

CONTRIBUȚII LA IDENTIFICAREA, MODELAREA ȘI SIMULAREA SISTEMELOR DE IZOLAȚIE ALE HIDROGENERATOARELOR

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

Ing. Mihaela Răduca

Conducător științific:	prof.univ.dr.ing. Ștefan Gârlașu
Referenți științifici:	prof.univ.dr.ing. Mircea Covrig
	prof.univ.dr.ing. Gheorghe Liuba
	prof.univ.dr.ing. Octavian Proștean

Ziua susținerii tezei: 22.06.2007

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

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

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

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2006

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

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

Cuvânt înainte

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele de doctorat în cadrul Facultății de Automatică și Calculatoare a Universității „Politehnica” din Timișoara.

Aduc mulțumiri Conducătorului Științific, d-lui, Prof.univ.dr.ing.Ștefan GÂRLAȘU pentru onoarea de a-mi fi Conducător de Doctorat, care datorită înaltului profesionalism cumulat de-a lungul anilor de cercetare, mi-a îndrumat cu competență continuarea cercetărilor până la realizarea tezei de față.

Doresc să mulțumesc în mod deosebit distinsului Prof.univ.dr.ing. Octavian PROȘTEAN, Decanul Facultății de Automatică și Calculatoare de la Universitatea „Politehnica” Timișoara, pentru tot sprijinul oferit de-a lungul etapelor de pregătire și de elaborare a Tezei.

Autorul își exprimă gratitudinea și aduce sincere mulțumiri referenților științifici oficiali, d-lui Prof.univ.dr.ing. Mircea COVRIG de la Universitatea „Politehnica” București și d-lui Prof.univ.dr.ing. Gheorghe LIUBA de la Universitatea „Eftimie Murgu” Reșița, pentru recenzarea acestei lucrări, contribuind la îmbunătățirea conținutului și formei finale.

Țin să mulțumesc distinsului Conf.univ.dr.ing. Iancu TĂTUCU pentru fructuoasele schimburi de idei purtate asupra temei, pentru observațiile interesante și sugestiile oferite.

Mulțumesc tuturor prietenilor și colegilor mei din cadrul Facultății de Inginerie a Universității „Eftimie Murgu” din Reșița care au crezut în mine și în special d-nei as.univ.dr.ing Lenuța SUCIU și d-nei prep.univ. Ana-Maria PITTNER pentru sprijinul moral acordat de-a lungul perioadei de elaborare a Tezei de Doctorat.

Nu în ultimul rând, țin să mulțumesc familiei mele pentru sprijinul moral și științific acordat, precum și pentru tot timpul oferit pentru ducerea la bun sfârșit a acestei lucrări.

Timișoara,
iunie 2007

Mihaela Răduca

Familiei mele,

Răduca, Mihaela

Contribuții la identificarea, modelarea și simularea sistemelor de izolație ale hidrogenatoarelor

Teze de doctorat ale UPT, Seria 1 .Nr. 3 , Editura Politehnica, 2007, 152 pagini, 138 figuri, 15 tabele și 2 anexe.

ISSN: 1842-5208

ISBN: 978-973-625-467-3

Cuvinte cheie: sistem bobină – izolație - aer, model matematic continuu, model matematic cu elemente finite, algoritm, monitorizare, fuzzy, model on-line, testare.

Rezumat,

Lucrarea prezintă determinarea modelelor matematice continue pentru câmpul termic și pentru câmpul electric din sistemul bobină – izolație - aer și apoi discretizarea acestor modele în scopul simulării, utilizând metoda elementelor finite.

Elaborarea unui algoritm de calcul al parametrilor geometrici ai hidrogenatoarelor și implementarea acestuia în limbajul de programare Visual Basic constituie un alt obiectiv ce se urmărește în elaborarea Tezei.

De asemenea, realizarea unui sistem de monitorizare a izolației utilizând logica fuzzy, este un alt obiectiv vizat.

Prin elaborarea unui model on-line se poate estima continuu timpul de viață al izolației bobinajelor stator.

Pentru validarea rezultatelor obținute în urma simulărilor s-a elaborat un program de testare a sistemului de izolației.

CUPRINS

1. INTRODUCERE.....	7
1.1. <i>Oportunitatea și obiectivele tezei</i>	<i>7</i>
1.2. <i>Prezentarea conținutului tezei.....</i>	<i>8</i>
2. CERCETĂRI PRIVIND SISTEMELE DE IZOLAȚIE ALE MAȘINILOR ELECTRICE	11
3. MĂRIMI SPECIFICE PENTRU STUDIUL IZOLAȚIEI BOBINELOR STATOR ALE HIDROGENERATOARELOR.....	11
3.1. <i>Introducere.....</i>	<i>11</i>
3.2. <i>Mărimi specifice izolației.....</i>	<i>11</i>
3.3. <i>Concluzii</i>	<i>21</i>
4. MODELAREA ȘI SIMULAREA IZOLAȚIILOR BOBINELOR STATOR.....	21
4.1. <i>Introducere.....</i>	<i>21</i>
4.2. <i>Modelarea câmpului termic și a câmpului electric pentru sistemul bobină – izolație – aer.....</i>	<i>21</i>
4.2.1. <i>Modelarea câmpului termic al sistemului bobină – izolație – aer</i>	<i>21</i>
4.2.2. <i>Modelarea câmpului electric pentru sistemul bobină – izolație – aer.....</i>	<i>32</i>
4.2.3. <i>Calculul unghiului de pierderi dielectrice.....</i>	<i>46</i>
4.3. <i>Etapele utilizate în simularea sistemului bobină – izolație – aer.....</i>	<i>49</i>
4.4. <i>Modelul geometric al sistemului bobină – izolație – aer... </i>	<i>50</i>
4.5. <i>Simularea câmpului termic pentru sistemul bobină – izolație – aer.....</i>	<i>52</i>
4.6. <i>Simularea câmpului electric pentru sistemul bobină – izolație – aer.....</i>	<i>55</i>
4.7. <i>Simularea sistemului bobină - izolație – aer la tensiunea de străpungere.....</i>	<i>57</i>
4.8. <i>Concluzii</i>	<i>61</i>
5. ALGORITM PENTRU DETERMINAREA PARAMETRILOR GEOMETRICI AI HIDROGENERATOARELOR.....	61
5.1. <i>Introducere.....</i>	<i>61</i>
5.2. <i>Elaborarea algoritmului de calcul pentru parametri geometrici ai hidrogenatorului.....</i>	<i>61</i>
5.3. <i>Verificarea generatorului din punct de vedere electromagnetic</i>	<i>73</i>
5.4. <i>Concluzii</i>	<i>75</i>
6. SISTEM DE MONITORIZARE A STĂRII IZOLAȚIEI	75
6.1. <i>Introducere.....</i>	<i>75</i>

6.2. Sistem de monitorizare a stării izolației.....	75
6.2.1. Subsistem pentru achiziție date	77
6.2.2. Subsistemul fuzzy	79
6.3. Concluzii	85
7. MODEL ON-LINE PENTRU ESTIMAREA	
CONTINUĂ A TIMPULUI DE VIAȚĂ AL IZOLAȚIEI	
BOBINAJULUI.....	85
7.1. <i>Introducere.....</i>	<i>85</i>
7.2. <i>Model pentru estimarea duratei de viață a izolației</i>	
<i>bobinajului hidrogenatorului.....</i>	<i>85</i>
7.3. <i>Concluzii</i>	<i>92</i>
8. TESTAREA STĂRII IZOLAȚIEI	
BOBINAJULUI STATOR AL	
HIDROGENERATOARELOR.....	92
8.1. <i>Introducere.....</i>	<i>92</i>
8.2. <i>Determinarea stării izolației bobinajului stator.....</i>	<i>92</i>
8.3. <i>Program de teste efectuate asupra bobinajului stator</i>	<i>94</i>
8.3.1. Măsurarea rezistenței de izolație	95
8.3.2. Măsurarea coeficientului de absorbție	96
8.3.3. Măsurarea indicelui de polarizare.....	96
8.3.4. Proba profilactică în c.a. (a.c. hipot test)	97
8.3.5. Proba profilactică în current continuu	97
8.3.6. Măsurarea factorului de pierderi dielectrice tgδ și ale capacității	
fiecărei faze statorice	99
8.3.7. Măsurarea descărcărilor parțiale.....	103
8.3.8. Rigiditatea dielectrică.....	105
8.4. <i>Interpretarea rezultatelor.....</i>	<i>107</i>
8.5. <i>Concluzii</i>	<i>110</i>
9. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII	
PERSONALE. PERSPECTIVE.....	111
9.1. <i>Concluzii finale.....</i>	<i>111</i>
9.2. <i>Contribuții personale</i>	<i>115</i>
9.3. <i>Perspective</i>	<i>117</i>
BIBLIOGRAFIE	119
Anexa 1 - Variația factorul de pierderi dielectrice (tg δ) cu tensiunea pentru	
cele 215 bobine testate	
Anexa 2 - Curbele variației unghiului de pierderi dielectrice (tgδ) cu	
tensiunea	

1. INTRODUCERE

1.1. Oportunitatea și obiectivele tezei

Creșterea consumului energetic global și reducerea permanentă a rezervelor energetice, în special petroliere și de cărbune, necesită îmbunătățirea sistemelor existente de producere a energiei bazate pe surse alternative, resurse practic inepuizabile: energie solară, energie eoliană, energie hidroelectrică.

