tipice conțin hardware și software pentru controlul proceselor, senzori montați în câmp, interfață om – mașină și elemente de acționare. Aplicația recepționează semnale din câmp sau indirect, prin sisteme și echipamente intermediare, afișează informațiile operatorului și declanșează acțiuni în urma comenzilor date de operator sau în baza procedurilor programate la diferite nivele ale sistemului.

Figura 3.9 prezintă o arhitectură tipică a unui astfel de sistem, definit ierarhic de trei nivele. Fiecare nivel are o funcție specifică, Achiziție de date și acționare pentru nivelul câmp, Logica de control pentru nivelul control, Interfața om – mașină și regiștrii istoric pentru nivelul supervizare.

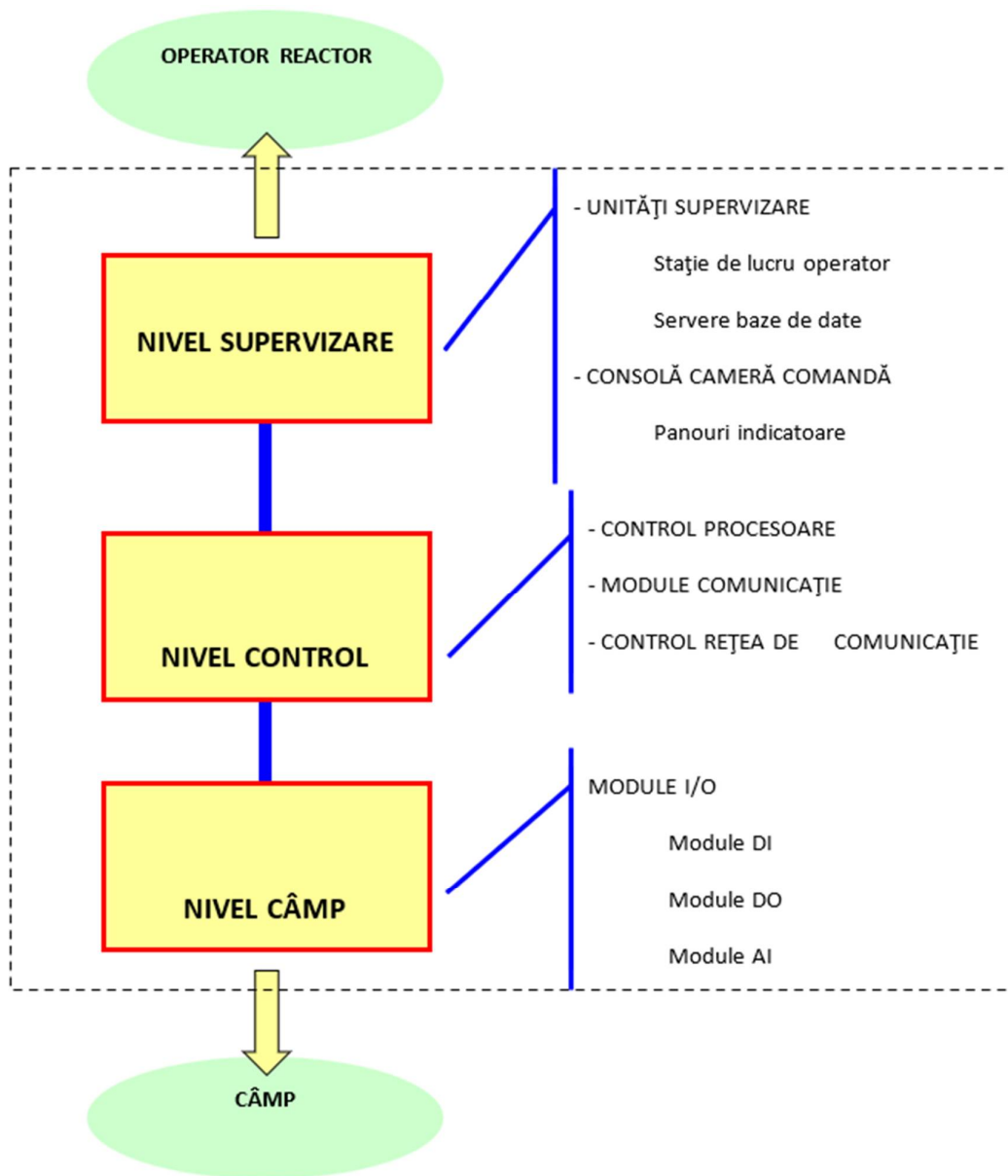


Fig. 3.9. Arhitectură generică

3.4. Analiza și evaluarea intercomparată a securității sistemelor

Din punct de vedere al securității, noul sistem de protecție a reactorului implementează recomandările cuprinse în documentul AIEA SS35-S1, “Code on Safety of Nuclear Research Reactors: Design”. Sistemul de protecție a reactorului trebuie să fie **automatic și independent** față de celelalte sisteme. Acest sistem trebuie să conțină un semnal de intrare pentru oprirea manuală a reactorului

Sistemul de protecție a reactorului trebuie să fie astfel proiectat încât, odată inițiate, acțiunile necesare de securitate să nu mai poată fi anulate de acțiuni manuale. Acolo unde este fizic posibil, la proiectarea sistemului de protecție a reactorului trebuie aplicate criteriile de redundanță și diversitate astfel încât fiecare eveniment postulat să poată fi detectat în cel puțin două moduri diferite.

Sistemul de protecție a reactorului trebuie să conțină cel puțin **două canale complet separate fizic și independente funcțional** astfel încât defectările unice să nu conducă la

pierderea funcției de securitate de către sistem. Sistemul de protecție a reactorului trebuie să fie astfel proiectat încât apariția unui defect de mod comun să conducă la aducerea reactorului în stare sigură.

Toate componentele sistemului trebuie să poată fi testate. Odată inițiate de către sistemul de protecție, acțiunile vor fi îndeplinite până la finalizare. Nu trebuie să existe posibilitatea autoresetării acestora.

Proiectarea sistemului trebuie să asigure posibilitatea stabilirii pragurilor de declanșare cu o marjă de securitate față de limitele de operare astfel încât sistemul să poată controla procesul înainte de atingerea limitelor și condițiilor de operare.

În plus, aceste marje trebuie să ia în considerare:

- erorile instrumentației,
- incertitudinile de calibrare,
- timpul de răspuns al instrumentației și al sistemului.

Prin proiectare se implementează mijloace și soluții de împiedicare a bypass-ării semnalelor de tripare sau interblocare.” De aceea, sistemele de protecție și de control și monitorizare furnizate de INVAP sunt independente din punct de vedere electric, funcțional și fizic. Semnalele proprii sistemului de protecție sunt transmise sistemului de monitorizare prin izolatori galvanici; sistemul de protecție nu primește de la sistemul de control decât un semnal de verificare a funcționabilității acestuia din urmă, însă tot prin intermediul unui izolator galvanic. Figura 3.14 ilustrează succint această separare.

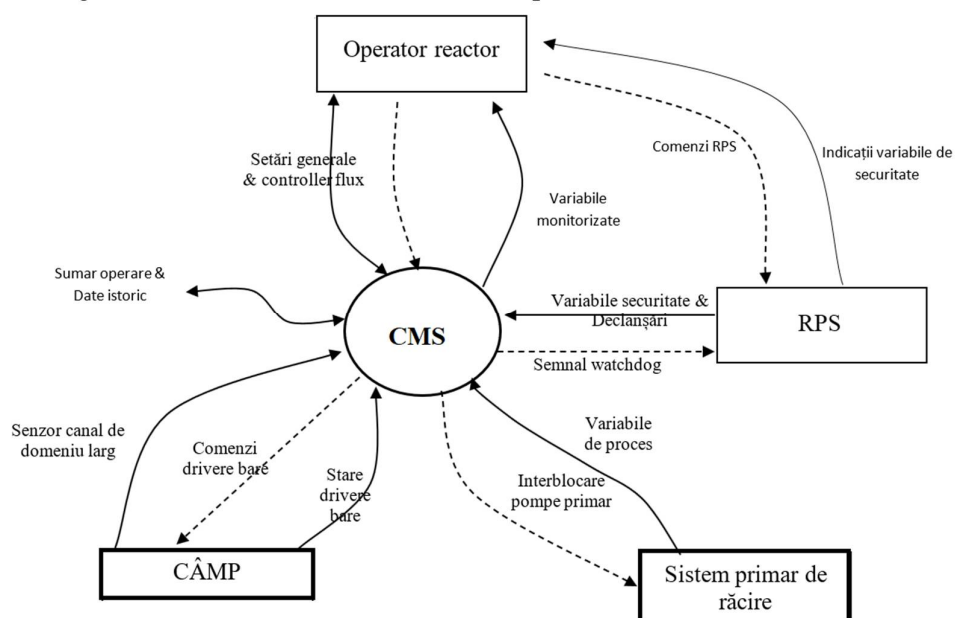


Fig. 3.14. Separarea fizică și funcțională între sistemele de protecție și de control și monitorizare

Sistemul de protecție a reactorului conține două module (redundante) care realizează logica de protecție și votare (V&PL 1 și V&PL 2), conectate la un modul care realizează logica finală de declanșare (FAL). Așadar, logica de votare a modulului FAL este 1 din 2.

Semnalele de securitate (redundante) provenite din câmp sunt conectate la cele două module V&PL, iar semnalele cu implicații în securitatea nucleară (neredundante) sunt multiplicare cu ajutorul unor relee și conectate direct în FAL.

Din prima categorie de semnale fac parte:

- Semnale nucleare: 3 canale nucleare,
- Semnale temperatură combustibil: 6 semnale de temperatură (3 elemente combustibile, 2 canale de măsură pe fiecare element),
- Debit agent de răcire în circuitul primar: 2 canale de măsură,
- Debit agent de răcire pompă de avarie: 2 canale de măsură,

- Nivel apă în piscina reactorului: 2 canale de măsură,
- SCRAM manual: pushbutton pe consolă și and pushbutton pe bridge-ul din hala reactorului,
- Selector de stare a reactorului (Shutdown/Operare),
- Selector de mod de lucru al reactorului (Natural Convection / Low Power / High Power).

Din a doua categorie de semnale fac parte:

- Sistem de control și monitorizare indisponibil,
- Perioadă mică la canalul de domeniu larg (WRC),
- Semnale provenite de la dispozitivele experimentale (4 semnale),
- Semnale provenite de la monitorul de seismicitate,
- Semnale provenite de la monitorul de efluenți gazoși,
- Semnale de SCRAM Extern provenite de la circuitul primar.

Logica finală de declanșare, realizează votarea finală a semnalelor din sistemul de protecție al reactorului și acționează direct asupra electromagneților barelor de control. Deși logica de scram a rămas nemodificată, implementarea acesteia separat de sistemul de control al reactorului, conduce la creșterea securității nucleare și a disponibilității reactorului.

Logica de votare finală este „1 din 2”: fiecare semnal din sistemul de protecție al reactorului este conectat la una din redundanțele independente din logica finală de declanșare. În cazul semnalelor cu implicații în securitatea nucleară (neredundante), fiecare dintre acestea este multiplicat în zona circuitelor auxiliare prin intermediul unor relee de securitate.

3.5. Analiza comparativă a performanțelor canalelor de măsură nenucleare, redundante

Canalele nenucleare de măsură ale reactorului sunt canalele de măsură a temperaturii în combustibil. A realiza o funcționare sigură a reactorului din punctul de vedere al securității nucleare înseamnă a respecta limitele și condițiile tehnice de funcționare impuse prin raportul final de securitate, limite și condiții care constituie anexă la autorizația de funcționare emisă de organul de reglementare. Valorile acestor limite sunt astfel stabilite încât să asigure de fapt integritatea elementului combustibil, pentru ca acesta să păstreze în interiorul lui producția de fisiune.

Între aceste limite, de primă importanță este de fapt temperatura în combustibil, deoarece în cazul depășirii ei integritatea elementului combustibil nu mai poate fi garantată, limitele impuse celorlalți parametri fiind de fapt subordonate acestui scop.

În actuala consolă de operare, cele trei canale de măsurare a temperaturii în combustibil sunt introduse prin logică 1 din 3, dacă oricare din cele 3 temperaturi măsurate ar depăși pragul de comutare a circuitului basculant bistabil asociat canalului, ar determina declanșarea barelor de control. În realitate, există șase semnale de temperatură provenite de la șase termocuple montate pe șase elemente combustibile. Un comutator face selecția a trei canale de măsură din cele șase.

Noul sistem de protecție furnizat de INVAP introduce o logică 1 din 6 pentru canalele de măsură a temperaturii în combustibil. Cele șase semnale provin de la câte două termocuple, montate pe același element combustibil. În acest fel obținem o dublă redundanță pe fiecare linie de măsură a temperaturii, care are drept consecințe:

- respectarea recomandărilor AIEA privind creșterea gradului de securitate nucleară în operare,
- creșterea fiabilității și disponibilității reactorului.

În actuala consolă, valoarea temperaturilor măsurate este afișată pe trei instrumente indicatoare analogice (unul amplasat pe panoul stâng și celelalte două pe panoul drept al pupitrului de comandă). Pe consola furnizată de INVAP, valoarea temperaturilor măsurate este afișată pe:

- șase indicatoare digitale, montate pe panoul vertical stâng al consolei,
- monitorul central al consolei.

Modul de afișare și faptul că indicațiile sunt plasate în aceeași zonă ușurează citirea valorilor de temperatură de către operator. La ambele console, fiecare canal de măsură a temperaturii are posibilitatea de testare. La selectarea modului „test”, un simulator de semnal asigură valori predefinite pentru testarea transmitter-ului și a comparatorului. Când canalul de măsură se află în modul test sau când transmitterul de temperatură sesizează deconectarea termocuplului său, sistemul de protecție furnizează un semnal de scram.

Diferența apare în cazul defectării unui termocuplu: la actuala consolă, înlocuirea unui termocuplu defect este mai greu de realizat; la noua consolă, înlocuirea unui termocuplu presupune doar conectarea firelor într-un șir de cleme aflat pe panourile frontale ale dulapurilor ce conțin sistemul de protecție al reactorului. [31]

3.6. Arhitectura noilor sisteme de protecție a reactorului și de control și monitorizare

Noile sisteme furnizate de INVAP sunt complet independente fizic și funcțional. În figura 3.15 este prezentat aranjamentul aparatelor/echipamentelor de indicare și a afișajelor consolei noi de operare.



Fig. 3.15. Noua consolă de operare TRIGA SSR 14MW

Figura 3.16 prezintă detaliat amplasarea echipamentelor în cele trei dulapuri ale sistemului de protecție a reactorului. Se poate observa că, din motive de securitate, redundanțele unui canal de măsură sunt plasate în dulapuri separate. [31]

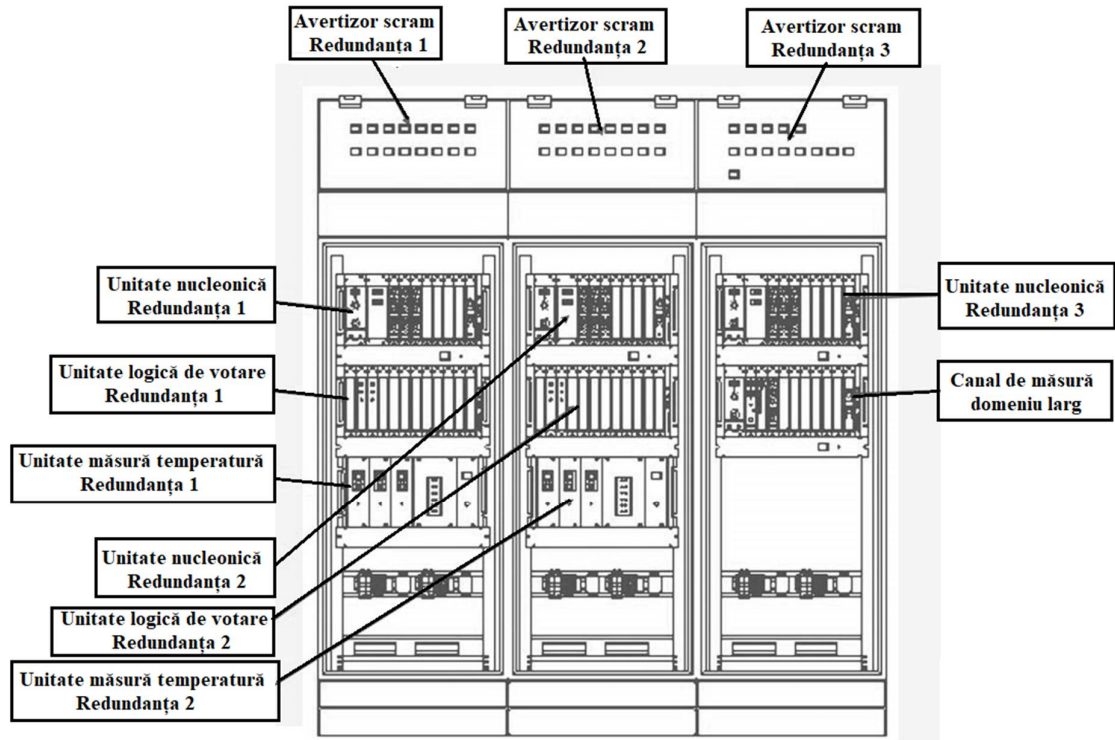


Fig. 3.16. Amplasarea echipamentelor dulapurile sistemului de protecție a reactorului

În figura 3.18 este prezentată pagina de start care afișează informații generale ale funcționării reactorului și starea acestuia.