Energia hidroelectrică are patru avantaje majore: are o sursă care se reînnoiește continuu, este nepoluantă, este cea mai ieftină metodă de stocare a unor cantități mari de energie electrică și poate adapta cu ușurință cantitatea de energie produsă la necesarul consumatorilor. Energia hidroelectrică reprezintă aprox. 17% din capacitatea globală de generare și aprox. 20% din energia produsă în fiecare an.

Problematika abordată de autor în această lucrare se referă la sistemele de izolație ale înfășurărilor hidrogenatoarelor, ținând cont că în prezent, statistic, circa 40 % din defectele [140] care apar la mașinile electrice în funcționare, apar datorită defectelor sistemelor de izolații. La unele tipuri de echipamente, acest procent poate fi și mai ridicat.

Bibliografia în domeniu, experiența de exploatare, precum și experiența anterioară a autorului în compartimentul „Hidrogenatoare” al SC UCM Reșița SA, converg spre concluzia că există mari necesități dar și oportunități de îmbunătățire teoretică și practică în ceea ce privește sistemul de izolație al hidrogenatoarelor.

Cunoașterea stării tehnice a izolației bobinajului stator al hidrogenatorului este esențială în:

- estimarea duratei de viață rămase a hidrogenatorului
- aprecierea fezabilității re tehnologizării sau îmbunătățirii caracteristicilor nominale ale hidrogenatorului
- aprecierea potențialului de funcționare satisfăcătoare continuă a hidrogenatorului pe perioada duratei sale de viață

Izolația bobinajului stator al hidrogenatoarelor trebuie să aibă dimensiuni optime, rezistând în timp la diverse solicitări la care este supus hidrogenatorul.

Problematika lucrării de față este puțin abordată în literatura de specialitate și elaborarea acestei lucrări a rezultat deopotrivă ca urmare a cerințelor constructorului și ale numeroșilor beneficiari de hidrogenatoare.

În elaborarea tezei s-au avut în vedere următoarele **obiective**:

- Stabilirea și sintetizarea principalelor mărimi caracteristice pentru studiul izolației bobinelor stator. Acest obiectiv a rezultat ca urmare a faptului că nu există o abordare unitară și sistematizată în acest domeniu.
- Elaborarea modelelor matematice continue ale fenomenelor care apar în sistemele de izolație și apoi discretizarea acestor modele în scopul simulării, utilizând metoda elementelor finite, metodă cu o largă aplicabilitate în studiul sistemelor cu mașini electrice.

- Simularea comportării sistemului de izolație.
- Elaborarea unui ALGORITM de calcul și al unui program de dimensionare hidrogenerator, în totalitate original, prin care să se realizeze optimizarea dimensiunilor geometrice ale generatorului după curentul nominal stator, având ca rezultat mărirea preciziei rezultatelor obținute și reducerea timpului destinat dimensionării hidrogeneratoarelor.
- Realizarea unui sistem de monitorizare a izolației utilizând logica fuzzy, care cuprinde atât sistemul fuzzy cât și un sistem conceput de către autor pentru achiziționarea mărimilor de interes la izolația bobinelor hidrogeneratorului.
- Elaborarea unui model on-line pentru estimarea continuă a timpului de viață al izolației bobinajelor stator.
- Elaborarea unui program de testare a sistemului de izolației pentru o diagnosticare mai precisă a stării izolației și compararea rezultatelor practice obținute în urma testării pe stand cu rezultatele obținute în urma simulării.
- În final, un ultim obiectiv constă în prezentarea contribuțiilor autorului în problematica dezvoltării metodelor de testare și diagnosticare a sistemelor de izolații, ca rezultat al unei activități de cercetare teoretică și aplicativă desfășurată pe parcursul mai multor ani privind realizarea și optimizarea izolațiilor.

Parte din studiile prezentate de autor în cadrul tezei, constituie subiectul a 21 lucrări științifice prezentate în cadrul unor conferințe naționale și internaționale fiind publicate în reviste și volume de specialitate.

Contribuțiile de ordin teoretic, modelarea și simularea izolațiilor, corelarea rezultatelor teoretice cu rezultatele practice obținute prin teste conferă lucrării un caracter de originalitate și aplicabilitate practică.

1.2. Prezentarea conținutului tezei

Obiectivele propuse au condus la structurarea lucrării pe 9 capitole al căror conținut este prezentat în continuare.

Capitolul 1 ilustrează oportunitatea și obiectivele tezei; s-a relevat importanța obținerii energiei prin sisteme hidroelectrice; s-au prezentat sintetic principalele direcții de cercetare urmărite de autor în prezenta lucrare și necesitatea acestora.

Capitolul 2 prezintă o sinteză a stadiului actual al diagnosticării sistemelor de izolație ale mașinilor electrice, cu precădere la mașinile sincrone. Sunt evidențiate contribuțiile teoretice aduse în studiul sistemelor de izolație: materiale noi utilizate, metode aplicate și rezultate obținute cu acestea, testări asupra izolațiilor, realizate atât prin metode clasice cât și folosind tehnici/tehnologii moderne, în scopul îmbunătățirii performanțelor, a identificării defectelor și a prelungirii duratei de viață.

În **capitolul 3** se face o sinteză a principalelor mărimi specifice pentru estimarea calității izolației bobinelor stator ale hidrogeneratoarelor: rezistența de izolație, coeficientul de absorbție, indicele de polarizare, capacitatea electrică, permitivitatea relativă, factorul de pierderi dielectrice, mărimile descărcărilor parțiale, rigiditatea dielectrică, evidențiindu-se sub aspect fenomenologic rolul fiecăreia în studiul problematicii.

Capitolul 4 prezintă modelarea și simularea sistemelor de izolații ale bobinelor stator utilizând mediul de simulare ANSYS, bazat pe metoda elementelor finite.

Obiectivele capitolului sunt:

- elaborarea modelelor matematice utilizate pentru studiul câmpului termic și respectiv electric care apar în sistemul bobină – izolație – aer;
- discretizarea modelelor matematice cu ajutorul metodei elementelor finite;
- determinarea etapelor utilizate în simularea sistemului bobină – izolație – aer;
- stabilirea unui model geometric și discretizarea acestuia folosind metoda elementelor finite;
- simularea sistemelor de izolație la diverse solicitări.

Capitolul 5, în totalitate original, ilustrează algoritmul pentru determinarea parametrilor geometrici, implementarea acestuia pe calculator, printr-un program scris în, Visual Basic. Au fost create interfețe prietenoase, prin care se poate realiza și verifica rapid hidrogenatorul din punct de vedere electromagnetic având ca bază parametrii geometrici.

În **capitolul 6**, în totalitate original, se prezintă sistemul de monitorizare a stării izolației utilizând logica fuzzy având ca și consecință prevenirea apariției unor defecte catastrofale ale izolației în timpul funcționării hidrogenatorului.

Capitolul 7, în totalitate original, prezintă un model pentru estimarea continuă on-line a timpului de viață al izolației bobinajului stator, având ca bază parametrul tangenta unghiului de pierderi dielectrice, tg δ .

Capitolul 8 sintetizează programul de testare pentru determinarea stării izolației bobinajului stator al hidrogenatoarelor și cauzele deteriorării izolațiilor, prezentând rezultatele obținute în urma testărilor bobinelor pe stand și defectele care apar în izolație (arderea izolației, defecte apărute ca urmare a descărcărilor parțiale, defecte apărute în urma testării la tensiunea de anduranță) și compararea acestor rezultate cu rezultatele obținute în urma simulării.

În **capitolul 9** sunt sistematizate concluziile rezultate în urma realizării actualei teze, evidențiindu-se contribuțiile originale aduse în dezvoltarea dimensionării, modelării, simulării, testării și a diagnosticării izolațiilor.

2. CERCETĂRI PRIVIND SISTEMELE DE IZOLAȚIE ALE MAȘINILOR ELECTRICE

O componentă importantă a sistemului de izolație a hidrogenatoarelor o reprezintă izolația bobinajului stator.

Funcționarea în parametri nominali a mașinilor electrice de înaltă tensiune depinde, într-o măsură importantă, de integritatea sistemului de izolație a bobinajului stator.

De asemenea, timpul de viață al mașinilor electrice depinde esențial de izolația bobinajului stator. În cazul apariției defectelor, statorul trebuie rebobinat ceea ce implică un preț de cost ridicat, ducând și la prelungirea timpului în care generatorul este scos din funcțiune.

De aceea, starea sistemului de izolație și defectele premature apărute din cauza acestuia reprezintă probleme majore cu care se confruntă fabricanții de mașini electrice și utilizatorii acestora. [85].

O posibilă clasificare a defectelor care apar în cadrul hidrogenatoarelor [1], sunt ilustrate în figura 2.1.

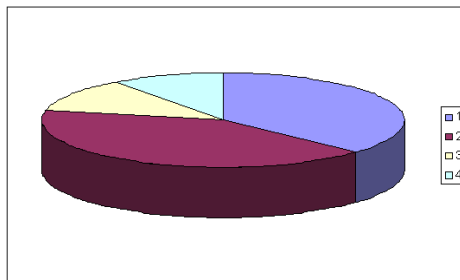


Figura 2.1. Clasificare defecte apărute la generator:

1 – 41 % stator; 2 – 37% lagăre; 3 – 10% rotor; 4 – 12 % alte defecte

Cercetările efectuate asupra sistemului de izolație sunt complexe deoarece sistemul de izolație depinde de un număr mare de parametri care influențează timpul de viață al acestuia și implicit al hidrogenatorului.

Timpul de străpungere al izolației [140] este considerat ca fiind suma dintre intervalul de timp de început a defectului și intervalul de timp de propagare a defectului.

Pentru a obține un timp de viață cât mai mare trebuie ca defectele rezultate în urma izolării bobinelor să fie reduse, implicând folosirea unor tehnici de izolare performante cât și folosirea materialelor izolante cu proprietăți ridicate, care au o comportare foarte bună la temperaturi înalte.

Totodată, timpul de propagare a defectelor poate fi mărit prin dimensionarea corespunzătoare a izolației și prin diagnosticarea stării izolației la intervale de timp cât mai scurte pentru a evita propagarea defectelor în masa izolației.

În [17] se prezintă descrierea cronologică a materialelor și a sistemelor de izolație folosite în fabricarea bobinajelor stator.

Proprietățile materialelor utilizate în sistemele de izolație sunt determinate de o serie de factori, cel mai important dintre aceștia fiind capacitatea materialului de a suporta supratemperaturi.

Conductivitatea materialului izolant variază exponențial cu câmpul electric creat de bobină [18].

În izolațiile bobinajelor stator, în timpul funcționării, apar gradienti mari de temperatură în cazul regimurilor de avarii, datorate supratensiunilor care pot conduce la străpungerea izolației.

În [15] se arată că folosind condițiile de frontieră de tip Euler, în studiul câmpului termic la sistemele de izolație, gradientii de temperatură pot fi redați explicit, fiind mai ușor de interpretat.

Subsistemul de izolație al statorului cauzează cel mai ridicat număr de defecte, cca. 41 % din defecte [140]. Calitatea acestuia se poate stabili în urma testărilor efectuate atât în timpul fabricației bobinajului stator cât și din testele efectuate în exploatarea generatoarelor. Aceste teste sunt standardizate și prin intermediul lor se determină o serie de parametri de care depinde integritatea izolației bobinajului stator.

În urma apariției noilor izolații, standardele în vigoare trebuiau să revizuiască o serie de teste la care se supune izolația bobinajului, astfel încât durata de viață garantată a motoarelor și generatoarelor să fie de 20-40 ani.

O dată cu schimbarea sistemului de izolație și testele și modul de interpretare al acestora trebuie schimbat. O largă varietate de teste au fost dezvoltate și standardizate pentru a ajuta fabricanții și utilizatorii de bobinaje pentru motoare și generatoare în evaluarea izolației electrice [132].

Fabricarea, impregnarea și modul de izolare au un rol important în asigurarea calității izolației. O impregnare insuficientă cauzează goluri și delaminări în material, având ca rezultat reducerea timpului de străpungere a izolației. Materialele pe bază de mică cu țesătură de sticlă sunt mai puțin sensibile la această impregnare [141].

Degradarea (îmbătrânirea) fizică, chimică și electrică a izolației contribuie la deteriorarea performanțelor acesteia [30].

Unele dintre cele mai importante cauze de deteriorare a izolației în mașinile electrice de înaltă tensiune îl reprezintă tensiunile mecanice cauzate de procesele termice apărute în timpul funcționării mașinilor electrice, de exemplu, la pornirea sau oprirea acestora sau la schimbarea regimului de funcționare. Aceste tensiuni mecanice de natură termică apărute în timpul funcționării anormale a mașinilor electrice implică variații mari ale gradientilor termici ai materialelor folosite la izolații. Când mașina electrică funcționează în regim de avarie (la suprasarcină) temperatura bobinajului crește ceea ce duce la creșterea temperaturii izolației. Dacă izolația nu rezistă la această temperatură ea se distruge.

Pentru a evalua starea izolației [81] este necesar să se determine anumite mărimi caracteristice izolației. În baza valorilor acestor mărimi și a comparației acestora cu valorile indicate de standardele în vigoare se apreciază starea izolației și gradul de deteriorare a acestora. *Aceste mărimi care permit evaluarea stării izolației sunt: rezistența de izolație, coeficientul de absorbție, indicii de polarizare, factorul de pierderi dielectrice, descărcările parțiale, rigiditatea dielectrică (tensiunea de străpungere).*

Dacă izolația bobinajului stator este incorect dimensionată (având o grosime necorespunzătoare) aceasta se străpunge atunci când apar supratensiuni de scurtă durată. Străpungerea izolației duce la topirea conductoarelor de cupru având ca și

consecință arderea / topirea masivă a izolației ceea ce duce la compromiterea întregului bobinaj [131], [95], [140].

Testele dielectrice fac parte din programul de întreținere periodic. Acestea sunt de un real folos pentru determinarea condițiilor actuale a stării izolației bobinajului stator în scopul prevenirii apariției defectelor neprevăzute și nedetectabile. Dintre aceste teste cel mai important se consideră a fi testul de determinare al **unghiului de pierderi dielectrice $tg\delta$** (numit și factor de pierderi dielectrice sau tangenta unghiului de pierderi dielectrice) [52].

Prin examinarea tangentei unghiului de pierderi dielectrice $tg\delta$ se apreciază îmbătrânirea (degradarea) izolației [47].

La mașinile electrice rotative de înaltă tensiune, este foarte important să se cunoască valoarea factorului de pierderi dielectrice $tg\delta$, care se modifică cu tensiunea de lucru a statorului. În practică măsurarea acestuia se face la tensiuni de încercare de la $(0,2 \div 1,2)U_n$, în trepte de $0,2 U_n$ [81]. Valoarea **factorului de pierderi dielectrice $tg\delta$** este suma dintre factorul de pierderi prin conducție, factorul de pierderi prin polarizare și factorul de pierderi prin ionizare.

Factorul de pierderi dielectrice are o valoare mai mică la izolațiile realizate din mică față de izolațiile care conțin rășină epoxy, având ca rezultat prelungirea timpului de viață [144], [145].

Descărcările parțiale (PD – partial discharges) permit, de asemenea, evaluarea stării izolației, fiind un alt mijloc de detectare al defectelor.

Începând cu 1980, multe firme au adoptat testarea descărcărilor parțiale ca mijloc de determinare a stării izolației față de masă în hidrogenatoare. Testul de descărcări parțiale s-a dovedit a fi un indicator sensibil al cauzelor de deteriorare a bobinajului stator [28], [39].

Dintre diferitele metode de testare, măsurarea descărcărilor parțiale a fost de un real folos pentru detectarea incipientă a defectelor prin creșterea amplitudinii acestora [57].