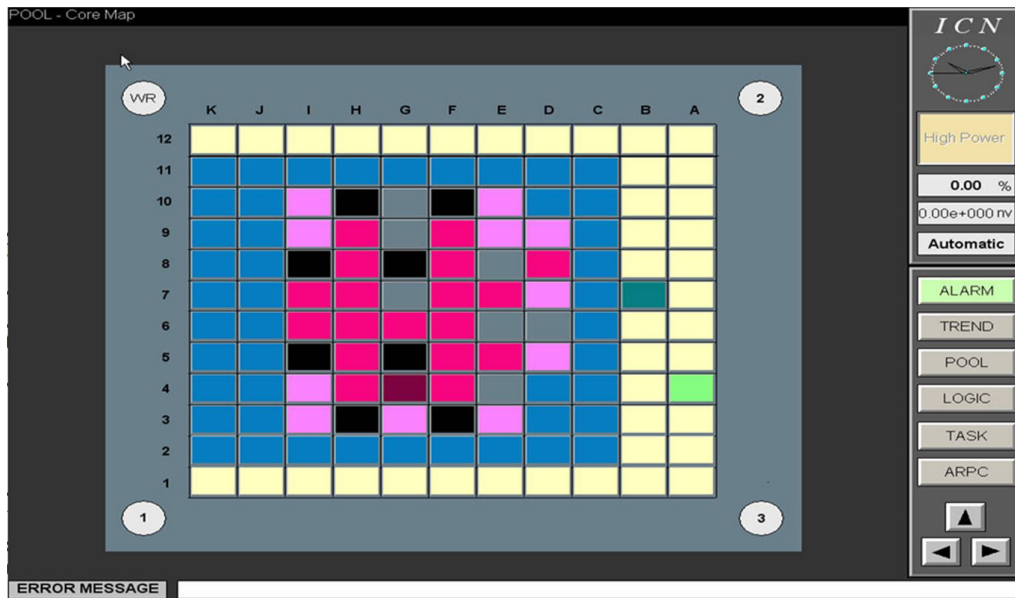


Fig. 3.18. Pagina de start

Reactivitatea reactorului apare într-o fereastră similară celei prezentată în figura 3.19.

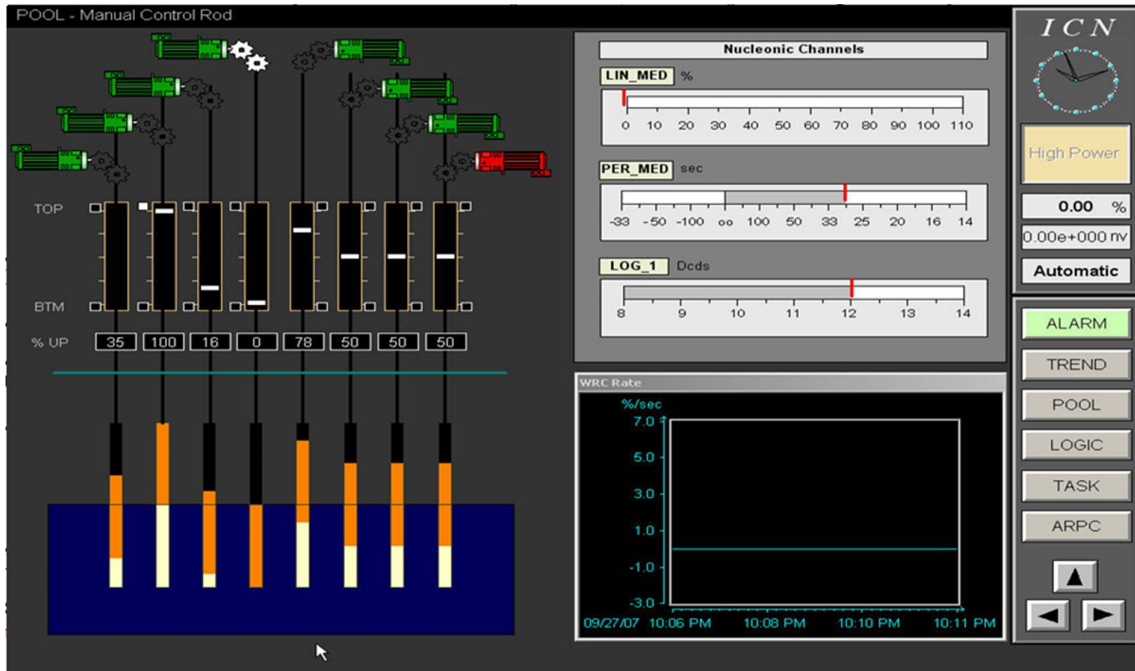


Fig. 3.19. Pagina de afișare a stării sistemului de control al reactivității

Configurația zonei active este foarte bine reprezentată în fereastra prezentată în figura 3.20, având afișate și temperaturile, inclusiv una foarte mare, de 798°C, bine semnalizată de culoarea roșie atribuită. [31]

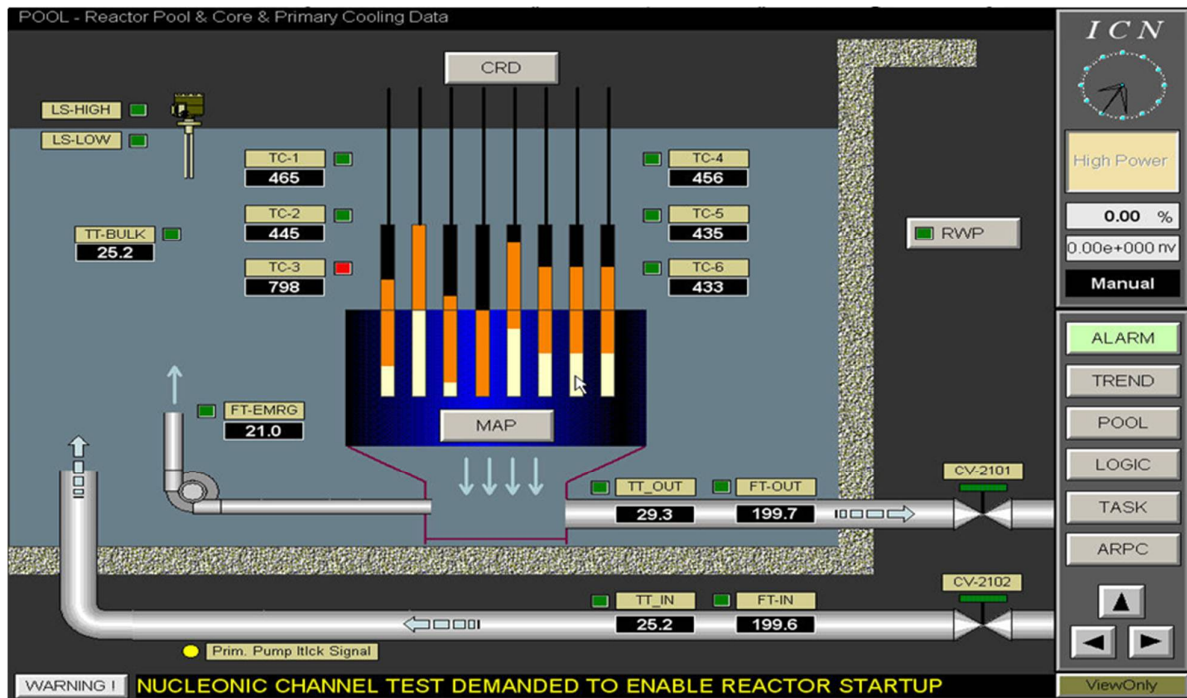


Fig. 3.20. Pagina de afișare a configurației curente a zonei active

3.7. Concluzii privind rolul și beneficiile sistemului de protecție a reactorului

Principalele roluri ale noului sistem de protecție al reactorului (RPS) sunt:

- Ia măsurile de protecție necesare în vederea opririi funcționării reactorului, de calmare și păstrare a materialelor radioactive și de minimizare a consecințelor unui accident nuclear;
- Controlează interblocările în vederea asigurării protecției împotriva operărilor eronate, atunci când condițiile necesare pentru operarea sigură nu au fost îndeplinite;
- Păstrează parametrii reactorului în limitele admise pentru operare, fără a atinge limitele de securitate;
- Furnizează și afișează operatorului de reactor suficientă informație pentru determinarea rapidă a stării sistemului de protecție (autodiagnoză), în vederea luării deciziilor corecte cu implicații în securitatea nucleară.

La proiectarea sistemului de protecție al reactorului s-a urmărit:

- Obținerea unei fiabilități ridicate;
- Minimizarea expunerii personalului pe durata operării reactorului;
- Clasificarea riguroasă a sistemelor din punct de vedere al securității nucleare;
- Criteriul defectării unice;
- Minimizarea posibilității apariției defectărilor de mod comun prin separarea fizică, independența funcțională și diversitatea echipamentelor utilizate;
- Utilizarea unor tehnologii certificate, calificate de experiență și teste și introducerea marginilor de securitate;
- Implementarea unor funcții de securitate nucleară intrinseci și ingineresti;
- Aplicarea unor concept de proiectare pentru obținerea stărilor de defectare sigură.

CAPITOLUL 4

ANALIZA MOTORULUI ASINCRON AL POMPEI DIN CIRCUITUL PRIMAR, ÎN REGIM PERMANENT

4.1. Introducere

Componentele unei instalații nucleare sunt supuse mai multor etape de verificare a funcționalității, unele dintre ele încă din faza de proiectare. Astfel, simulările funcționării instalațiilor cu ajutorul calculatoarelor și programelor de specialitate sunt o parte importantă a muncii de proiectare, necesară pentru atingerea standardelor de calitate din domeniul nuclear. Pentru că scenariul de accident nuclear în care s-a pierdut agentul de răcire, LOCA (Loss Of Coolant Accident), este foarte grav, existând riscul topirii miezului reactorului, este efectuată simularea funcționării pompelor din circuitele de răcire și cercetată intens.

Motorul asincron este folosit pentru pompele circuitului primar iar analiza acestor simulări în regim permanent poate fi efectuată prin următoarele metode:

- Utilizând ecuațiile de stare în care derivatele în raport cu timpul se anulează cu excepția ecuației de mișcare. Se integrează ecuația de stare corespunzătoare ecuației de mișcare pe un interval de timp (până când se obține regimul permanent);
- Se analizează complet simbolic circuitul echivalent pe o fază în regim sinusoidal. În felul acesta se pot obține mărimile caracteristice ale motorului (curenți, tensiuni, cuplul electromagnetic, pierderi Joule, puterea mecanică, factorul de putere etc) funcție de toți parametrii motorului $R_s, L_s, R'_r, L'_r, L_m, R_{Fe} = R_w$ și alunecarea s . Această analiză se efectuează cu programul ASINOM – Analiza Simbolică cu metoda Nodală Modificată [32];
- Analizând în regim tranzitoriu a circuitului echivalent corespunzător motorului de inducție (folosind ecuațiile de stare sau ecuațiile nodale modificate în regim dinamic (ecuațiile de semi-stare), în care rezistorul R'_r/s se consideră ca element de circuit parametric (variabil în timp)) până când se obține regimul permanent – metoda forței brute [32-34].

În toate cele trei proceduri se pot considera două cazuri:

1. Parametrii rotorici constanți în raport cu frecvența curenților rotorici;
2. Parametrii rotorici variabili cu frecvența curenților rotorici, datorită efectului pelicular.

Cele două cazuri se pot studia și când se consideră efectul saturației magnetice prin considerarea caracteristici neliniare de magnetizare $\phi = \hat{\phi}(i_m)$.

4.2. Ecuațiile de stare ale motorului de inducție în regim permanent sinusoidal

Ecuațiile în regim permanent sinusoidal se obțin din ecuațiile de stare în care se anulează derivatele de ordinul întâi în raport cu timpul, se păstrează ca variabilă independentă pulsația mecanică ω la axul rotorului și ecuația de mișcare se consideră identică cu ecuația (4.1,e). Prin urmare, ecuațiile, în regim permanent sinusoidal, devin:

$0 = -R_s \left(\frac{1}{\sigma L_s} \left(\phi_{sd} - \frac{L_m}{L_r'} \phi_{rd}' \right) \right) + \omega_s \phi_{sq} + \sqrt{2} U_1,$	(4.1,a)
$0 = -R_s \left(\frac{1}{\sigma L_s} \left(\phi_{sd} - \frac{L_m}{L_r'} \phi_{rd}' \right) \right) + \omega_s \phi_{sq} + \sqrt{2} U_1,$	(4.1,b)
$0 = -R_s \left(\frac{1}{\sigma L_s} \left(\phi_{sd} - \frac{L_m}{L_r'} \phi_{rd}' \right) \right) + \omega_s \phi_{sq} + \sqrt{2} U_1,$	(4.1,c)
$0 = -R_r' \left(\frac{1}{\sigma L_r'} \left(\phi_{rq}' - \frac{L_m}{L_s} \phi_{sq} \right) \right) - (\omega_s - \omega) \phi_{ra}'$	(4.1,d)
$\frac{d\omega}{dt} = \frac{3p^2}{2J} \left(\phi_{sd} \frac{1}{\sigma L_s} \left(\phi_{sq} - \frac{L_m}{L_r'} \phi_{rq}' \right) - \phi_{sq} \frac{1}{\sigma L_s} \left(\phi_{sd} - \frac{L_m}{L_r'} \phi_{rd}' \right) \right) - \frac{pM_r}{J},$	(4.1,e)
$\omega_2 = \omega_r = \omega_s - \omega.$	(4.1,e)

Cuplul electromagnetic se poate calcula cu una din relațiile:

$M = \frac{3p}{2} (\phi_{sd} i_{sq} - \phi_{sq} i_{sd}) = \frac{3p}{2} \left(\phi_{sd} \cdot \frac{1}{\sigma L_s} \left(\phi_{sq} - \frac{L_m}{L_r'} \phi_{rq}' \right) - \phi_{sq} \cdot \frac{1}{\sigma L_s} \left(\phi_{sd} - \frac{L_m}{L_r'} \phi_{rd}' \right) \right)$	(4.2)
$M = \frac{3p}{2} (\phi_{rd}' i_{rq}' - \phi_{rq}' i_{rd}') = \frac{3p}{2} \left(\phi_{rd}' \frac{1}{\sigma L_r'} \left(\phi_{rq}' - \frac{L_m}{L_s} \phi_{sq} \right) - \phi_{rq}' \cdot \frac{1}{\sigma L_r'} \left(\phi_{rd}' - \frac{L_m}{L_s} \phi_{sd} \right) \right)$	(4.3)

Curenții prin cele trei faze statorice i_A, i_B, i_C și curenții celor trei faze rotorice i_a', i_b', i_c' se pot exprima în funcție de curenții statorici și rotorici din axele d, q cu relațiile (4.4):

$i_A(t) = i_{ds}(t) \cdot \cos(\omega_1 t) - i_{qs}(t) \cdot \sin(\omega_1 t) + i_{0s}$	(4.4)
$i_B(t) = i_{ds}(t) \cdot \cos\left(\omega_1 t - \frac{2\pi}{3}\right) - i_{qs}(t) \cdot \sin\left(\omega_1 t - \frac{2\pi}{3}\right) + i_{0s}$	
$i_C(t) = i_{ds}(t) \cdot \cos\left(\omega_1 t + \frac{2\pi}{3}\right) - i_{qs}(t) \cdot \sin\left(\omega_1 t + \frac{2\pi}{3}\right) + i_{0s}$	
de regula $i_{0s} = 0,$	
$i_a'(t) = i_{dr}'(t) \cdot \cos((\omega_1 - \omega)t) - i_{qr}'(t) \cdot \sin((\omega_1 - \omega)t) + i_{0r}$	
$i_b'(t) = i_{dr}'(t) \cdot \cos\left((\omega_1 - \omega)t - \frac{2\pi}{3}\right) - i_{qr}'(t) \cdot \sin\left((\omega_1 - \omega)t - \frac{2\pi}{3}\right) + i_{0r}$	
$i_c'(t) = i_{dr}'(t) \cdot \cos\left((\omega_1 - \omega)t + \frac{2\pi}{3}\right) - i_{qr}'(t) \cdot \sin\left((\omega_1 - \omega)t + \frac{2\pi}{3}\right) + i_{0r}$	
de regula $i_{0r} = 0.$	

4.3. Analiza în regim permanent sinusoidal când se utilizează schema echivalentă și programul ASINOM – analiza simbolică cu metoda nodală modificată

Analiza în regim permanent am efectuat-o pe un motor asincron ale cărui caracteristici sunt date de producător: $P_n = 100$ kW; $U_n = 560$ V; $I_n = 130$ A; $f_{1n} = 60$ Hz; $n_1 = 1200$ r/m; $s_n = 2,6$ %; $m_p = M_p/M_n = 1.1$; $m_n = M_{max}/M_n = 1.8$; $\cos\varphi_n = 0.87$; $i_p = I_p/I_n = 3$; conexiune stea; $U_{fn} = 323.32$ V; $I_{fn} = 130$ A.