Descărcările parțiale pot indica prezența impregnării imperfecte, uscarea incompletă, prezența impurităților în timpul izolării bobinei [28].

Perfecționarea metodei prin utilizarea senzorilor și a aparatelor electronice performante a dus la aplicarea pe scară tot mai largă a acestei metode de diagnoză. [133], [85].

În ultimii ani investigațiile descărcărilor parțiale cu tehnica digitală au o largă răspândire. Ca și metode de evaluare s-au utilizat metodele grafice și corelarea graficelor cu tipurile de defecte [44], [143].

Metodele convenționale s-au bazat pe interpretarea graficului obținut cu ajutorul oscilografului limitând recunoașterea tipurilor de defecte. Măsurarea descărcărilor parțiale cu ajutorul tehnicii digitale a dus la o mai bună interpretare a acestora, graficele obținute putând fi stocate într-o bază de date care servește la compararea acestora în timp, prin înregistrarea continuă a mai multor parametrii, în baza cărora se evaluează defectele interne ale izolației [53].

Unele dintre problemele care apar ca urmare a măsurării on-line a descărcărilor parțiale în mașinile electrice sunt: calibrarea măsurătorilor; nivelul mare de zgomot, care rezultă în urma interferenței dintre sistemul de măsurare și bobinaj; atenuarea și distorsiunile semnalului descărcărilor parțiale în timpul transmiterii acestuia de la bobinaj la PC [82].

Descărcările parțiale nu indică cauza defectului, dar cu ajutorul lor se determină gradul de degradare al izolației. Această degradare nu poate fi vizualizată cu ochiul liber ci în urma analizei măsurărilor descărcărilor parțiale, în baza analizei grafice. În ordinea estimării timpului de viață a izolației măsurarea acestor

descărcări parțiale trebuie să se facă în mod continuu, rezultatele trebuind consemnate. [142], [143].

Până la implementarea sistemelor de calcul, proiectarea mașinilor electrice s-a făcut pe cale clasică prin utilizarea modelelor unidimensionale care presupun că părțile electromagnetice ale mașinilor electrice sunt modelate prin elemente omogene. Aceste modele au fost utilizate cu precădere pentru calculul mașinilor electrice în regim staționar.

Ca urmare a dezvoltării metodelor numerice cu aplicații în mașinile electrice, în prezent este utilizată cu precădere metoda elementelor finite.

În ultimii ani metoda elementelor finite a fost aplicată cu succes în tot mai multe aplicații inginerești [89].

Dezvoltarea metodei cu elemente finite a dus la o optimizare a modelelor cu elemente finite ale mașinilor electrice. Primele optimizări bazate pe metoda cu elemente finite au fost realizate la sfârșitul anilor 80.

Simularea mașinilor electrice se aplică cu succes pentru studiul fenomenelor electrice, electromagnetice, termice și mecanice.

Modelarea cu elemente finite a câmpului termic produs în sistemul de izolație, cu ajutorul metodei Euler, permite o analiză detaliată a fenomenelor apărute în izolația acestuia, analiză dificilă sau imposibil de realizat pe cale clasică pentru mașinile electrice [135].

Prin utilizarea metodei elementelor finite în spațiul bidimensional, se elimină componentele mărimilor după direcția z . Ecuațiile câmpului electromagnetic pot fi scrise sub formă matricială, folosind metoda reziduurilor ponderate a lui Galerkin [89].

Calculul numeric, folosind metoda descompunerii pe componente, a câmpului electric, utilizând metoda elementelor finite, este de un real folos specialiștilor de mașini electrice pentru a înțelege mai bine fenomenele electrice care apar în timpul funcționării mașinilor electrice atât în regim nominal de funcționare cât și în regimurile de avarie. De asemenea, prin intermediul acestei metode se pot detecta defectele care apar în sistemul de izolație al acestora, încă din faza de proiectare, la diferite regimuri de funcționare [151].

În simularea sistemului de izolație, densitatea de curent este considerată constantă pentru toate conductoarele elementare care formează bobina. [78].

Acuratețea rezultatelor obținute depinde de cunoașterea proprietăților de material menționate în funcție de temperatură. [138].

Pentru simplificarea calculului în cazul modelelor cu elemente finite se pot impune condiții de frontieră de tip Neuman și de tip Dirichlet ceea ce conduce la reducerea sistemului de ecuații, reducându-se implicit și timpul de calcul [45], [29].

Spre deosebire de soluțiile analitice, la care ecuațiile descriu câmpul de temperatură în orice punct, soluțiile numerice cu elemente finite permit determinarea temperaturii în puncte discrete, utilizând condiții de frontieră de tip Neumann. [123].

Domeniul este discretizat și analizat în acord cu condițiile de frontieră care pot fi particularizate pentru regimul tranzitoriu al transferului termic în sistemul de izolație [27].

Dacă domeniul uniform ce înconjoară zona studiată are dimensiuni mult mai mari față de zona studiată, domeniul se poate considera infinit. Acest domeniu trebuie discretizat cu ajutorul elementelor finite. [93].

Pentru calculul potențialului se aplică diverse condiții de interfață și de limită care constau, în esență, în relațiile pe care trebuie să le satisfacă potențialele dacă în domeniul studiat intervin medii cu proprietăți diferite. [94].

Necesitatea alegerii altui tip de element finit, de tip patruleter, pentru bobină duce la un calcul exact al potențialului din jurul ei. [87].

Pentru a se asigura univocitatea determinării potențialului este necesar să se impună două condiții și anume: în punctele domeniului Ω să se cunoască divergența de volum a potențialului și pe frontiera S a lui Ω să se impună o *condiție de frontieră*, de exemplu, componenta normală a potențialului să fie cunoscută, utilizând operatorul divergență. [89].

Pe baza modelului matematic cu elemente finite se pot interpreta mai simplu rezultatele obținute în urma simulărilor.

Metoda elementelor finite își găsește aplicabilitate și în studiul analizelor cuplate electrotermice, domeniile utilizate putând fi discretizate cu diverse tipuri de elemente finite pentru un calcul cât mai exact. [33].

Termenul de analiză cuplată este utilizat în multe aproximări numerice și în numeroase aplicații. [138], [151].

Clasificarea analizelor cuplate se face în baza studierii simultane a proceselor fizice, a modelelor matematice cu elemente finite sau a modelelor geometrice. Ecuațiile care descriu câmpul electric pot fi scrise sub formă matricială și cu aproximarea Galerkin, aceste ecuații putând fi discretizate în elemente finite. [53].

Optimizarea sistemelor de izolație din punct de vedere tehnic și economic oferă înțelegerea fenomenelor apărute în izolația bobinelor stator cât și determinarea timpului de viață a mașinilor electrice. Utilizarea metodelor moderne de diagnoză a defectelor apărute la izolațiile bobinajelor stator duce la o dimensionare optimă a izolației. [81].

Defecte frecvente apar din cauza bobinajului stator, la care creșterea tensiunii duce la o supraîncălzire a acestuia. Detectarea acestor defecte se poate realiza și prin tehnici bazate pe logica fuzzy [35].

Verificarea agregatelor se face periodic. Această verificare poate fi făcută prin metode clasice, dar acestea au numeroase dezavantaje, cum ar fi prelungirea timpului de verificare prin oprirea agregatului, necesitatea unui expert pentru evaluarea parametrilor, etc. Utilizând logica fuzzy se pot detecta defecte încă din faza incipientă fără a mai fi nevoie de oprirea agregatului. [91].

Mentenanța generatoarelor presupune și mentenanța sistemului de izolație. Această mentenanță include: reabilitarea izolației, prelungirea timpului de viață a generatorului și reducerea viitoarelor costurilor de întreținere. Pe baza măsurătorilor efectuate și a evaluării parametrilor mășurați se iau decizii pentru reabilitarea sistemului de izolație astfel încât să se evite apariția defectelor. [54].

3. MĂRIMI SPECIFICE PENTRU STUDIUL IZOLAȚIEI BOBINELOR STATOR ALE HIDROGENERATOARELOR

3.1. *Introducere*

Acest capitol, în baza fenomenelor dielectrice care apar în izolații, introduce principalele mărimi specifice în baza cărora se determină calitatea izolației bobinelor stator.

Această izolație prezintă o importanță deosebită, deoarece de calitățile ei depinde în mare măsură buna funcționare a întregului echipament.