Parametrii acestui motor sunt: $Z_b = Z_n = U_{fn}/I_{fn} = 2.48 \Omega$; $R_s = 0.053 \Omega$; $R'_r = 0.0657 \Omega$; $L_{s\sigma} = 1.034$ mH; $L'_{r\sigma} = 0.955$ mH; $L_\mu = 28.1$ mH.

Reactanțele la 50 de Hz sunt: $X_{s\sigma} = 0.39 \Omega$; $X'_{r\sigma} = 0.36 \Omega$; $X_\mu = 10.59 \Omega$.

Parametrii în unități relative au valorile: $r_s = 0.0214$; $r'_r = 0.0262 \cong s_n = 0.026$; $x_{s\sigma} = X_{s\sigma}/Z_n = 0.157$; $r'_{r\sigma} = X'_{r\sigma}/Z_n = 0.145$; $x_\mu = X_\mu/Z_n = 4.57$.

Inductivitățile ciclice sunt: $L_s = L_{s\sigma} + L_\mu = 29.134$ mH; $L'_r = L'_{r\sigma} + L_\mu = 29.055$ mH; $L_\mu = L_m = 28.1$ mH.

Se calculează puterea aparentă $S_n = 128094.8$ VA; cuplul nominal $M_n = 817$ Nm; curentul de mers în gol $I_{s0} \cong U_{fn}/X_\mu = 30.53$ A; $i_{s0} = I_{s0}/I_{fn} = 0.235 = 23.5\%$ și turatia nominală $n_n = n_1(1 - s_n) = 1168.8$ rot/min. Momentul de inerție $J = 3.38$ kg.m².

Parametrii electrici ai rotorului motorului considerat au expresiile din relația 4.6:

$\sqrt{\omega_{rx}} = 9$; $L_s = 0.029134$ H ; $R_s = 0,053\Omega$; $L_\mu = 0,0281$ H ;	(4.6)
$L'_r = 0,0281 + \begin{cases} 0,000955H ; & \omega_r \in (0; 81) \\ 0,000155 + 0,0072 \frac{1}{\sqrt{\omega_r}} ; & \omega_r > 81 ; \quad \omega_r \leq \omega_1 = 120\pi \end{cases}$	
$R'_r(\omega_r) = \begin{cases} 0,065434 ; & \omega_r \in (0; 81) \\ 0,000904 + 0,00717 \sqrt{\omega_r} ; & \omega_r > 81 ; \quad \omega_r \leq \omega_1 = 120\pi \end{cases}$	

Parametrii rotorului se consideră la început constanți în raport cu frecvența și apoi sunt considerați variabili. Fișierul de intrare are structura următoare:

8	3 4 L3	3 6 L6
6	4 5 R4	3 6 R7
1 2 R1	5 6 R5	6 1 e8
2 3 L2		

În figura 4.2,a este prezentată dependența cuplului motorului atunci când parametri rotorului sunt constanți cu frecvența iar în figura 4.2b atunci când aceștia sunt variabili.

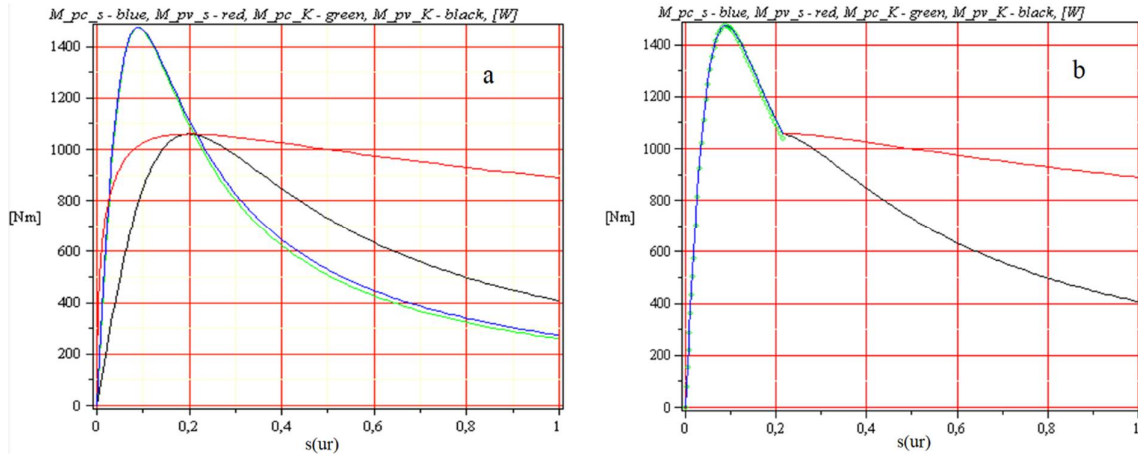


Fig. 4.2. Cuplul motorului asincron atunci când parametri rotorului sunt constanți (a) și variabili (b)

În figura 4.3 este prezentată evoluția curenților electrici prin componentele motorului asincron atunci când alunecarea este variabilă sau constantă.

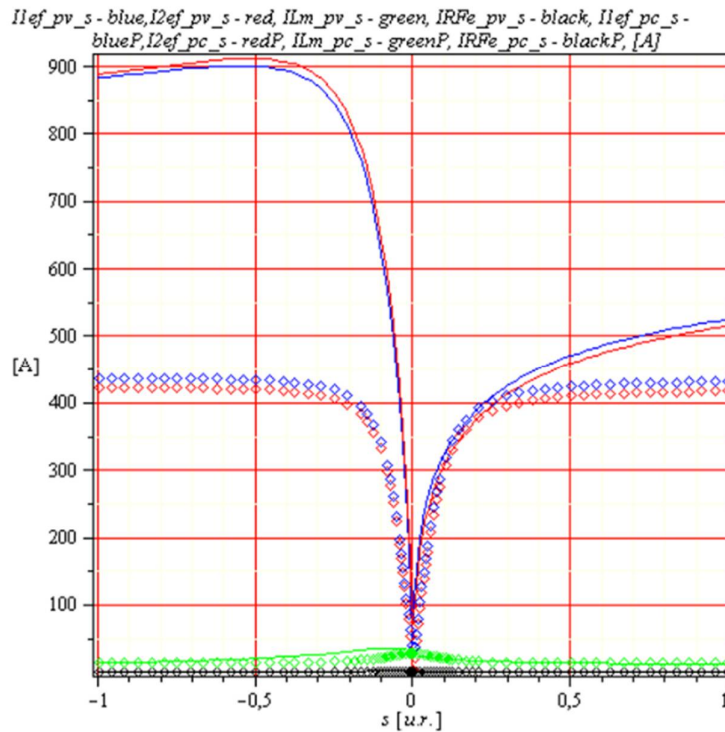


Fig. 4.3. Intensitățile curenților electrici prin componentele motorului asincron

Variația puterii motorului asincron în funcție de parametri rotorului și alunecarea constantă sau variabilă este prezentată în figura 4.4.

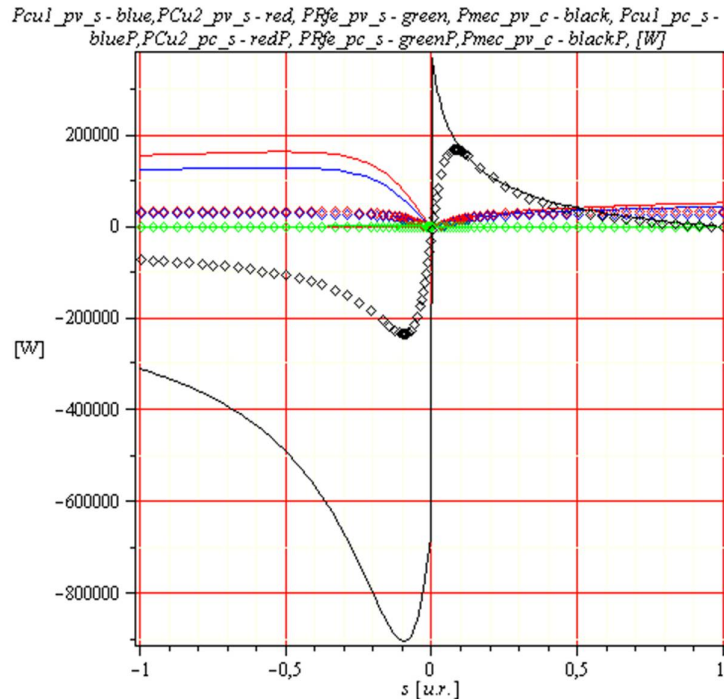


Fig. 4.4. Variația puterii motorului asincron în funcție de alunecarea variabilă sau constantă

Rezultatele obținute prin simularea motorului asincron în regim permanent sinusoidal, utilizând schema echivalentă a motorului din figura 4.1, ne permit determinarea unor diferențe între rezultate.

4.4. Analiza în regim permanent sinusoidal când se utilizează ecuațiile de stare în mediul de programare Matlab

Regimul permanent sinusoidal al motorului asincron este analizat cu ajutorul programelor PACEN – Program de Analiză a Circuitelor Electrice Neliniare, [28] și PGESEST – Program de Generare Simbolică a Ecuațiilor de Stare, [34].

Rulând programul Matlab, care integrează ecuația (4.1,e), se obțin rezultatele prezentate în figurile 4.5 – 4.12 unde în partea stângă, notate cu (a) sunt dependența valorilor atunci când parametrii L'_r și R'_r sunt constanți în raport cu pulsația curenților rotorici ω_r , iar în dreapta, notate cu (b) valorile când parametrii L'_r și R'_r sunt variabili în raport cu pulsația curenților rotorici ω_r . În figura 4.5 este prezentată dependența pulsației în funcție de timp pentru parametri L'_r și R'_r constanți (4.5a) și variabili (4.5b).

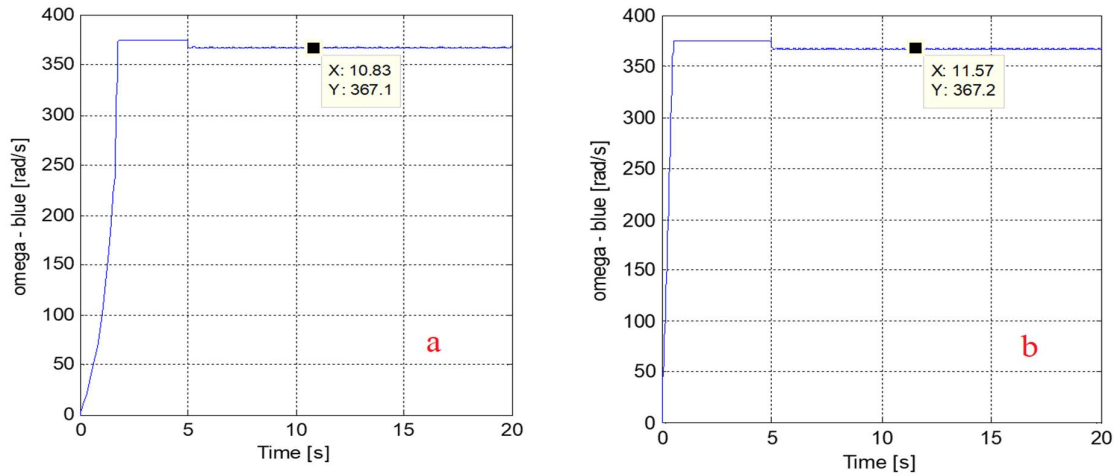


Fig. 4.5. Pulsația în funcție de timp pentru parametrii L'_r și R'_r constanți (a) și variabili (b)

Pulsația rotorului în funcție de cele două situații studiate este prezentată în figura 4.6.

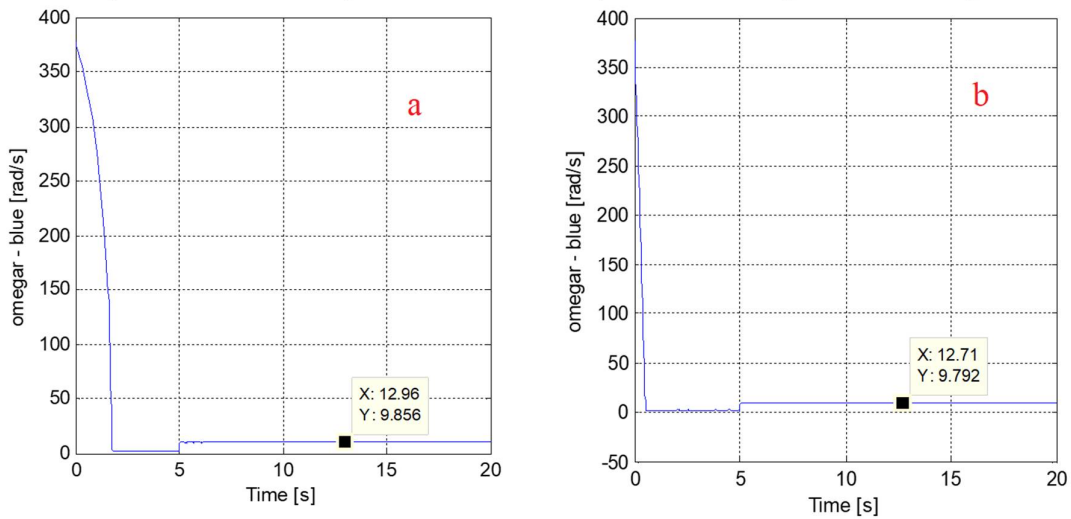


Fig. 4.6. Pulsația rotorului în funcție de timp pentru parametrii L'_r și R'_r constanți (a) și variabili (b)

În figura 4.7a este prezentată dependența curentului statorului atunci când parametri sunt constanți și aceeași dependență în figura 4.7b dacă sunt variabili. Aceleași dependențe sunt prezentate pentru curentul rotorului în figura 4.8.