În timpul funcționării echipamentelor, izolația este supusă solicitărilor termice, mecanice și electrice de durată, care conduc la apariția unor fenomene de îmbătrânire.

Sistemele de izolații au evoluat în decursul anilor prin apariția unor noi materiale, a unor noi combinații de materiale, precum și a unor noi tehnici de izolare. Această evoluție a fost impusă și de creșterea puterii unitare a echipamentelor, ceea ce a condus la creșterea solicitărilor la care sunt supuse izolațiile.

3.2. *Mărimi specifice izolației*

Pe baza fenomenelor dielectrice care apar în izolație și anume conducția și polarizarea, se definesc mărimile specifice izolației. Cu ajutorul acestor mărimi se stabilește calitatea izolației.

Rezistența de izolație

În majoritatea cazurilor rezistența de izolație [81] a materialelor electroizolante folosite la izolații este definită ca:

$$R_{iz} = \frac{U}{I} = \rho \frac{a}{s} \quad (3.1)$$

unde:

- a – grosimea dielectricului între electrozi, în m;
- s – secțiunea electrodului așezat pe dielectric în m²;
- ρ – rezistivitatea dielectricului, în Ωm.

Rezistivitatea depinde de mai mulți factori, în primul rând de temperatură.

Spre deosebire de metale, rezistivitatea materialelor electroizolante scade cu creșterea temperaturii. Variația rezistivității, și în consecință a rezistenței de izolație, poate să fie semnificativă chiar la variații mici de temperatură. Din acest motiv, în cadrul încercărilor, unde variația rezistenței de izolație a materialelor electroizolante influențează rezultatele măsurărilor, trebuie să se ia măsuri pentru efectuarea probelor la aceeași temperatură [69]. În caz contrar, datele

experimentale trebuie să fie corectate având ca bază de corecție o temperatură de referință.

Valoarea rezistenței de izolație trebuie să fie mai mare sau cel puțin egală cu 100 MΩ [64].

Coeficientul de absorbție

Coeficientul de absorbție (k_{abs}), [81], este definit ca raportul dintre rezistența de izolație măsurată la 60 secunde (R_{60}) și rezistența de izolație măsurată la 15 secunde (R_{15}) de la aplicarea tensiunii, adică:

$$k_{abs} = \frac{R_{60}}{R_{15}} \quad (3.2)$$

Acest coeficient de absorbție permite să se aprecieze starea de umiditate a dielectricului [146], . Dacă acest coeficient are valori mici izolația este umedă. Pentru valori mari izolația este uscată.

Indicele de polarizare

Indicele de polarizare (k_p), [81], este definit ca raportul dintre rezistența de izolație măsurată la 10 secunde (R_{10}) și rezistența de izolație măsurată la 60 secunde (R_{60}) de la aplicarea tensiunii, adică:

$$k_p = \frac{R_{10}}{R_{60}} \quad (3.3)$$

Acest indice de polarizare permite să se aprecieze starea de umiditate a dielectricului [146]. Dacă acest indice are valori mici izolația este umedă. Pentru valori mari izolația este uscată.

Capacitatea electrică și permitivitatea relativă

În cazul în care, în cadrul unui echipament, izolația electrică se află în contact cu două piese metalice (armături) cu potențiale diferite, se formează un condensator. Izolația, în acest caz, are rol de dielectric.

Măsurarea valorii capacității acestui condensator este utilă ca metodă de verificare preventivă a izolației.

Valoarea capacității unei izolații depinde de:

- temperatura ei;
- gradul de umiditate;
- frecvența tensiunii aplicate între armături.

Există criterii de apreciere a gradului de umiditate pe baza măsurării valorii capacității la temperaturi diferite sau la frecvențe diferite [72].

Criteriul capacitate - temperatură

Acest criteriu constă în măsurarea capacității izolației în intervalul de temperatură cuprins între 20°C și 70°C, în condițiile aplicării unei tensiuni alternative de 50 Hz. Raportul:

$$a = \frac{C_{70}}{C_{20}} \quad (3.4)$$

unde C_{70} și C_{20} reprezintă capacitatea electrică măsurată la 70°C și respectiv la 20°C, poate indica starea de umiditate a izolației.

În figura 3.1. se prezintă curbele $C=f(t)$ pentru o izolație uscată și pentru o izolație umedă.

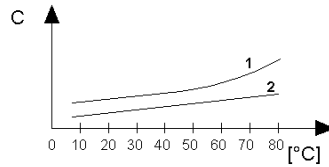


Figura 3.1. Variația capacității izolației cu temperatura
1 – la o izolație umedă; 2 – la o izolație uscată

Criteriul capacitate – frecvență

Se măsoară capacitatea C_{50} la frecvența industrială de 50 Hz și C_2 la o frecvență mult mai scăzută, de exemplu 2 Hz, ambele măsurători făcându-se la aceeași temperatură. Raportul:

$$b = \frac{C_2}{C_{50}} \quad (3.5)$$

poate indica starea de umiditate a izolației.

Permitivitatea relativă

Permitivitatea este o mărime de material, definită de legea legăturii dintre inducția electrică D , intensitatea câmpului electric E și polarizația permanentă P_p .

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \times \varepsilon_r \quad (3.6)$$

$$D = \varepsilon E + P_p \quad (3.7)$$

unde:

ε – permitivitatea absolută;

ε_0 – permitivitatea vidului;

ε_r – permitivitatea relativă;

Experimental, permitivitatea relativă se determină prin raportul dintre capacitatea C_x a unui condensator la care spațiul dintre și în jurul electrozilor este integral și exclusiv umplut cu material izolant, respectiv și capacitatea C_0 a aceleiași dispuneri a electrozilor în vid:

$$\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (3.8)$$

Această mărime se utilizează, de obicei, pentru aprecierea calității unui tip de izolație în raport cu altele.

Măsurarea permitivității relative poate da informații privind higroscopicitatea materialelor izolante; creșterea permitivității relative indică creșterea gradului de umiditate al izolației [52].

Factorul de pierderi dielectrice ($\text{tg } \delta$)

Un condensator cu dielectric ideal, fără pierderi, decalează curentul electric rezultat în cazul aplicării pe armăturile sale a unei tensiuni alternative sinusoidale, cu 90° înaintea tensiunii (figura 3.2).

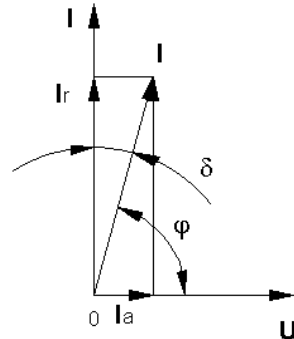


Figura 3.2. Diagrama fazorială a curenților

Un condensator cu dielectricul format dintr-un material electroizolant oarecare face ca decalarea curenului să fie mai mică decât 90° , datorită atât efectului de polarizație electrică, cât și a curenților de conducție și a curenților de suprafață.

Unghiul δ cu care este redus decalajul curenului în raport cu decalajul ideal reprezintă unghiul de pierderi dielectrice și este dat de relațiile:

$$\delta = \frac{\pi}{2} - \varphi \quad (3.9)$$

și

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\text{Puterea activă absorbită de condensator}}{\text{Puterea reactivă a condensatorului}} = \frac{P}{Q} \quad (3.10)$$

Puterea activă absorbită de condensator reprezintă pierderile prin dielectric, puterea reactivă Q poate fi scrisă în funcție de tensiunea alternativă aplicată U și capacitatea condensatorului C :

$$Q = \frac{U^2}{X} = U^2 \times C \times \omega \quad (3.11)$$

unde X este reactanța capacitivă, iar ω pulsația curenului alternativ sinusoidal aplicat.

$$P = Q \times \operatorname{tg} \delta = U^2 \times C \times \omega \times \operatorname{tg} \delta \quad (3.12)$$

Pentru U , ω și C constante, pierderile în dielectric sunt proporționale cu $\operatorname{tg} \delta$, care din acest motiv se numește factorul de pierderi dielectrice sau tangenta unghiului de pierderi dielectrice [81].

Pierderile dielectrice sunt în strânsă legătură cu conducția dielectrică, cu polarizarea dielectrică, cu efectul de suprafață și cu ionizările golurilor de aer ce pot să se găsească în izolație.

Dacă nu se ține seama de curenții ce parcurg suprafața, se poate spune că factorul de pierderi dielectrice nu depinde de dimensiunile dielectricului. În schimb el depinde de tensiunea aplicată și de temperatură, crescând cu acestea.