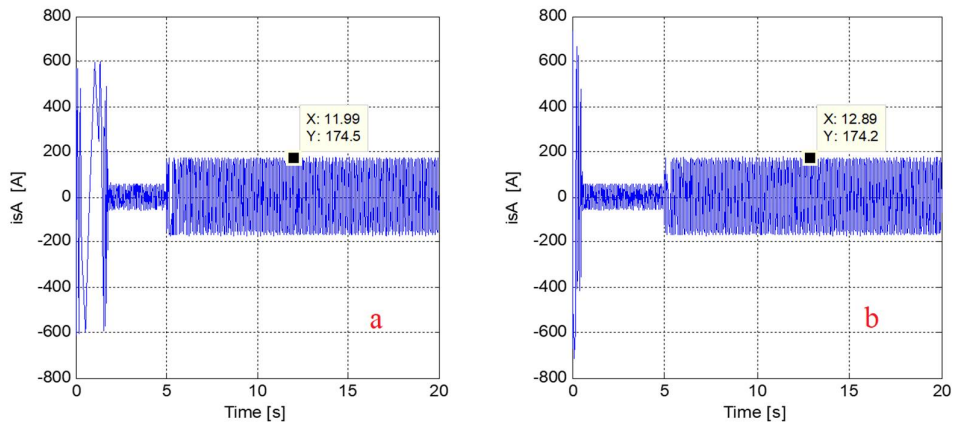


Fig. 4.7. Curentul statorului în funcție de timp pentru parametri constanți (a) și variabili (b)

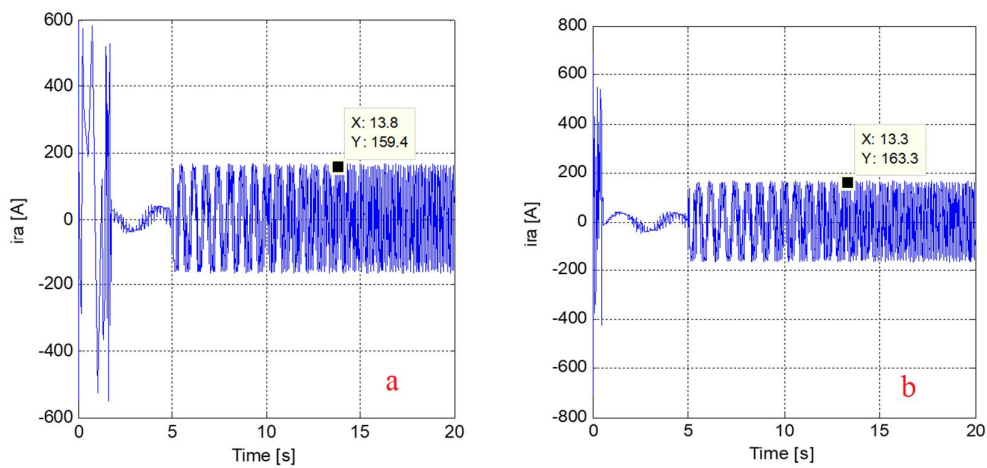


Fig. 4.8. Curentul rotorului în funcție de timp pentru parametri constanți (a) și variabili (b)

Turația rotorului în cele două situații analizate este prezentată în figura 4.9.

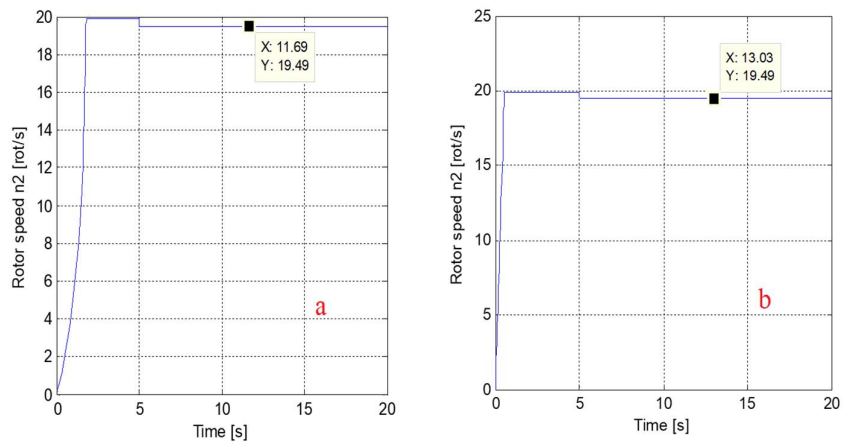


Fig. 4.9. Turația rotorului pentru parametri constanți (a) și variabili (b)

4.5. Analiza în regim dinamic când se utilizează ecuațiile de stare în mediul de programare Matlab.

Se consideră momentul de inerție $J = 60 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $f_r = 60 \text{ Hz}$ și cuplul rezistent variază conform cu relația (4.13), iar parametrii rotorici variază cu frecvența rotorică conform cu expresiile (4.11). Cuplul rezistent M_r variază cu turația rotorică n conform relației 4.8.

$$M_r = \begin{cases} 800, & \text{pentru } n \in [0, 1] \\ 800 - 100 \cdot (n - 1), & \text{pentru } n \in (1, 5] \\ 400, & \text{pentru } n > 5; n \rightarrow \text{rot/s}; M \rightarrow \text{Nm} \end{cases} \quad (4.8)$$

Rutina `ec_difma_J60_F30_MrV_PV.m` și programul principal `Test_MA_lin_N_MrVn1.m` (ambele în Matlab) sunt prezentate în Anexa A. Rulând programul `Test_MA_J60_F30_MrV_PV.m` s-au obținut graficele prezentate în figurile 4.14 – 4.35.

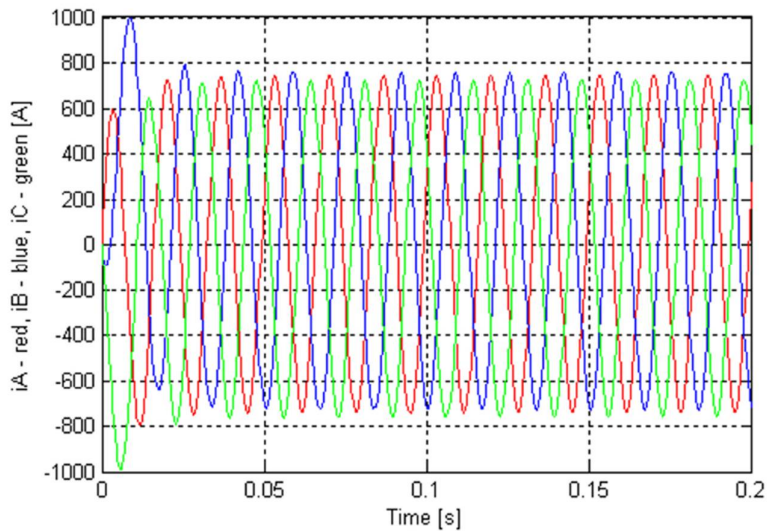


Fig. 4.14. Simularea evoluției curenților în intervalul 0-0,2s

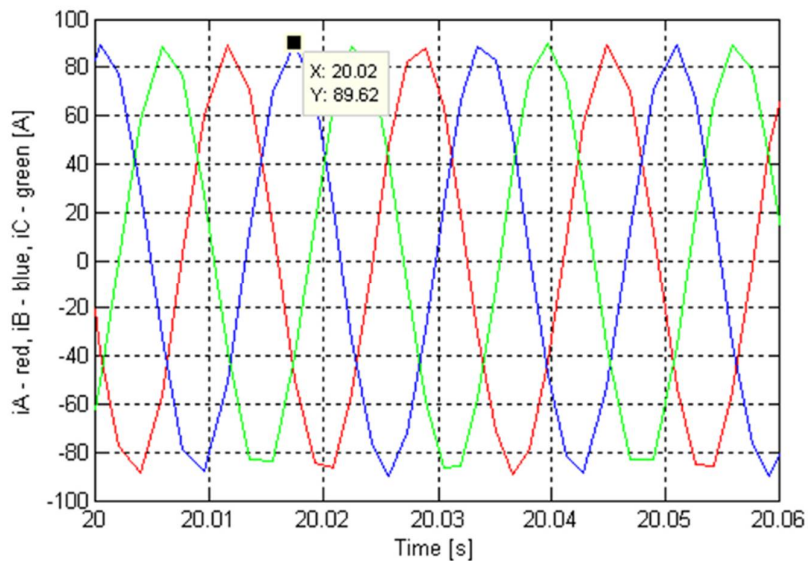


Fig. 4.15. Simularea evoluției curenților în intervalul de timp 20-20,6s

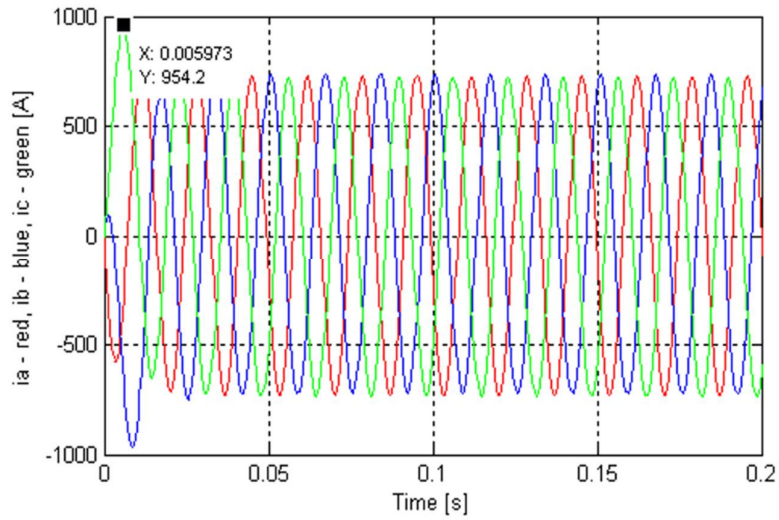


Fig. 4.16. Simularea evoluției curenților în intervalul de timp 0-0,2s

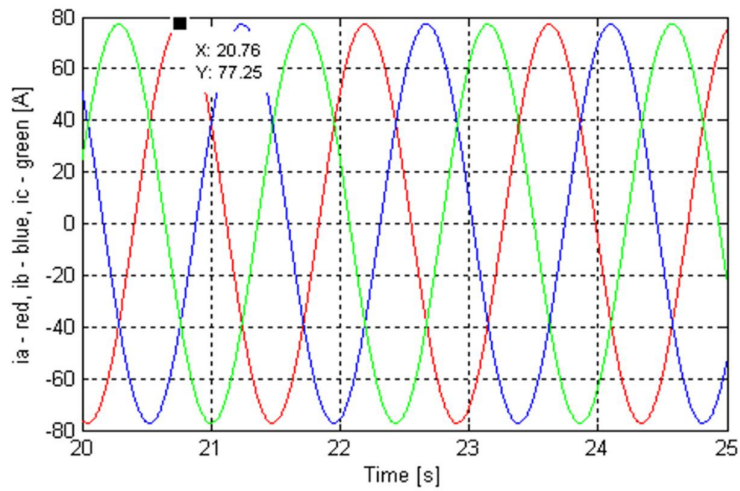


Fig. 4.17. Simularea evoluției curenților electrici în intervalul 20-25s

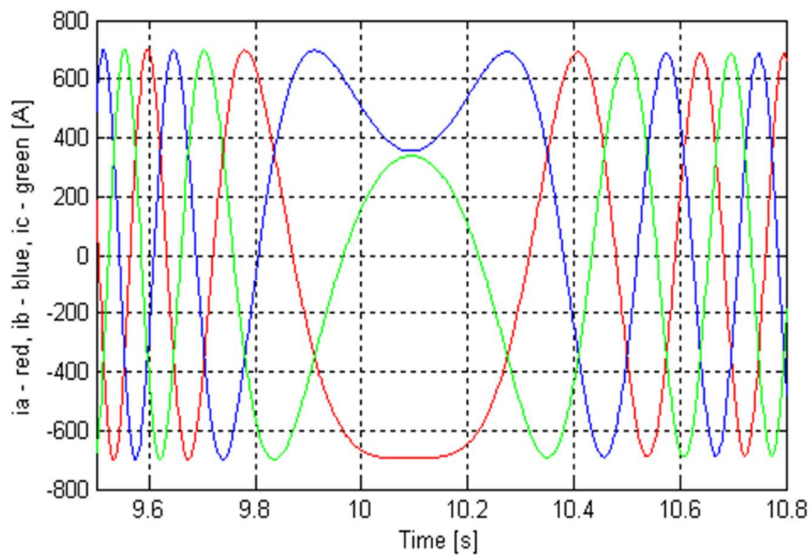


Fig. 4.18. Simularea evoluției curenților în intervalul 9,4-10,8s

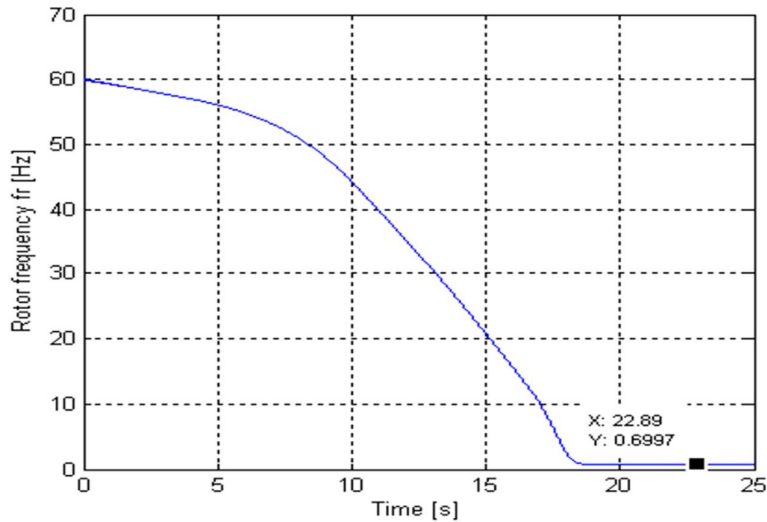


Fig. 4.19. Dependența frecvenței rotorului în intervalul de timp 0-25s

4.6. Analiza în regim permanent a motorului asincron cu metoda forței brute

Pentru analiza în regim permanent a motorului asincron cu metoda forței brute se utilizează ecuațiile de stare pentru circuitul echivalent din figura 4.36, în care se ia în considerare fenomenul de saturație. Bonina neliniară L_m se consideră controlată în curent (c.i.), iar rezistorul R_5 este rezistor parametric (variabil în timp).

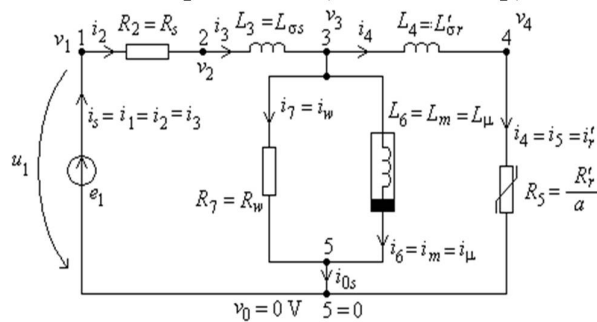


Fig. 4.36. Circuitul echivalent al motorului asincron.

Caracteristica de magnetizare neliniară $\phi_{Lm}(i_{Lm})$ este dată prin puncte (fig. 4.37, a) și caracteristică $R_2(t) = R'_{r/s}(t)$ a rezistorului parametric R_2 este dată de asemenea prin puncte (fig. 4.37, b).

Structura ecuațiilor nodale corespunzătoare momentului de timp $t_{j+1} = t_j + h$ (h fiind pasul de timp) și iterația $k + 1$.

NECUNOSCUTELE SISTEMULUI

V1(j+1)	V2(j+1)	V3(j+1)	V4(j+1)	I1(j+1)	I6(j+1)
---------	---------	---------	---------	---------	---------

SISTEMUL DE ECUAȚII

$$\begin{aligned}
 & + (+G2)*V1(j+1) + (-G2)*V2(j+1) + (-1)*I1(j+1) = 0 \\
 & + (-G2)*V1(j+1) + (+G2+h/L3)*V2(j+1) + (-h/L3)*V3(j+1) = -I3(j) \\
 & + (-h/L3)*V2(j+1) + (+h/L3+h/L4+G7)*V3(j+1) + (-h/L4)*V4(j+1) + (+1)*I6(j+1) = \\
 & +I3(j)-I4(j) \\
 & + (-h/L4)*V3(j+1) + (+h/L4+Gp5)*V4(j+1) = +I4(j) \\
 & + (-1)*V1(j+1) = -E1(j+1)
 \end{aligned}$$

+ (+1)*V3(j+1) + (-Ld6(s)(j+1)/h)*I6(j+1) = -F6(s)(j+1)/h-Ld6(s)(j)*I6(j)/h-F6(s)(j)/h
 Se consideră frecvența $f_1 = 50$ Hz și alta caracteristică de magnetizare (fig. 4.38, a).