Dacă se trasează curba de variație $\operatorname{tg} \delta$ cu tensiunea aplicată (figura 3.3) se constată că ea prezintă un punct A de schimbare pronunțată a pantei curbei, punct care corespunde tensiunii de la care începe ionizarea incluziunilor de aer din masa izolației.

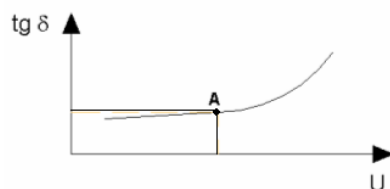


Figura 3.3. Variația factorului de pierderi dielectrice cu tensiunea

Din figura 3.3 se observă că punctul A, denumit pragul de ionizare, trebuie să se găsească deasupra tensiunii de serviciu, pentru toate izolațiile care nu pot suporta efectele de ionizare, spre a evita o uzură prematură a izolației.

De asemenea, unghiul dintre asimptotele la cele două ramuri ale curbei, în raport cu pragul de ionizare, trebuie să fie cât mai mic. Un unghi mare indică existența în masa izolației a unui număr mare de incluziuni de aer și deci o calitate slabă a izolației.

Deoarece $\text{tg} \delta$ este dependentă de temperatura izolației este foarte important, pentru ca rezultatele să fie comparabile, ca măsurătorile să se facă la aceeași temperatură.

Experiența arată că verificarea factorului de pierderi dielectrice este unul din mijloacele cele mai eficiente de apreciere globală a stării unei izolații [47].

Indicele de pierderi dielectrice

Indicele de pierderi dielectrice [54] este un alt factor important de apreciere a calității unei izolații.

El este egal cu produsul dintre factorul de pierderi dielectrice și permitivitatea relativă, măsurată la aceeași tensiune:

$$\varepsilon''_r = \varepsilon_r \times \text{tg} \delta \quad (3.13)$$

Acest indice depinde de frecvența tensiunii aplicate, de temperatura și de gradul de umiditate al izolației.

Mărimi caracteristice ale descărcărilor electrice în materiale electroizolante

În timpul exploatarei, izolația bobinajului stator poate fi supusă unor solicitări suplimentare de tensiune, cum ar fi supratensiunile de comutație, supratensiunile atmosferice sau supratensiunile accidentale provocate de defecțiuni în exploatare.

Aceste supratensiuni pot da naștere în izolație, în raport de condițiile existente, la fenomene electrice diferite, uneori însoțite de efecte sonore și luminoase, cunoscute sub numele de: descărcări; străpungeri; conturnări; scânteieri; amorsări; efluvii; efecte Corona.

Izolațiile, în special cele stratificate, nu pot fi considerate ca perfect omogene. Există întotdeauna vacuole de dimensiuni mici (incluziuni) umplute cu gaz, care rezultă din contracția diferită a constituenților izolației sau chiar din însuși procesul tehnologic de execuție.

Sub acțiunea unui câmp electric, aceste vacuole se ionizează și când tensiunea între două fețe opuse atinge gradientul distructiv al gazelor închise în vacuolă, apar descărcările parțiale (ionizări) [28].

Aceste descărcări parțiale depind ca număr și amplitudine de gradientul de tensiune, de rezistența superficială a pereților vacuolei și de dimensiunile sale, de natura și presiunea gazelor închise.

Apariția și dezvoltarea acestor descărcări parțiale interne are un efect nociv asupra izolației, în sensul că aceste vacuole se măresc cu timpul, se formează canale prin unirea mai multor vacuole, conducând în final la formarea unor cratere;

în felul acesta izolația se slăbește și pot să apară străpungeri care conduc la distrugerea izolației.

Mărimile caracteristice ale descărcărilor parțiale sunt următoarele:

- *sarcina aparentă a unei descărcări parțiale* q , este sarcina electrică care, injectată instantaneu la bornele obiectului încercat, va modifica instantaneu tensiunea la bornele sale cu aceeași cantitate ca descărcarea parțială însăși; se exprimă în coulombi, [C].

- *curentul de descărcare mediu* I , este media sumei valorilor absolute ale sarcinilor aparente ale descărcărilor parțiale, pe o perioadă T de timp:

$$I = \frac{1}{T} \sum_{v(t)}^{v(t+T)} |q_v| \quad (3.14)$$

și se exprimă în A sau Cs^{-1} .

- *debitul pătratic al sarcinilor aparente* D este media sumei pătratelor sarcinilor aparente ale descărcărilor parțiale pe o perioadă T de timp:

$$D = \frac{1}{T} \sum_{v(t)}^{v(t+T)} q_v^2 \quad (3.15)$$

și se exprimă în C^2s^{-1} .

- *puterea disipată prin descărcări parțiale* P este puterea medie furnizată la bornele obiectului de încercat, datorită descărcărilor parțiale pe o perioadă T de timp:

$$P = \frac{1}{T} \sum_{v(t)}^{v(t+T)} q_v U_v \quad (3.16)$$

unde U_v reprezintă valorile instantanee de rang v ale tensiunii la bornele obiectului de încercat, corespunzătoare sarcinilor q ; se exprimă în W.

În practica curentă se mai utilizează și mărimile [107]:

- *curentul mediu de ionizare* I_m , exprimat în A:

$$I_m = \sqrt{2Df_i} \quad (3.17)$$

unde f_i este frecvența tensiunii de încercare;

- *debitul pătratic redus al sarcinilor aparente* d , exprimat în $C^2s^{-1}F^{-1}$:

$$d = \frac{D}{C} \quad (3.18)$$

unde C este capacitatea, în F, a obiectului de măsurat.

- *debitul pătratic redus al sarcinilor aparente* δ , exprimat în decibeli (dB):

$$\delta = 10 \log \frac{d}{d_0} \quad (3.19)$$

unde d_0 este un nivel de bază al debitul pătratic redus, corespunzător tensiunii de serviciu a echipamentului. Se adoptă pentru nivelul de bază valoarea $10^{-9}C^2s^{-1}F^{-1}$.

- *curentul mediu de ionizare redus* i_m , exprimat în AF^{-1} :

$$i_m = \frac{I_m}{C} \quad (3.20)$$

unde C este capacitatea, în F, a obiectului de încercat.

Măsurarea descărcărilor parțiale [57] permite sesizarea din timp a creșterii nivelului lor și deci evidențierea apariției unor defecte evolutive în masa izolației sau a îmbătrânirii generale a izolației.

Rigiditatea dielectrică

Rigiditatea dielectrică reprezintă valoarea maximă a intensității câmpului electric în care se poate afla izolația, fără să apară străpungeri în masa ei.

În mod practic, rigiditatea dielectrică [39] se determină ca fiind raportul dintre tensiunea de străpungere (U_{str}) în anumite condiții de încercare și distanța dintre electrozii între care se aplică tensiunea:

$$E_{str} = \frac{U_{str}}{d} \quad [V/m] \quad (3.21)$$

Rigiditatea dielectrică este o mărime convențională, deoarece valoarea ei este afectată de o serie de factori ce intervin în timpul încercării. Acești factori sunt: frecvența, forma de undă și durata aplicării tensiunii; grosimea și omogenitatea epruvetei și prezența tensiunilor mecanice; prezența incluziunilor gazoase, a umidității și a altor agenți de contaminare; temperatura, presiunea și umiditatea mediului ambiant; dimensiunile și conductivitatea termică a electrozilor.

Indicarea rigidității dielectrice a unei izolații trebuie însoțită de aceste condiții de încercare; în caz contrar, valoarea rigidității dielectrice nu are nici o semnificație.

3.3. Concluzii

În urma studiului și experienței în domeniul izolațiilor s-a realizat o sinteză cu mărimile specifice izolației bobinajului stator al hidrogenatoarelor.

Pe baza acestor mărimi se stabilește calitatea izolației.

Variația rezistenței de izolație depinde puternic de temperatură: la variații mici de temperatură are loc o creștere rapidă a rezistenței de izolație.

Valorile coeficientului de absorbție și al indicelui de polarizare permit aprecierea stării de umiditate a dielectricului, astfel:

- o valoare mică indică o izolație umedă;
- o valoare mare indică o izolație uscată;

Pentru o izolație uscată, capacitatea trebuie să varieze liniar cu temperatura.

Valori mari ale capacității indică o izolație umedă.

Creșterea valorii permitivității relative indică creșterea gradului de umiditate al izolației.

Faptul că factorul de pierderi dielectrice, $tg\delta$, depinde semnificativ de temperatura izolației se impune ca măsurătorile asupra izolației să se efectueze la aceeași temperatură.

Valoarea mare a factorului de pierderi dielectrice, $tg\delta$, indică existența în masa izolației a unui număr mare de incluziuni de aer și deci o calitate slabă a izolației.

Indicele de pierderi dielectrice are o variație proporțională cu factorul de pierderi dielectrice, $tg\delta$.

Descărcări parțiale reprezintă un fenomen complex; ele depind ca număr și amplitudine de gradientul de tensiune, de rezistența superficială a pereților vacuolei și de dimensiunile sale, de natura și presiunea gazelor închise în vacuole.

Măsurarea descărcărilor parțiale permite sesizarea din timp a creșterii nivelului lor și deci evidențierea apariției unor defecte evolutive în masa izolației sau a îmbătrânirii generale a izolației.

Indicarea rigidității dielectrice a unei izolații trebuie însoțită de condiții de încercare, deoarece valoarea acesteia depinde de o serie de factori care intervin pe parcursul încercărilor.

Mărimile specifice au servit ca bază pentru elaborarea anumitor criterii de acceptare a izolațiilor bobinajului stator.

4. MODELAREA ȘI SIMULAREA IZOLAȚIILOR BOBINELOR STATOR

4.1. Introducere

În cadrul acestui capitol autorul a identificat modelele matematice continue și respectiv a modelelor matematice cu elemente finite, utilizate în analiza câmpului termic și în analiza câmpului electric din sistemul bobină – izolație - aer.

De asemenea autorul a elaborat modelul geometric al sistemului bobină – izolație - aer.

Pe baza acestui model geometric s-au ales tipul elementelor finite pentru sistemul de izolație, în vederea discretizării cu elemente finite, care să conducă la o acuratețe cât mai ridicată.

Prin intermediul modelelor matematice cu elemente finite și pe baza modelului geometric autorul a simulat transferul termic și câmpul electric ale sistemului bobină – izolație – aer.

S-au ilustrat totodată rezultatele obținute în urma simulării sistemului de izolație.

4.2. Modelarea câmpului termic și a câmpului electric pentru sistemul bobină – izolație – aer

4.2.1. Modelarea câmpului termic al sistemului bobină – izolație – aer

4.2.1.1. Modelul matematic continuu al câmpului termic pentru sistemul bobină – izolație – aer

Considerații generale

Se consideră bobina ca fiind suprafața S , iar în aceasta un punct oarecare P , localizat în spațiu prin vectorul de poziție \vec{r} , definit față de originea O , a unui sistem de coordonate (figura 4.1).

Se admite că, în general, în bobină are loc o creștere a energiei interne a acesteia, printr-o transformare ireversibilă a unei anumite forme de energie. Impropriu, se spune că în zona respectivă se dezvoltă (degajă) căldură, iar acea zonă se numește sursă (izvor) de căldură.

Pentru caracterizarea locală a unei surse de căldură, în fiecare punct al acesteia se definește căldura dezvoltată în unitatea de timp, într-un element de volum din jurul aceluși punct, care se numește densitate de volum a vitezei de generare a căldurii, sau densitate de volum a fluxului termic dezvoltat, însă, în această lucrare se va folosi denumirea de putere calorică specifică.

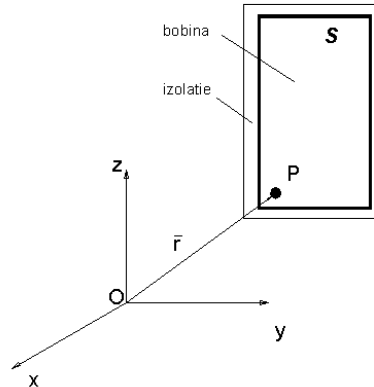


Figura 4.1. Orientarea punctului P în sistemul de coordonate cartezian

Deci, dacă se notează cu q_d puterea calorică specifică dintr-un moment oarecare t , într-un punct oarecare P, atunci căldura dezvoltată într-un timp infinit mic dt , într-un element de volum dV din jurul punctului P, este un infinit mic, de ordinul doi, notat cu d^2Q_d , dat de relația:

$$d^2Q_d = q_d dV \cdot dt \quad (4.1)$$

Pentru sistemul bobină – izolație - aer se consideră că sursa de căldură este numai bobina, în care se produce o transformare a energiei electromagnetice în energie internă. Ca urmare, având în vedere legea transformării energiei electromagnetice în procesul de conducție electrică se obține:

$$q_d = \vec{J} \cdot \vec{E} \quad (4.2)$$

unde \vec{J} , \vec{E} sunt densitatea curentului electric, respectiv intensitatea câmpului electric din P.

Considerând bobina un mediu izotrop și omogen, pe baza formei locale a legii conducției electrice se obține:

$$q_d = \sigma E^2; \quad q_d = \rho J^2 \quad (4.3)$$

unde σ , ρ sunt conductivitatea electrică, respectiv rezistivitatea bobinei.

Prin câmp termic al bobinei se înțelege câmpul scalar, care, în general, este de forma $T=T(t, \vec{r})$, unde T este temperatura dintr-un moment oarecare t , și din punctul oarecare P.

Datorită existenței unor diferențe de temperatură, în sistemul de izolație apare un schimb de energie sub formă de căldură.

În general, orice schimb de energie se definește în raport cu o suprafață și se produce între cele două zone, în care acea suprafață separă domeniul considerat. Dacă schimbul energetic este determinat de existența unor diferențe de temperatură între punctele celor două regiuni, se vorbește despre căldură transferată (transmisă) prin suprafața respectivă. Căldura transferată în unitatea de timp se va numi flux termic transmis (transferat) prin aceea suprafață.

Fluxul termic este o mărime de stare globală (extensivă) care se referă la întreaga suprafață, iar ca mărime locală (intensivă), în fiecare punct al suprafeței se definește fluxul termic transferat prin unitatea de suprafață din jurul acelu punct, care se numește densitate de flux termic transferat, din punctul considerat.

Dacă se notează cu q_s densitatea de flux termic transferat dintr-un punct oarecare P al suprafeței bobinei, atunci căldura transferată în intervalul de timp

infinit mic dt , printr-un element de suprafață dS , din jurul lui P , este un infinit mic de ordinul doi, notat cu d^2Q_S , și este dat de relația:

$$d^2Q_S = q_S dS \cdot dt \quad (4.4)$$

Însă, în fiecare moment t , q_S depinde atât de poziția punctului P pe S , cât și de orientarea în spațiu a lui S , adică $q_S = q_S(t, \vec{r}, \vec{n})$, unde s-a notat cu \vec{n} versorul normalei duse în P la S .

Ca urmare, q_S nu depinde numai de diferența dintre temperatura T din P și cea din punctele vecine lui P , adică q_S nu este o caracteristică locală exclusivă a transferului de căldură din P .

Se definește vectorul densitate de flux termic, din momentul t și din punctul P , notat cu \vec{q} , adică $\vec{q} = \vec{q}(t, \vec{r})$.

Se arată [31] că:

$$q_S = \pm \vec{q} \cdot \vec{n} \quad (4.5)$$

în care se ia semnul $+$ dacă \vec{n} se orientează în sensul transferului de căldură prin S , și sensul invers în caz contrar.

Bobina S fiind o suprafață închisă, \vec{n} se orientează spre exteriorul volumului mărginit de aceasta și se numește versorul normalei exterioare la suprafața S .

De asemenea, dacă se face convenția ca sensul de referință al transferului de căldură să se aleagă spre volumul mărginit de S , adică se presupune că în acest volum intră căldură, atunci:

$$q_S = -\vec{q} \cdot \vec{n} \quad (4.6)$$

În concluzie, dacă se cunoaște vectorul \vec{q} , din relația (4.5) se poate determina q_S , iar cu relația (4.6) se poate determina căldura transmisă prin S în orice interval de timp.

Din acest motiv studiul transferului de căldură urmărește determinarea câmpului vectorial $\vec{q} = \vec{q}(t, \vec{r})$.

În acest scop se folosesc anumite legi, specifice fiecărui mod de transfer al căldurii.

În cazul transferului de căldură prin conducție termică [27], se folosește legea lui Fourier, care, matematic, se scrie sub forma:

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}T; \quad \vec{q} = -\lambda \nabla T \quad (4.7)$$

unde λ se numește conductivitate termică a mediului din punctul P .

În cazul unui mediu izotrop și omogen, λ este o caracteristică locală a mediului respectiv, și nu depinde de direcția considerată.