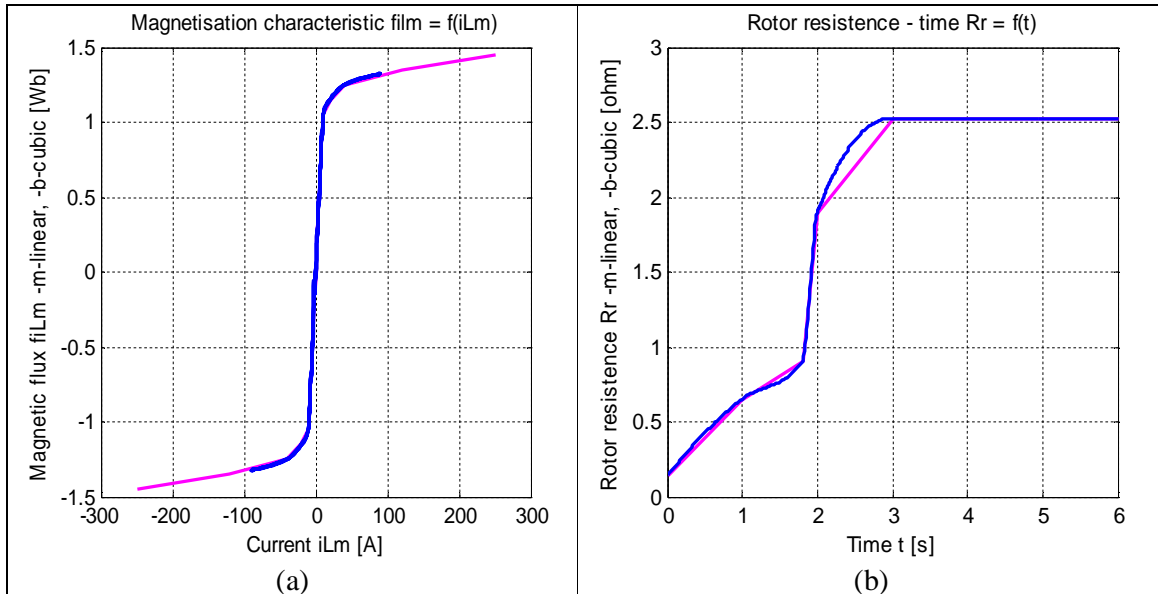
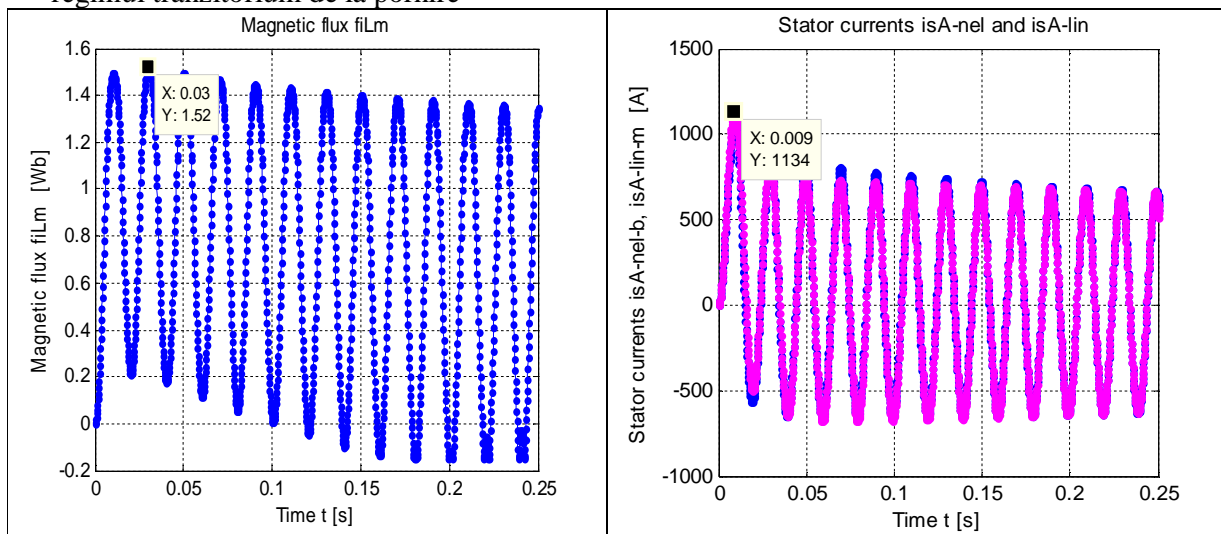
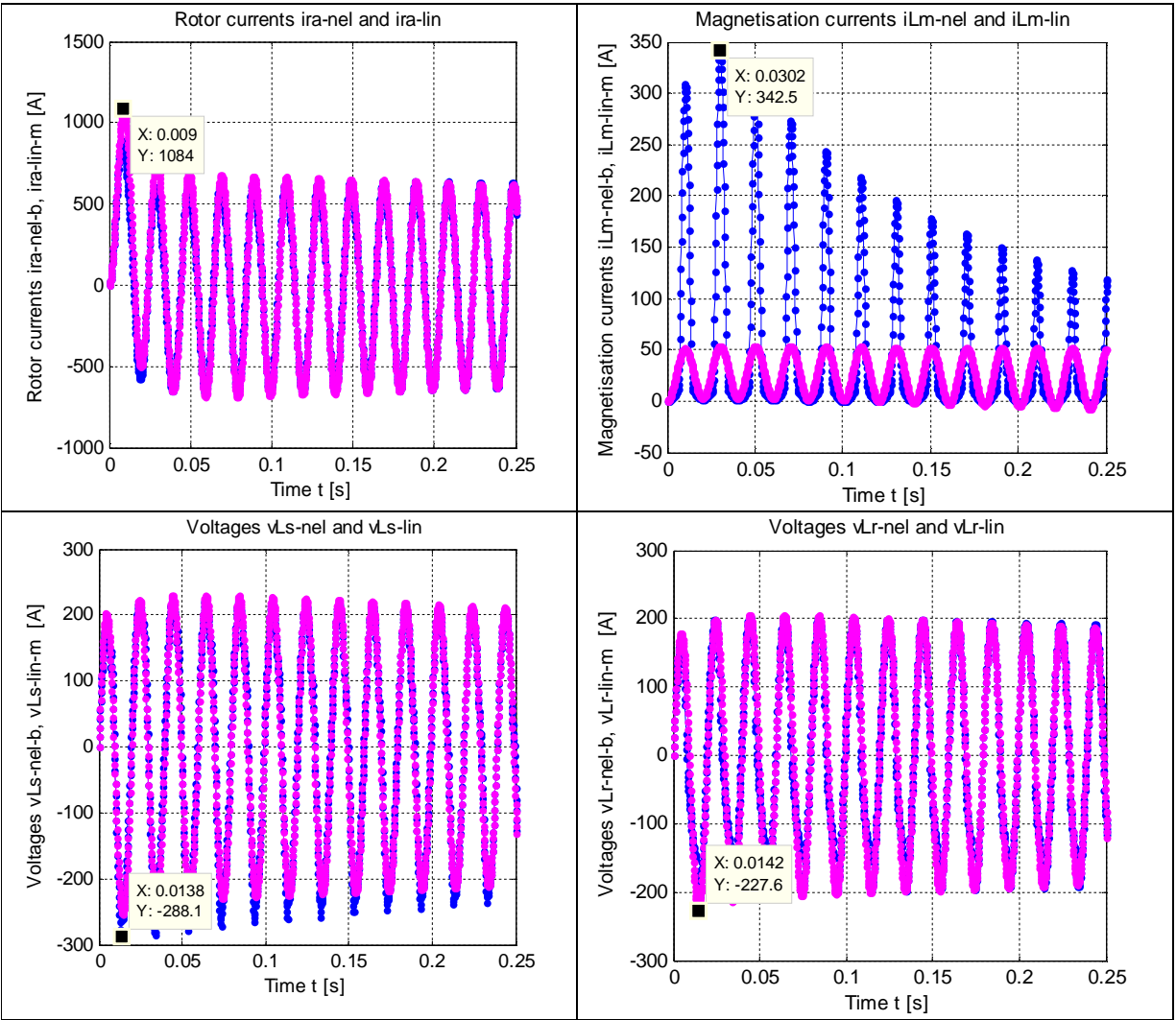


Fig. 4.37. a) Caracteristica $\phi_{Lm}(i_{Lm}) = \phi_{L6}(i_{L6})$ și b) Caracteristica $R_2(t)$.

Variațiile în timp ale mărimilor caracteristice motorului asincron în regimul tranzitoriu de la pornire (primele momente de timp) se dau în Tabelul 4.3.

Tabelul 4.3. Variațiile în timp ale mărimilor caracteristice motorului asincron în regimul tranzitoriu de la pornire





4.7. Observații și concluzii

Rezultatele obținute prin simularea motorului asincron în regim tranzitoriu, utilizând ecuațiile de stare pentru circuitul din figura 4.1, caracteristica de magnetizare $F_{iLm} - i_{Lm}$, caracteristica $R_4 + R_5 = R'_r/s$ - timp (de fapt, R'_r/s funcție de s , $s = a$) și programul Matlab, prezentate în Tabelele 4.3 și 4.4, conduc la următoarele concluzii:

- Scopul simulării motorului asincron în regim dinamic este acela de a obține, după un timp de integrare suficient de mare, regimul permanent (sinusoidal) – metoda forței brute [30]. Mărimile corespunzătoare regimului dinamic sunt marcate în figurile redatăe în Tabelul 4.3;
- Considerând caracteristica de magnetizare $F_{iLm} - i_{Lm}$, caracteristica $R_4 + R_5 = R'_r/s$ - timp (de fapt, R'_r/s funcție de s) și programul Matlab, s-a reușit cu programul Pacen să se evidențieze prezența armonicilor (folosind rutina *fft* – *fast Fourier transform* din mediul de programare Matlab) în variația curenților și tensiunilor laturilor circuitului din figura 4.1;
- Tensiunile de la bornele celor trei inductivități u_{Ls} , u_{Lr} și u_{Lm} sunt mult mai deformante decât curenții corespunzători, aceasta se datorează faptului că în expresia acestor densități apar derivatele curenților (prin derivare crește gradul de deformare);

- Amplitudinele armonicilor superioare la curenți sunt sub 5% din armonica fundamentală, pe când armonici le tensiunilor de la bornele celor trei bobine ajug și la 38%;
- Aproximând caracteristica de magnetizare neliniară $F i_{Lm} - i_{Lm}$ și caracteristica $R_4 + R_5 = R'_{\sigma}/s$ - timp (de fapt, R'_{σ}/s funcție de s , $s = a$) - element de circuit parametric (variabil în timp) prin puncte (care de regulă, sunt obținute experimental) permite programului Pacen să analizeze astfel de circuite și să scoată în evidență fenomenele nedorite produse de fenomenul de saturație – pierderi Joule și mai ales pierderi în fier suplimentare. Acestea, conduc la reducerea factorului de putere și a randamentului.

CAPITOLUL 5

ESTIMAREA PARAMETRILOR MOTORULUI ASINCRON UTILIZÂND METODA PĂTRATULUI ERORII MĂRIMII DE LA IEȘIRE (FUNCȚIA DE TRANSFER)

5.1. Introducere

Metodele clasice de estimare a parametrilor diferă de la o aplicație la alta. De exemplu, pentru motoarele de inducție, metodele clasice sunt bazate pe rezultatele obținute în urma testelor efectuate pe motoarele asincrone cu rotorul blocat sau în gol (fără sarcină). O astfel de metodă de determinare (estimare) a parametrilor este, uneori, inadecvată pentru inițializarea unui motor asincron folosit în acționările electrice. Pentru a simplifica procesul de inițializare, parametrii motorului pot fi estimați din datele de fabricație (de catalog) printr-un procesor de acționare. Într-una din aceste metode, parametrii motorului sunt identificați din datele de catalog cu o metodă numerică [36]. Această metodă de estimare a parametrilor off-line necesită un calculator și un soft care să efectueze aceste calcule. În această metodă, valorile inițiale ale parametrilor motorului sunt calculate cu anumite aproximații (ipoteze). După aceea, fiecare parametru este schimbat de la valoarea lui inițială la zero cu pașii mici. Mărimea pasului determină acuratețea procedurii. Pentru fiecare combinație posibilă de parametrii se utilizează circuitul echivalent exact al mașinii de inducție și se calculează puterea mecanică și puterea reactivă la sarcină nominală și la întreruperea bruscă a cuplului. Rezultatele obținute prin aceste calcule sunt comparate cu cele furnizate de constructor și se notează anumite diferențe (erori) constatate. După aceea, fiecare eroare este ponderată în concordanță cu importanța calculelor utilizatorului metodei. Se calculează ponderea totală a erorilor pentru fiecare combinație posibilă. Metoda este finalizată cu selectarea parametrilor motorului, folosind criteriul – *ponderii erori minime*.

5.2. Descrierea metodei funcțiilor de transfer

Fie un circuit liniar (un sistem liniar) care funcționează în domeniul frecvenței. În acest caz se poate genera orice funcție de transfer care descrie funcționarea circuitului considerat. Modelul de circuit selectat conține numai elemente de circuit concentrate și posibile surse independente de tensiune sau/și de curent (semnale de intrare). Acest tip de circuit este descris, în regim tranzitoriu, de un sistem de ecuații diferențiale liniare. Utilizând transformata Laplace sau transformata Fourier aceste ecuații diferențiale se pot schima în ecuații algebrice liniare în domeniul frecvenței.

Orice circuit diport liniar pasiv, care funcționează în regim permanent (în domeniul frecvenței), poate fi descris de două ecuații algebrice în care se consideră ca variabile independente două din cele patru variabile asociate celor două porți, iar celelalte variabile sunt considerate variabile dependente, după cum urmează:

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix}. \quad 5.1)$$

Coeficienții ecuațiilor (4.8) sunt funcții de transfer (circuit) care depind de parametrii circuitului și de frecvența complexă s sau $j\omega$. În funcție de natura mărimilor de intrare și

mărimilor de ieșire se pot defini diferite funcții de circuit în raport cu cele două porți, după cum urmează: Z, Y, H, S , parametrii fundamentali A, B, C și D etc.

Pornind de la schema echivalentă a unui circuit analogic în regim sinusoidal se poate genera orice funcție de transfer complexă $H(j\omega)$ în formă complet simbolică, parțial – simbolică sau numerică. Modulul și faza funcției de transfer complexă pot fi măsurate prin alimentarea circuitului (sistemului) cu o sursă de tensiune de frecvență variabilă.

Fie $H(f)$ funcția de transfer (o mărimea de ieșire sau o anumită mărime de performanță a sistemului - putere utilă, randament etc) generată, în formă complet (full) simbolică, cu ajutorul programului Asinom sau a programului Gsimft [58, 59]. Presupunem că parametrii circuitului (sistemului, motorului asincron) care urmează a fi identificați (estimați) sunt: x_1, x_2, \dots, x_p (p fiind numărul de parametri necunoscuți), celorlalți $n - p$ parametri li se atribuie valorile nominale (de catalog). Se consideră k eșantioane de frecvență la care se măsoară (simulează) funcția de circuit considerată.

Se formulează următoarea funcție obiectiv:

$$f_j(x_1, x_2, \dots, x_p, f_j) = (|H(f_j)| - |H(f_j, x_1, x_2, \dots, x_p)|)^2, \quad j = \overline{1, k}, \quad (5.2)$$

în care funcția obiectiv este un vector cu k componente, sau

$$f(x_1, x_2, \dots, x_p) = \sum_{j=1}^k (|H(f_j)| - |H(f_j, x_1, x_2, \dots, x_p)|)^2. \quad (5.3)$$

când funcția obiectiv este un scalar, în acest caz k poate fi egal și cu unu.

De regulă, mărimea $H(f)$ este o funcție rațională de frecvență. Coeficienții polinoamelor de la numărătorul și numitorul funcției de transfer (mărimii de ieșire) sunt complecși, formați din produse ale parametrilor circuitului (sistemului). În aceste produse fiecare parametru al circuitului (sistemului) apare o singură dată la puterea unu, când circuitul este liniar, și la puteri mai mari decât unitatea, când sistemul analizat este neliniar.

5.3. Estimarea parametrilor unui motor asincron pe baza funcțiilor de transfer

Pentru determinarea impedanței complexe de intrare $Z_{ii} = Z_{1_5_1_5}$ se utilizează schema echivalenta pe o fază a unui motor asincron reprezentată în figura 5.1.

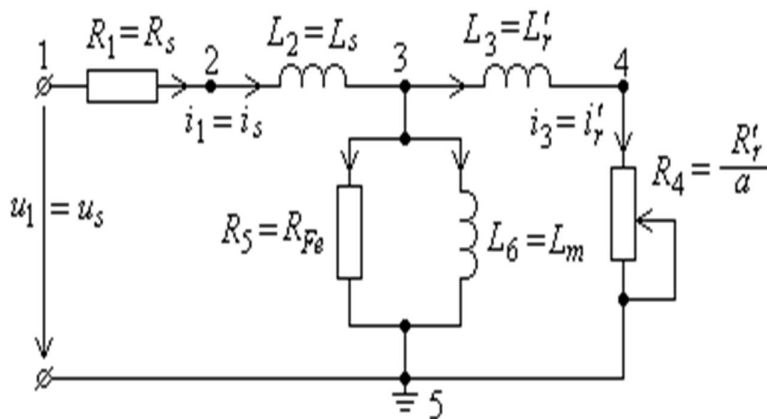


Fig. 5.1. Schema echivalentă a motorului asincron monofazat

Se consideră, ca exemplu, motorul asincron cu următoarele date nominale: $P_n = 5.5$ kW; $U_n = 230$ V/400 V; $I_n = 22.5$ A/ 13.2 A; $f_n = 50$ Hz; $n_1 = 750$ r/m; $a_n = 9,6$ %; $m_p = 1$; $m_n = 1,8$; $\cos\phi_n = 0,74$; $R_s = 1.07131$ ohmi - obținută prin măsurare directă, $R'_r = 1.2951$ ohmi;

$L_s = 0.00835$ H; $L'_r = 0.04543$ H; $L_m = 0.1070573$ H, $R_{Fe} = 250.0$ ohmi. Structura Programul de identificare a parametrilor motorului asincron are următoarea structură:

> **restart;Digits:=8;with(linalg);**

Fisierul de intrare, *Senz_motor_as.crt*, are structura:

```
7
5
1 2 R1
2 3 L2
3 4 L3
4 5 R4
3 5 R5
3 5 L6
```

În figura 5.2 sunt prezentate fotografiile ale ferestrelor de utilizare ale programelor GESIFT și ASINOM.

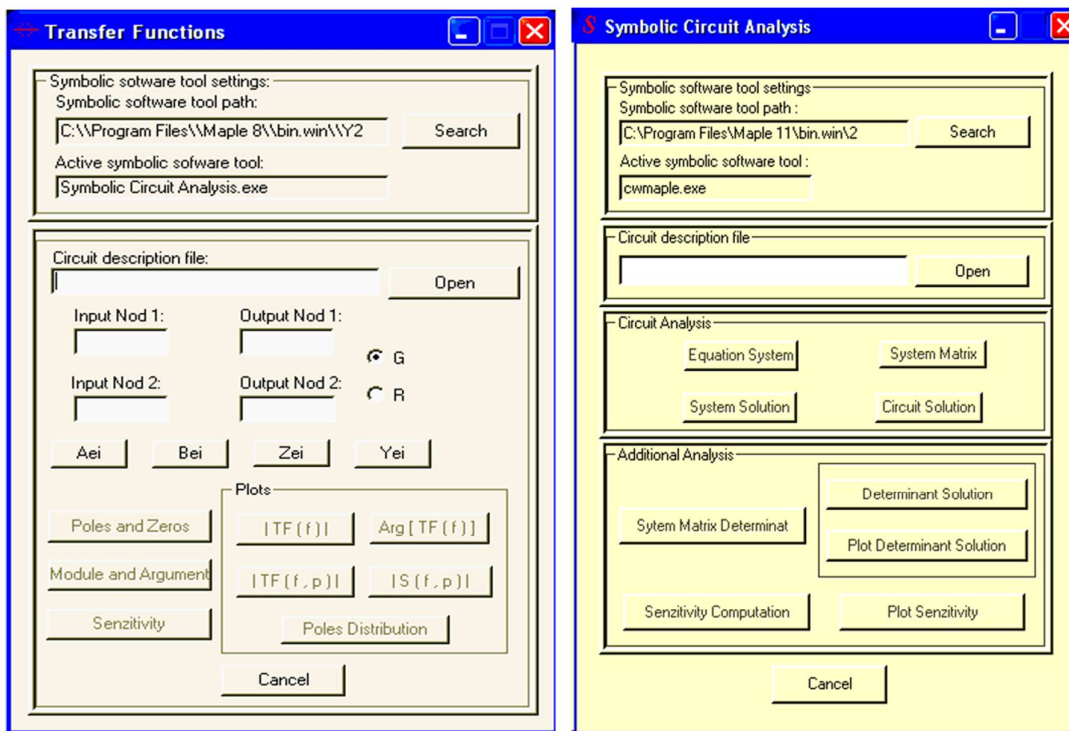


Fig. 5.2. Fereastra de utilizare a programului GESIFT (stânga) și ASINOM (dreapta)

Calculul sensibilităților în raport cu parametrii motorului asincron

Se consideră ca funcție de transfer impedanța de intrare $Z_{ii} = Z_{1_5_1_5}$. Pentru identificarea parametrilor unui sistem este foarte important să se cunoască variațiile cu frecvența ale sensibilităților funcțiilor de transfer utilizate, deoarece valorile parametrilor care determină valori foarte mici ale sensibilităților conduc la convergența foarte slabă a algoritmilor utilizați în rezolvarea sistemelor de ecuații algebrice neliniare.

Sensitivitatea normalizată a unei funcții de transfer H în raport cu un parametru oarecare x al sistemului analizat se calculează cu formula 5.10.

$$S_x^H = S_s(H, x) = \frac{\partial H}{\partial x} \cdot \frac{x}{H} \quad (5.10)$$

Când semnalele de intrare sunt sinusoidale, funcția de circuit $H(j\omega)$ a unui circuit liniar se poate exprima astfel:

$$H(j\omega) = |H(j\omega)|e^{j\phi} \text{ sau } \ln H(j\omega) = \ln|H(j\omega)| + j\phi, \quad (5.11)$$

Unde: $A(\omega) = \ln|H(j\omega)|$ este funcția amplitudine, iar $\phi = \arg(H(j\omega))$ reprezintă funcția fază. dacă x este un parametrul de circuit dat, atunci se poate defini sensibilitatea amplitudinii (5.12):

$$S_s(A(\omega), x) = x \frac{\partial A(\omega)}{\partial x} \quad (5.12)$$

și sensibilitatea fazei (5.13):

$$S_s(\phi(\omega), x) = x \frac{\partial \phi(\omega)}{\partial x}. \quad (5.13)$$

Sensibilitatea normalizată a funcției de circuit $F(j\omega)$, $S(F(j\omega), x)$, satisface relația (5.14).

$$S(H(j\omega), x) = \frac{\partial(\ln H(j\omega))}{\partial(\ln x)} = \frac{\partial(A(\omega) + j\phi(\omega))}{\partial x/x} = \frac{\partial A(\omega)}{\partial x/x} + j \frac{\partial \phi(\omega)}{\partial x/x}. \quad (5.14)$$

În consecință, sensibilitatea amplitudinii și sensibilitatea fazei se pot exprima în funcție de sensibilitatea funcției de circuit $S(F(j\omega), x)$ (5.15):

$$S_s(A(\omega), x) = \text{Re}\{S(H(j\omega), x)\} \text{ și } S_s(\phi(\omega), x) = \text{Im}\{S(H(j\omega), x)\}. \quad (5.15)$$

> restart; Digits:=8; with(linalg):% Pentru calculul sensibilităților relative normalizate s-a folosit expresia impedanței de intrare $Z_{1.5.1.5.f}$ și formulele (5.8) și (5.13). Se prezintă, ca exemple, calculul sensibilităților relative normalizate în raport cu parametrii R_1 și L_2 .

> SZ_R1:=collect(simplify(diff(Z1_5_1_5_f,R1)*R1/Z1_5_1_5),f):

>

SZA_R1:=simplify(subs(R1=1.07131,R2=1.2951,L2=0.008354,L3=0.04543,L6=0.107057,3,R5=250,a=0.098,evalc(Re(SZ_R1)))):

>

SZPh_R1:=simplify(subs(R1=1.07131,R2=1.2951,L2=0.008354,L3=0.04543,L6=0.107057,3,R5=250,a=0.098,evalc(Im(SZ_R1)))):

> SZ_L2:=collect(simplify(diff(Z1_5_1_5,L2)*L2/Z1_5_1_5),f):

>

SZA_L2:=simplify(subs(R1=1.07131,R2=1.2951,L2=0.008354,L3=0.04543,L6=0.107057,3,R5=250,a=0.098,evalc(Re(SZ_L2)))):

>

SZPh_L2:=simplify(subs(R1=1.07131,R2=1.2951,L2=0.008354,L3=0.04543,L6=0.107057,3,R5=250,a=0.098,evalc(Im(SZ_L2)))):

> with(plots):

Fs:=plot(SZA_R1,f=0.0..120.0,style=line,color=blue):

Gs:=plot(SZA_L2,f=0.0..120.0,style=line,color=red):Hs:=plot(SZA_L3,f=0.0..120.0,style=line,color=green):Fs1:=plot(SZA_R2,f=0.0..120.0,style=line,color=cyan):Gs1:=plot(SZA_R5,f=0.0..120.0,style=line,color=black):Hs1:=plot(SZA_L6,f=0.0..120.0,style=line,color=brown):Hs2:=plot(SZA_a,f=0.0..120.0,style=line,style=point,color=violet):display({Fs,Gs,Hs,Fs1,Gs1,Hs1,Hs2},axes=boxed,title=`SZA_R1-blue,SZA_Ls1-red,SZA_Ls2-green,SZA_R2-cyan,SZA_RFe-black,SZA_Lm-brown,SZA_a-violetp`);

with(plots):

Fs:=plot(SZPh_R1,f=0.0..120.0,style=line,color=blue):

Gs:=plot(SZPh_L2,f=0.0..120.0,style=line,color=red):Hs:=plot(SZPh_L3,f=0.0..120.0,style=line,color=green):Fs1:=plot(SZPh_R2,f=0.0..120.0,style=line,color=cyan):Gs1:=plot(SZPh_R5,f=0.0..120.0,style=line,color=black):Hs1:=plot(SZPh_L6,f=0.0..120.0,style=line,color=brown):Hs2:=plot(SZPh_a,f=0.0..120.0,style=line,style=point,color=violet):display({Fs,Gs,Hs,Fs1,Gs1,Hs1,Hs2},axes=box

ed,title='SZPh_R1-blue,SZPh_Ls1-red, SZPh_Ls2-green, SZPh_R2-cyan,SZPh_RFe-black,SZPh_Lm-brown, SZA_a-violetp');

În figura 5.3 sunt prezentate variațiile modulelor sensivităților iar în figura 5.4 variațiile fazelor senzitivăților în raport cu frecvența.

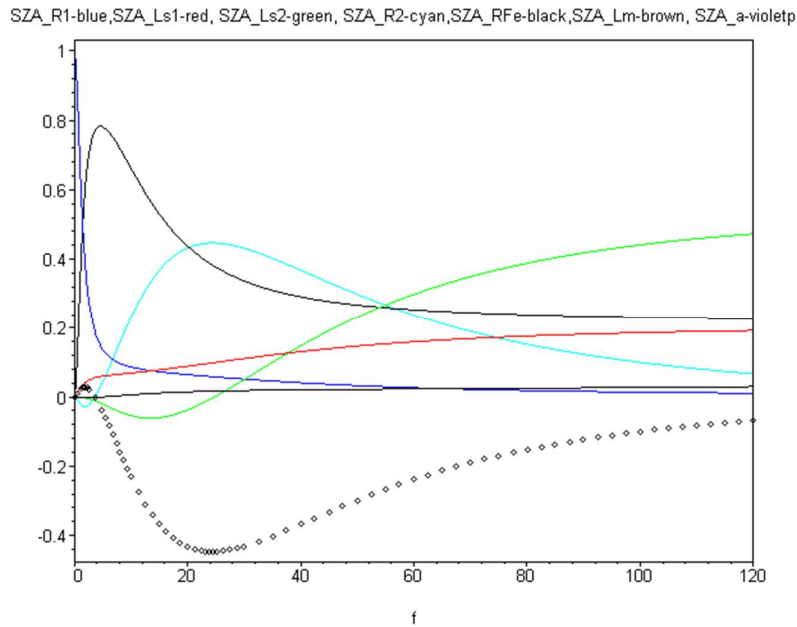


Fig. 5.3. Variațiile modulelor senzitivăților în raport cu frecvența

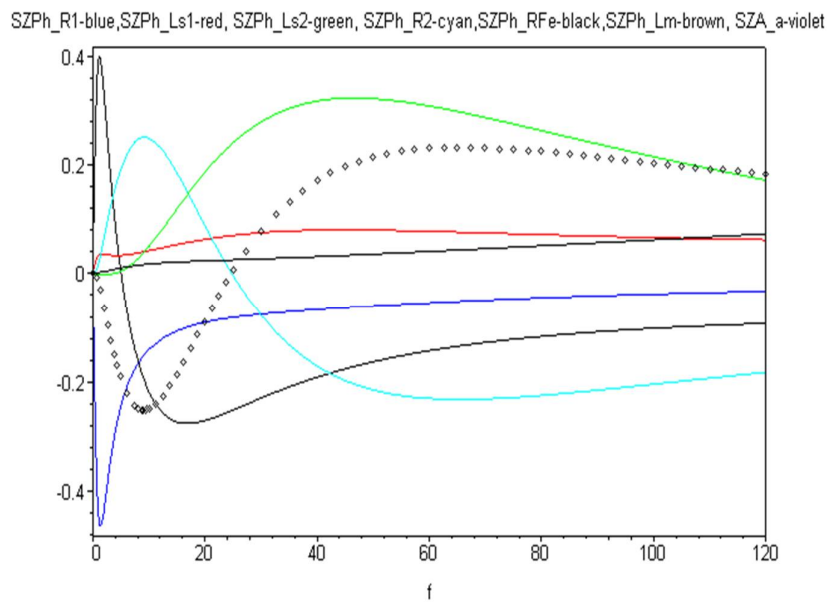


Fig. 5.4. Variațiile fazelor senzitivăților în raport cu frecvența

5.4. Observații și concluzii

- Pentru aplicarea metodei de identificare a parametrilor unui sistem, bazată pe funcțiile de transfer, necesită generarea complet (full) simbolică a acestora. Programele ASINOM și

GESIFT, [19, 20] permit generarea oricărei funcții de transfer în raport cu oricare două porți selectate de utilizator;

- Procedurile de identificare a parametrilor, expuse în acest paragraf, impune măsurarea sau calculul funcțiilor de transfer utilizate la un număr rezonabil de eșantioane de frecvență, [22 - 56];
- Selectarea domeniului de frecvență (a eșantioanelor de frecvență) trebuie efectuată cu mare atenție pentru ca valorile funcțiilor de circuit să nu fie foarte apropiate. Cu cât valorile funcțiilor de circuit, la eșantioanele de frecvență selectate, sunt mai diferite cu atât convergența celor patru proceduri este mai bună, [65-72];
- Pentru a identifica parametrii care sunt greu de estimat, trebuie să se calculeze sensibilitățile funcțiilor de transfer folosite, în raport cu toți parametrii care urmează a fi identificați, deoarece parametrii sistemului care au valorile mici ale sensibilităților sunt greu identificabili. De exemplu, în raport cu rezistența rezistorului R_{Fe} , sensibilitatea impedanței de intrare are cele mai mici valori în domeniu de frecvență considerat, acesta este motivul care conduce la cea mai mare eroare în estimarea a acestui parametru, indiferent de valorile inițiale considerate;
- Din exemplele analizate s-a dedus că cea mai eficientă procedură de identificare a parametrilor este cea care apelează rutina *fminunc* din mediul de programare Matlab. Această rutină permite identificarea unui număr mare de parametri;
- Procedurile de identificare a parametrilor bazate pe rezolvarea sistemelor de ecuații neliniare (5.10) și (5.11) converg numai dacă numărul de parametri estimați este mai mic sau egal cu trei;
- Convergența rutinei *fminimax* depinde de valorile inițiale (de început) ale parametrilor ce urmează a fi estimați, iar convergența rutinei *fminunc* depinde de intervalele inițiale (de început) ale parametrilor ce urmează a fi identificați;
- Rutinele *fminimax* și *fminunc* dispun de o serie de opțiuni de optimizare care conduc la creșterea vitezei de convergență;

Toate cele patru proceduri de identificare a parametrilor motorului asincron bazate pe funcțiile de transfer au fost testate și pe alte exemple care au condus la aceleași observații și concluzii prezentate mai sus.

CAPITOLUL 6

CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI CONCLUZII

C1. Concluzii generale

Securitatea nucleară este una dintre cele mai importante cerințe pentru funcționarea unei centrale nucleare-electrice. Scopul acestei teze de doctorat este de a prezenta amănunțit două direcții de interes pentru asigurarea securității nucleare, respectiv prin modificarea arhitecturii consolelor de control comandă pentru reactorul TRIGA SSR 14MW și simularea funcționării motorului asincron al pompelor circuitului primar de răcire a reactorului cu ajutorul programelor de calculator în mediul de operare Matlab.

Primul obiectiv al tezei a fost atins prin descrierea sistemului de control comandă a reactorului TRIGA SSR 14 MW, a funcțiilor consolei centrale și a circuitelor sistemului de control comandă. Contribuțiile personale provin din natura locului de muncă, operator principal cameră de comandă reactor, și prin implicarea directă la realizarea cerințelor și a criteriilor de proiectare, alegerea furnizorului, implementarea noilor sisteme și operarea acestora în cadrul ICN Mioveni pentru reactorul TRIGA SSR 14MW.

Al doilea obiectiv al tezei a fost de analiză și simulare pe calculator a funcționării motorului asincron utilizat pentru pompele circuitului primar de răcire a reactoarelor nucleare. Am utilizat mediul de lucru Matlab și câteva programe dezvoltate în România pentru determinarea unor performanțe ale motorului atât în regim permanent cât și în regim dinamic, de tranziție. Rezultatele acestor simulări ajută la alegerea tipului de motor folosit, la înțelegerea comportamentului acestuia. Prin identificarea parametrilor cu metoda erorii pătratice a mărimilor de ieșire (sau a funcțiilor de circuit) se pot determina valorile optime ale parametrilor care conduc la performanțe cât mai mari ale motoarelor asincrone folosite, crescând astfel foarte mult siguranța în operare a pompelor circuitului de răcire.

În urma studiilor efectuate pe parcursul elaborării tezei de doctorat, am putut extrage următoarele concluzii generale:

- Securitatea nucleară este obținută prin utilizarea celor mai înalte standarde în proiectarea, alegerea materialelor, alegerea metodelor de producție a materialelor și aparatelor, tehnicilor de producție, de construcție, de instalare și operare;

- Creșterea securității nucleare este un proces permanent, realizat atât pentru construcția noilor centrale nucleare-electrice sau de cercetare cât și pentru cele aflate deja în funcțiune;
- Introducerea de noi sisteme de securitate nucleară, îmbunătățirea celor folosite și actualizarea cu noile tehnologii este o preocupare permanentă a specialiștilor din domeniul nuclear;
- Creșterea fiabilității sistemelor de securitate și a metodelor de îmbunătățire sunt obținute prin redundanță, toleranță la defect, autotestare și autoconfigurare;
- Utilizarea calculelor complexe, a simulărilor de funcționare în situații critice, precum și găsirea soluțiilor corespunzătoare fac parte din strategia de dezvoltare a reactoarelor nucleare sigure și din efortul de creștere a siguranței instalațiilor aflate deja în funcțiune;
- Funcțiile consolei de control comandă a reactorului permit realizarea celor două scopuri pentru care a fost proiectat: operarea reactorului și asigurarea securității nucleare;
- Toate procedurile de identificare a parametrilor motorului asincron bazate pe funcțiile de transfer au fost testate și pe alte exemple care au condus la aceleași observații legate de utilitatea acestora pentru simularea motorului asincron;
- Securitatea nucleară asigură atât buna funcționare a reactoarelor nucleare dar stimulează și cercetarea științifică în toate domeniile tehnice pentru obținerea de materiale cu performanțe ridicate, pentru tehnologii în domeniul construcțiilor și pentru introducerea de noi sisteme de operare, monitorizare și control ale reactoarelor nucleare;
- Aplicarea principiilor securității nucleare în cadrul reactorului TRIGA SSR 14MW de la ICN Mioveni s-a realizat și prin introducerea noii console de control comandă, cu o interfață om-mașină de ultimă generație;
- Simulările pe calculator ale funcționării motorului asincron permit dezvoltarea unor sisteme de răcire puternice, economice și fiabile în același timp, cu un plus foarte mare pentru securitatea nucleară a centralelor electrice;
- Cercetările continue în domeniul proiectării, materialelor, construcțiilor, asamblării și operării centralelor nucleare-electrice vor micșora foarte mult riscul asociat domeniului nuclear și vor îndeplini cerințele tot mai stricte ale securității nucleare moderne.

C2. Contribuții originale

- Am contribuit la proiectarea unui sistem de control - comandă care asigură supravegherea celor trei parametri importanți pentru securitatea nucleară: *puterea neutronică* (fluxul de neutroni), măsurată cu ajutorul a 4 camere de fisiune plasate în cele 4 colțuri ale zonei active, *temperatura în combustibil*, măsurată cu ajutorul termocuplelor existente în elementele combustibile instrumentate și *pozițiile barelor de control*;
- Circuitele sistemului de control comandă proiectate cuprind atât canalele nucleare cât și pe cele nenucleare ce asigură informațiile necesare securității în funcționare;
- Prin analiza permanentă, efectuată, a puterii reactorului și a parametrelor cu implicație în securitatea nucleară și compararea cu valorile prestabilite, operarea automată a reactorului reprezintă o facilitate de înaltă securitate ce permite funcționarea sigură a acestuia;
- Sistemului de protecție al reactorului (RPS) propus asigură o fiabilitate ridicată, minimizează expunerea personalului la radiații în timpul operării reactorului, determină defectarea unică, minimizează apariția defectărilor de mod comun prin separarea fizică, independența funcțională și diversitatea echipamentelor utilizate, utilizează tehnologii certificate, calificate de experiență și testări, implementează funcții de securitate nucleară intrinseci și inginerești;
- Sistemul de control și monitorizare al reactorului (CMS - Control & Monitoring System) dezvoltat este independent fizic și funcțional față de (RPS), nu poate anula o acțiune inițiată de sistemul de protecție al reactorului, implementează funcții automate și manuale, limitări și condiții de interblocare;
- Interfața acestui sistem cu sistemul de protecție al reactorului este unidirecțională (dinspre sistemul de protecție către sistemul de control și monitorizare al reactorului) și izolată galvanic (izolatori optici sau relee);
- Am identificat criteriile ce stau la baza proiectării sistemului de control și monitorizare a reactorului sunt simplitatea, fiabilitatea, disponibilitatea, posibilitatea de reparare ușoară a componentelor, programe de calculator specifice, modularitate și posibilitate de dezvoltare permanentă;
- Asigurarea unor motoare eficiente, fiabile, puternice și ale căror caracteristici sunt cunoscute contribuie la scăderea riscului de pierdere a răcirii reactorului (LOCA) și la creșterea securității nucleare;

- Prin simulările pe care le-am efectuat, cu programe adecvate, a funcționării motoarelor asincrone atât în regim permanent cât și în tranzitoriu (dinamic) se pot cunoaște performanțelor electrice ale acestora;
- Mediul de lucru Matlab, pe care l-am folosit, permite simulări complexe ale funcționării motorului asincron;
- Programul ASINOM mi-a permis studiul motorului asincron în regim permanent sinusoidal, când se utilizează schema echivalentă, ce funcționează pe caracteristica cuplul electromagnetic – alunecare corespunzătoare cazului când se consideră că parametrii electrice ai rotorului variază cu frecvența rotorică, de la pornire ($s = 1, f_r = 0$ Hz) până la alunecarea $s_1 = 0.215$ ($\omega_r = \omega_{rx} = 81.0$ rad/s, $f_r = 12.9$ Hz), apoi se trece pe caracteristica cuplul electromagnetic – alunecare când parametrii electrice ai rotorului sunt constanți. În felul acesta, se asigură la pornire un cuplu activ mai mare decât cuplul nominal și motorul poate porni la sarcină nominală;
- Am aproximat caracteristica de magnetizare neliniară $F_{iLm} - i_{Lm}$ și caracteristica $R_4 + R_5 = R'_{r/s}$ - timp (de fapt, $R'_{r/s}$ funcție de s) - element de circuit parametric (variabil în timp) prin puncte (care de regulă, sunt obținute experimental) permite programului PACEN să analizeze astfel de circuite și să scoată în evidență fenomenele nedorite produse de fenomenul de saturație – pierderi Joule și mai ales pierderi în fier suplimentare. Acestea, conduc la reducerea factorului de putere și a randamentului;
- Am aplicat metoda de identificare a parametrilor unui sistem, bazată pe funcțiile de transfer, necesită generarea complet simbolică a acestora cu ajutorul programelor ASINOM și GESIFT, care generează orice funcție de transfer în raport cu oricare două porți selectate de utilizator;
- Pentru a identifica parametrii care sunt greu de estimat, a trebuit să calculez sensibilitățile funcțiilor de transfer folosite, în raport cu toți parametrii care urmează a fi identificați, deoarece parametrii sistemului care au valorile mici ale sensibilităților sunt greu identificabili;

C3. Perspective de dezvoltare ulterioară

Implementarea sistemelor digitale de control și securitate în instalațiile nucleare, a metodelor de control și a structurilor cu fiabilitate controlată, duce la creșterea semnificativă a siguranței în funcționare, cu următoarele beneficii imediate:

- înlocuirea componentelor convenționale cu terminale computerizate (PLC-uri, afișaje LCD, etc.);
- prezentarea intuitivă simplificată a unor pachete de date de proces pe panouri LCD color;
- creșterea abilității sistemelor de a efectua funcții de securitate prin prelucrarea inteligentă a informației; posibilitatea de rulare a unor programe de autoevaluare și toleranță la defect;
- structuri flexibile cu posibilități de extindere și modernizare;
- reducerea semnificativă a activităților de mentenanță;

Sistemele digitale moderne oferă oportunități de realizare a unor interfețe om-mașină optimizate ergonomic pentru accesul selectiv al diverselor categorii de personal: operatori de proces, personal service, ingineri de sistem, manageri.

Aceste sisteme permit achiziția și protecția datelor pentru utilizare imediată și pe termen lung, evaluarea rapidă a situațiilor de risc potențial, precum și analiza posteveniment.

Prelucrarea locală rapidă și luarea unor acțiuni critice de protecție este esențială în siguranța instalațiilor, sistemele cu control distribuit dedicate, fiind recomandate în acest caz.

Tendința generală în abordarea unor obiective nucleare de viitor este tratarea unitară și integrarea întregii structuri de securitate în cadrul sistemelor informatice industriale cu conexiuni în rețelele digitale de mare viteză și abilități de evaluare unitară și management a situațiilor de urgență. Realizarea unor camere de comandă moderne cu panouri mari de afișaje LCD oferă operatorilor o imagine globală asupra proceselor și informații specifice privind starea de funcționare a echipamentelor implicate.

Enumerăm facilitățile suplimentare preconizate pentru sistemele de securitate și camerele de comandă:

1. Diagnoză și alarmare on-line cu metode de rezolvare și reconfigurare automată a sistemelor și realocarea resurselor.
2. Evaluare on-line a rezervelor de sistem; numărul de sisteme și linii de măsură active, precizie de măsură estimată pe fiecare canal, grad de dispersie și nivel perturbații, grad de îmbătrânire și uzură anticipată pentru traductori și echipamente.
3. Tratare ierarhizată a evenimentelor concurente.
4. Validarea automată a informației, localizarea și indicarea semnificației.
5. Display cu sisteme de afișare ergonomică, grafică și lupă de timp.
6. Introducere de console suplimentare de securitate și de diagnoză, precum și pentru operațiuni de reconfigurare și service.

7. Introducere consolă de tratare accidente și situații de criză cu posibilități de operare de la distanță.
8. Funcții de simulare și predicție a evoluției proceselor.

Prelucrarea inteligentă a zonelor de risc și a situațiilor de alarmă prin clasificare, ierarhizare și filtrare poate evita supraîncărcarea operatorilor și situațiile de instabilitate și indecizie. Creșterea preciziei de măsură a parametrilor de proces prin prelucrare digitală locală duce la îmbunătățirea stabilității instalațiilor și la creșterea randamentului prin reglarea optimă a puterii reactorului pentru urmărirea sarcinii de rețea.

Introducerea unor sisteme expert de evaluare și diagnoză în timp real, precum și senzori multifuncționali cu inteligență distribuită, crește gradul de informare în timp real pentru operatorii de sistem ducând la adoptarea mai rapidă a unor decizii corecte. O problemă de mare actualitate este modernizarea sistemelor actuale de control și securitate din centralele nucleare, pentru atingerea unor obiective de prelungire a timpului de viață economică a acestora.

Motoarele electrice asincrone de putere sunt unele din componentele cele mai importante în ceea ce privește securitatea instalațiilor din domeniul nuclear și nu numai, de aceea acest studiu poate fi continuat pe baza diagnozei tehnice și prognoza defectelor acestor motoare.

BIBLIOGRAFIE

[1] Ing. **Venescu Bogdan**, D. Zevedei, M. Jurian, R. Venescu , ” *Intelligent Control System for a CANDU 600 Type Reactor Process* “ The 6th Annual International Conference on Sustainable Development through Nuclear Research and Education, May 22-24, 2013, Pitesti, Romania, ISSN 2066-2955, pp. 95 - 105.

[2] Ing. **Venescu Bogdan**, D. Zevedei, M. Jurian” *Power Distribution Control of CANDU Reactors Based on Modal Representation of Reactor Kinetics* “ The 6th Annual International Conference on Sustainable Development through Nuclear Research and Education, May 22-24, 2013, Pitesti, Romania, ISSN 2066-2955, pp. 114 - 122.

[3] Ing. **Venescu Bogdan**, Mariana Jurian "Fuzzy control of a nonlinear process belonging to the nuclear power plant with a candu 600 reactor" Constanta Maritime University's Annals Year XIII, 2012 Vol.18, pp 208 - 214.

[4] Dr. Ion Ionita, Dr. Maria Balasoiu, Dr. Gyulia Torok, Dr. Gizo Bokuchava, Dr.Alexander Kuklin, Dr. Manuela Fulger,Dr. Premsl Beran, Dr. Dmitri Soloviov, Ing. Bogdan Venescu "Study of the aging behavior of materials important in nuclear energy field - Incoloy 800 HT and 304L steel- using neutron scattering techniques" International Conference Condensed Matter Research at the IBR-2, 24-27 June 2014 Dubna, Moscow region, Russia, Book of abstracts, pp. 5-6

[5] Ion Ionita, Pavol Mikula, Gyula Torok, Premysl Beran, Manuela Fulger, **Bogdan Venescu** "Study of the Ageing Behavior of Incoloy 800 HT and 304-L Steel Using Neutron Scattering Techniques" Nuclear 2012 – The 5th Annual International Conference on Sustainable Development through Nuclear Research and Education, 16-18 mai 2012, pp. 37

[6] Ing. Marius Media, Ing. Bogdan Venescu "Induction motor rotor cage fault diagnosis with stockwell and wavelet time-frequency stator current analysis" U.P.B. Sci. Bull., Series C, Vol. 75, Iss. 4, 2013 ISSN 2286-3540, pp. 209 – 222

[7] Franco, Sergio, Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits, Mc Grow-Hill Book Company, 1988.

[8] B. Boashash, P. O. Shea, M. J. Arnold. Algorithms for Instantaneous Frequency Estimation: A Comparative Study. Proceedings of SPIE California, July 1990.

[9] M. Simpoleom, Circuite de conversia datelor Ed. Tehnica 1980

[10] D. Zahariea, Matlab, calcul numeric si symbolic, Editura PIM, Iasi, 2014

[11] O.Radu, Filtre numerice – Aplicatii - Ed. Tehnica 1979

[12] *Beaufays, F.*, "Orthogonalizing adaptive algorithms: RLS, DFT/LMS, and DCT/LMS", in *Adaptive Inverse Control*, NJ: Prentice Hall, 1995

[13] *Haykin, S.*, *Adaptive Filter Theory*, 4th ed., New Jersey: Prentice-Hall, 2002

[14] *Ing. Venescu Bogdan, D. Zevedei, M. Jurian,* "3D Simulation of CANDU Reactor Regulating System" "The 6th Annual International Conference on Sustainable Development through Nuclear Research and Education, May 22-24, 2013, Pitesti, Romania, ISSN 2066-2955, pp. 106 - 113.

[15] *CS Ana Emil Mugurel, Dr. ing. Preda Marin, CS Barbalata Eugenia, Ing. Venescu Bogdan* "Reactualizarea procedurilor de exploatare privind aparatele de masura si control din sectia a II-a reactor pentru implementarea cerintelor de mediu" Cod lucrare 8174/2008, R.I. 13.09.12

[16] *Dr. Ing. Preda Marin, CS Ana Emil Mugurel, Ing. Pr. Cristea Dumitru, CS Barbalata, Eugenia, Ing. Venescu Bogdan* "Documentatie de securitate pentru consola SSR-14 MW" Cod lucrare 8234/2008 R.I. 13.09.08

[17] *CS Ana Emil Mugurel, CS Barbalata Eugenia, Ing. Venescu Bogdan* "Studiu de evaluare a opririlor neprogramate ale reactorului TRIGA SSR 14MW in perioada 1989 - 2010" Cod lucrare 9548 / 2012, R.I. 13.09.02

[18] *CS Ana Emil Mugurel, Dr. ing. Preda Marin, CS Barbalata Eugenia, Ing. Venescu Bogdan* "Actualizarea procedurilor de operare si mentenanta pentru sistemului de protectie al reactorului TRIGA 14MW" Cod lucrare 9095/2011, R.I. 13.09.10

[19] *CS Ana Emil Mugurel, Dr. ing. Preda Marin, CS Barbalata Eugenia, Ing. Venescu Bogdan* "Manuale de operare pentru sistemele de protecție, control și monitorizare ale reactorului TRIGA 14MW LEU" Cod lucrare 9332/2011, R.I. 13.09.02

[20] *Ing. Venescu Bogdan, Mariana Jurian* "Fuzzy control of a nonlinear process belonging to the nuclear power plant with a candu 600 reactor" *Constanta Maritime University's Annals Year XIII, 2012 Vol.18*, pp 208 - 214.

[21] *L. Toma*, "Sisteme de achiziție și prelucrarea numerică a semnalelor", Editura de Vest, Timișoara, 1996

[22] IAEA, *Applications of personal computers to entrance operation and management of research reactors - TECDOC-1004* feb. 1998

[23] IAEA, *Modern Instrumentation and Control for Nuclear Power Plants – Guidebook - IAEA Viena* 1999

[24] *Ing. Venescu Bogdan, D. Zevedei, M. Jurian,* "Power Distribution Control of CANDU Reactors Based on Modal Representation of Reactor Kinetics" "The 6th Annual

International Conference on Sustainable Development through Nuclear Research and Education, May 22-24, 2013, Pitesti, Romania, ISSN 2066-2955, pp. 114 - 122.

[25] IAEA, Modern Instrumentation and Control for Nuclear Power Plants – Guidebook - IAEA Viena 1999

[26] IAEA, Managing modernization of nuclear power plants instrumentation and control systems - IAEA Viena 2004

[27] IAEA SS35-S1 “Code on Safety of Nuclear Research Reactors: Design”, articles 626–634, Viena 1992

[28] General Atomics, E-115-736 „TRIGA SSR 14MW Maintenance Manual” , Viena, 2016

[29] *E. Walter and L. Pronzato*, “Identification of parametric models from experimental data”, Communication and Control Engineering Series, Editions Springer, 1997.

[30] *A. S. Nasar, I. Bodea*, “Electrical Machines: Dynamics and Control”, CRS Press, 1993.

[31] *CS Ana Emil Mugurel, Dr. ing. Preda Marin, Ing. Venescu Bogdan* "Punerea in functiune a sistemului modernizat de control-comanda a reactorului TRIGA" Cod lucrare 8766/2010, R.I. 13.06.26

[32] *M. Iordache, Lucia Dumitriu, I. Matei*, “ASINOM – Analiza Simbolică bazată pe metoda NODală Modificată”, Ghid de utilizare, *Biblioteca Departmentului de Electrotehnică*, Universitatea Politehnica din București, 2002.

[33] *M. Iordache, Lucia Dumitriu, I. Matei*, “PACEN – Program de Analiză a Circuitelor Electrice Neliniare”, Ghid de utilizare, *Biblioteca Departmentului de Electrotehnică*, Universitatea Politehnica din București”, 1998.

[34] *M. Iordache, Lucia Dumitriu, D. Delion*, “PGESEST – Program de Generare Simbolică a Ecuțiilor de STare”, Ghid de utilizare, *Biblioteca Departmentului de Electrotehnică*, Universitatea Politehnica din București”, 1995.

[35] *N. Galan*, Mașini electrice, Editura Academiei, București, 2011

[36] *Pedra, J. , Corcoles, F.*, “Estimation of Induction Motor Double-Cage Model Parameters From Manufacturer Data”, IEEE Transactions on Energy Conversion, June 2004.

[37] *P. Pillay, R. Nolan, T. Haque*, “Application of genetic algorithm to motor parameter determination for transient torque calculations,” *IEEE Trans. Ind. Applications*, vol. 33, no 5, pp. 1273-1282, Sept./Oct. 1997.

[38] *T. Phumiphak, C. Chatuthai*, “Estimation of induction motor parameters based on field test coupled with genetic algorithm,” in *Proc. Int. Conf. Power System Technology 2002 (PowerCon 2002)*, pp. 1199- 1203.

[39] *H. Weatherford, C. W. Brice*, “Estimation of induction motor parameters by a genetic algorithm,” in *Proc. 2003 Annu. Pulp and Paper Industry Technical Conference*, pp. 21-28.

[40] *P. Nangsue, P. Pillay, S. Conry*, “Evolutionary algorithms for induction motor parameter determinations,” *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 14, no 3, pp. 447-453, Sept./1999.

[41] *B. K. Johnson, J. R. Willis*, “Tailoring induction motor analytical models to fit known motor performance characteristics and satisfy particular study needs,” *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 6, no 3, pp. 959-965, Aug. 1991.

[42] *L. Ljung*, “System identification: Theory for the user, 2nd edition”, Prentice Hall, USA, 1999.

[43] *E. Walter and L. Pronzato*, “Identification of parametric models from experimental data”, Communication and Control Engineering Series, Editions Springer, 1997.

[44] *H. Unbehauen, G.P. Rao*, “A review of identification in continuous-time systems”, *Annual Reviews in Control* 22, pp. 145-171, 1998.

[45] *D. W. Marquardt*, “An Algorithm for least-squares estimation of non-linear parameters”, *Soc. Indust. Appl. Math*, VOL. 11, NO. 2, pp. 431-441, 1963

[46] IAEA, Applications of personal computers to entrance operation and management of research reactors - TECDOC-1004 feb. 1998

[47] *Iulia Dumitrescu, Smail Bachir, David Cordeau, Jean – Marie Paillot, Mihai Iordache*, “Modeling an Characterization of Oscillator Circuits by Van der Pol Model Using Parameter Estimation”, *Journal of Circuits, Systems, and Computers (JCSC)*, ISSN; 0218 – 1266, Volume 21, No. 5 (August 2012), pp. 1587 – 1605.

[48] *M. Iordache, Lucia Dumitriu, L. Mandache, D. Niculae*, „Parameter Estimation and Performance Optimization of Voltage Controlled Oscillators”, *Proc. of the International Symposium on Signals, Circuits and Systems, ISSCS 2013*, 11 - 12 July, 2013, Iasi, Romania, pp. 24-27, 978-1-4673-6143-9/13/\$31.0 2013IEEE. (ISI).

[49] *M. Iordache, Lucia Dumitriu, Rodica Voiculescu, D. Niculae, N. Galan, S. Deleanu, D. Carpenter*, “Saturated Induction Machine Steady-State Performance Assessment through Simulations“, Publisher:IEEE, IEEE Xplore, Print ISBN: 978-1-4673-1809-9,

INSPEC Accession Number: 14447015, Digital Object Identifier (DOI):10.1109/OPTIM.2014.6850908, Page(s): 369 - 374.

[50] *M. Iordache, Ileana Calomfirescu, D. Niculae, M. Dogaru*, „Simulation of Induction Motor Using State Equations”, Proceeding of the 7th International Symposium Advanced Topics in Electrical Engineering – ATEE’11, 12-14 May 2011 – Bucharest, ROMANIA, Editura Politehnica Press, pp. 59 - 64, ISSN: 2068-7966, Print ISBN: 978-1-4577-0507-6, INSPEC Accession Number:12118939.

[51] *Mihai Iordache, Lucia Dumitriu, Niculae Galan, Dragos Niculae, Ileana Calomfirescu*, “Saturation Influence on Induction Motor Working in Steady-State Behavior”, ACTA Electrotehnica, Special Issue, Proceedings of the 5nd International Conference on Modern Power Systems MPS 2013 28-31 of May 2013, Cluj-Napoca, Romania, Mediamira Science Publisher, ISSN: 1841 – 3323, pp. 229 – 232.

[52] *Gloria Ciumbulea, Sorin Deleanu, Mihai Iordache, Ciprian Cucuteanu, Nicolai Galan, Anton Anastasie Moscu*, “Modelling of Transfer Windings and Computation of Very Fast Transient Over-Voltage“, Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series, No. 39, 2015, pp. 1 - 8, ISSN 1842 - 4805.

[53] *D. O. Kisch*, “Vectorial Driving of a.c. Electrical Machines”, ICPE Publishing Company, Bucharest, 2006.

[54] *Won Young Yang, Wenwu Cao, Tae-Sang Chung, John Morris*, “Applied Numerical Methods using MATLAB”, John Wiley & Sons, Inc., Publishing.

[55] *H. Unbehauen, G.P. Rao*, “Identification of continuous systems”, Systems and control series.

[56] *L. L. Sharfe, T. R. Behreus*, “A First Course in Electrical and Computer Engineering with MATLAB Programs and Experiments”, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1990.

[57] *M. Juffer*, “Traité d’Electricité, Vol. 10, Machines électriques”, Press Polytechniques et Universitaires Romanades, Paris, 1995, pp.384.

[58] *M. Iordache, Lucia Dumitriu, I. Matei*, “ASINOM – Analiza Simbolică bazată pe metoda NODală Modificată”, Ghid de utilizare, *Biblioteca Departmentului de Electrotehnică*, Universitatea Politehnica din București, 2002.

[59] *M. Iordache, Lucia Dumitriu, I. Matei*, “ GESIFT – GEnerarea SIMbolica a Funcțiilor de Transfer”, Ghid de utilizare, *Biblioteca Departmentului de Electrotehnică*, Universitatea Politehnica din București”, 2000.

[60] *Grace, A.C.W.*, "Computer-Aided Control System Design Using Optimization Techniques", Ph.D. Thesis, University of Wales, Bangor, Gwynedd, UK, 1989.

[61] *Madsen, K., H. Schjaer-Jacobsen*, "Algorithms for Worst Case Tolerance Optimization," *IEEE Trans. Of Circuits and Systems*, Vol. CAS-26, Sept. 1979.

[62] *Powell, M.J.D.*, "A Fast Algorithm for Nonlinear Constrained Optimization Calculations," *Numerical Analysis*, ed. G.A. Watson, *Lecture Notes in Mathematics*, Vol. 630, Springer Verlag, 1978.

[63] *Brayton, R.K., S.W. Director, G.D. Hachtel, and L.Vidigal*, "A New Algorithm for Statistical Circuit Design Based on Quasi-Newton Methods and Function Splitting", *IEEE Trans. Circuits and Systems*, Vol. CAS-26, pp. 784-794, Sept. 1979.

[64] *Han, S.P.*, "A Globally Convergent Method For Nonlinear Programming", *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 22, p. 297, 1977.

[65] @ (function_handle), fgoalattain, lsqnonlin, optimset, optimtool.

[66] *Broyden, C.G.*, "The Convergence of a Class of Double-Rank Minimization Algorithms," *Journal Inst. Math. Applic.*, Vol. 6, pp. 76-90, 1970.

[67] *Coleman, T.F. and Y. Li*, "An Interior, Trust Region Approach for Nonlinear Minimization Subject to Bounds," *SIAM Journal on Optimization*, Vol. 6, pp. 418-445, 1996.

[68] *Coleman, T.F. and Y. Li*, "On the Convergence of Reflective Newton Methods for Large-Scale Nonlinear Minimization Subject to Bounds," *Mathematical Programming*, Vol. 67, Number 2, pp. 189-224, 1994.

[69] *Davidon, W.C.*, "Variable Metric Method for Minimization," *A.E.C. Research and Development Report*, ANL-5990, 1959.

[70] *Fletcher, R.*, "A New Approach to Variable Metric Algorithms," *Computer Journal*, Vol. 13, pp. 317-322, 1970.

[71] *Fletcher, R.*, "Practical Methods of Optimization," Vol. 1, *Unconstrained Optimization*, John Wiley and Sons, 1980.

[72] *Fletcher, R. and M.J.D. Powell*, "A Rapidly Convergent Descent Method for Minimization," *Computer Journal*, Vol. 6, pp. 163-168, 1963.

[73] *Goldfarb, D.*, "A Family of Variable Metric Updates Derived by Variational Means," *Mathematics of Computing*, Vol. 24, pp. 23-26, 1970.

[74] *Shanno, D.F.*, "Conditioning of Quasi-Newton Methods for Function Minimization," *Mathematics of Computing*, Vol. 24, pp. 647-656, 1970.

[75] @ (function handle), fminsearch, optimset, optimtool, Anonymous Functions.

[76] Madsen, K. and H. Schjaer-Jacobsen, "Algorithms for Worst Case Tolerance Optimization," IEEE Trans. Of Circuits and Systems, Vol. CAS-26, Sept. 1979.

[77] @ (*function_handle*), *fgoalattain*, *lsqnonlin*, *optimset*, *optimtool*.

[78] *Sorin Deleanu, Mihai Iordache, Dragos Niculae, Bogdan Venescu, Mihaela Cristina Turcu, Neculai Galan*, "The Overvoltage Distribution across Transformer Windings in presence of Long Feeders", Publisher: IEEE, IEEE Xplore, 2018 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), 4-6 Oct. 2018, DOI: 10.1109/ICATE.2018.8551469, 978-1-5386-3806-4/18/\$31.00 ©2018 IEEE, Page(s): 1 - 6.

[79] *Bogdan Florin VENESCU, Adrian Florinel BUCSA, Mihai IORDACHE* „Analysis of the permanent sinusoidal regime of the asynchronous motor of the primary circuit pumps from a nuclear power plant” U.P.B. Sci. Bull., Serie C, ISSN 1223-7027,