În cazul unui mediu omogen, dar anizotrop, T depinde de direcția aleasă, și vectorul \vec{q} se descompune după trei direcții ce trec prin P , care depinde de gradul de anizotropie.

Dacă mediul este admis ortotrop, cele trei direcții sunt reciproc perpendiculare. Dacă acestea se aleg ca fiind chiar axele x, y, z ale unui sistem de coordonate carteziene, atunci:

$$\vec{q} = -\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} - \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} - \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k}, \quad (4.8)$$

unde $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ sunt versorii axelor, iar $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ sunt conductivitățile termice ale mediului după cele trei axe.

Ecuatiile modelului matematic continuu al sistemului bobină – izolație - aer

Studiul termic al sistemului bobină – izolație - aer urmărește determinarea evoluției în timp a temperaturii din punctele izolației, deoarece de această evoluție depinde calitatea izolației.

Ca urmare, scopul studiului termic, constă în aflarea câmpului scalar nestaționar $T(t, \vec{r})$.

Bobina este privită ca fiind sursa de căldură, ce determină încălzirea izolației.

Se impune cunoașterea câmpului termic din punctele bobinei, pentru a putea calcula căldura transmisă de la acesta la izolație, respectiv aer.

În concluzie, domeniul ce se analizează este constituit din bobină, izolație, aer.

Ecuatiile modelului trebuie astfel stabilite încât să permită determinarea câmpului termic, dintr-un punct oarecare P al suprafeței S care constituie bobina, adică a câmpului scalar nestaționar $T=T(t, \vec{r})$, unde \vec{r} este vectorul de poziție al lui P față de originea unui sistem de coordonate, ales astfel încât să fie fix față de sistemul de referință respectiv.

Pentru studiu se utilizează metoda Euler, [135], ceea ce înseamnă că, pe domeniul bobinei, este definit un câmp scalar al temperaturilor $T = T(t, \vec{r})$, unde T este temperatura din P.

Sistemul bobină – izolație - aer se admite izotrop, cu proprietățile definite prin câmpurile scalare, în general nestaționare: câmpul scalar al densității $\rho=\rho(t, \vec{r})$; câmpul scalar al căldurii specifice $c=c(t, \vec{r})$ și câmpul scalar al conductivității termice $\lambda=\lambda(t, \vec{r})$.

În sistemul bobină – izolație - aer se alege un volum de material V^* , care, la un moment oarecare t, coincide cu un volum de control V, mărginit de o suprafață închisă S, iar P se presupune a fi un punct oarecare al volumului de control.

Ecuatiile modelului se obțin prin aplicarea, pentru volumul de material considerat, a legii conservării energiei.

Ecuatia conservării energiei (ecuația energiei)

Acest principiu se aplică între un moment oarecare t, și un moment infinit apropiat $t'=t+dt$, sub forma generală:

$$dU + dE_c = dQ + dL \quad (4.9)$$

unde:

- dU, dE_c sunt variații infinit mici, în timpul infinit mic dt ale energiei interne, respectiv energiei cinetice ale volumului material considerat;

- dQ este căldura infinit mică, primită în timpul dt de volumul de material considerat;

- dL este lucrul mecanic infinit mic, efectuat de toate forțele ce acționează asupra volumului material, ca urmare a deplasărilor ce le au punctele lor de aplicații, în timpul infinit mic dt.

Este mai avantajos dacă se scrie relația (4.9) pentru un moment oarecare t, ceea ce se obține împărțind fiecare termen cu dt, rezultând ecuația:

$$\frac{dU}{dt} + \frac{dE_c}{dt} = \frac{dQ}{dt} + \frac{dL}{dt} \quad (4.10)$$

Energia internă U și energia cinetică E_c ale volumului material V* sunt date de relațiile:

$$U = \int_{V^*} \rho c T dV; \quad E_c = \frac{1}{2} \int_{V^*} \rho v^2 dV \quad (4.11)$$

dar $E_c=0$ și $L=0$.

În general, căldura dQ pe care volumul considerat o primește în timpul dt , are două componente:

a) Căldura dQ_d pe care o dezvoltă sursele termice în timpul dt , dată de relația:

$$dQ_d = \int_V q_d dV \quad (4.12)$$

b) Căldura dQ_c , pe care, în timpul dt , o primește volumul respectiv datorită transferului de căldură prin conducție, care se exprimă prin relația:

$$dQ_c = -dt \int_S \overline{q_c} \cdot d\vec{s}, \quad (4.13)$$

unde q_c este vectorul densitate de flux termic conductiv dintr-un punct oarecare a lui S , iar semnul minus intervine deoarece sensul elementului de suprafață $d\vec{s}$ este ales spre exteriorul volumului, iar sensul de referință al transferului de căldură s-a admis spre interiorul acestuia. Folosind transformata Gauss-Ostrogradski [33] și legea lui Fourier [27] se obține:

$$dQ_c = dt \int_V \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) dV \quad (4.14)$$

Având în vedere relațiile (4.13) și (4.14), se obține:

$$\frac{dQ}{dt} = \int_V [\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + q_d] dV \quad (4.15)$$

Ținând cont de relațiile (4.11) se obține:

$$\frac{dU}{dt} = \int_V [\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + q_d] dV \quad (4.16)$$

Se definește o temperatură totală T' , prin relația:

$$T' = T + \Delta t \quad (4.17)$$

În relația (4.10) se înlocuiesc relațiile (4.15), (4.16) și după utilizarea teoremei integrale reale rezultă:

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + q_d \quad (4.18)$$

Condiții inițiale și de frontieră

Bobina se admite a fi un mediu izotrop, cu proprietățile definite prin câmpurile scalare: al densității $\rho = \rho(t, \vec{r})$; al căldurii specifice $c = c(t, \vec{r})$; al conductivității termice $\lambda = \lambda(t, \vec{r})$.

Însă, în general, toate ecuațiile modelului se exprimă cu ajutorul unor derivate parțiale, ceea ce necesită ca, pentru rezolvarea acestor ecuații, să se efectueze integrarea lor în timp și spațiu, ceea ce determină apariția unor constante de integrare.

Pentru determinarea constantelor de integrare și deci obținerea unor soluții unice, trebuie impuse anumite condiții inițiale și de frontieră.

Condițiile inițiale [123] se referă la valorile mărimilor în momentul inițial $t_0=0$, când tensiunea de alimentare are valoarea nominală și în general se exprimă sub forma:

$$T(t, r) = T(r) = F_T(r) \quad (4.19)$$

unde $F_T(\vec{r})$ trebuie să fie funcție cunoscută.

Pentru temperatură, condiția de frontieră [148] poate fi:

a) De primul tip, când se exprimă sub forma:

$$T(t, \bar{r})\Big|_S = T_S(t, \bar{r}) \quad (4.20)$$

unde $T_S(t, \bar{r})$ trebuie să fie o funcție cunoscută.

b) De al doilea tip, când se impune distribuția densității fluxului termic, transmis prin conducție prin frontiera S , sub forma:

$$-\bar{n} \cdot \mathbf{q}(t, \bar{r})\Big|_S = q_S(t, \bar{r}) \quad (4.21)$$

unde $q_S(t, \bar{r})$ trebuie să fie o funcție cunoscută.

Folosind legea lui Fourier, relația (4.21) devine:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n}\Big|_S = q_S(t, \bar{r}) \quad (4.22)$$

c) De al treilea tip, care se impune când intervine un schimb de căldură prin convecție, între domeniul considerat și exteriorul său. În acest caz, conform legii lui Newton:

$$q_S(t, \bar{r}) = \alpha [T_S(t, \bar{r}) - T_f] \quad (4.23)$$

unde α este coeficientul de transmitere a căldurii prin convecție și T_f este temperatura dintr-un punct al domeniului studiat.

Pentru a reduce volumul de calcul, și având în vedere scopul prezentei lucrări, se fac anumite ipoteze simplificatoare, ce se prezintă în cele ce urmează.

Ca urmare, considerând un sistem de referință pentru cele trei regiuni ale sistemului și anume: bobină, izolație, aer, ecuațiile modelului se reduc la ecuația energiei, ce obține forma:

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + q_d \quad (4.24)$$

Se consideră că mediul fiecăreia din cele trei regiuni ale sistemului este izotrop și omogen, iar ecuația (4.24) devine:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \Delta T + q_d \quad (4.25)$$

Distribuția spațială precum și variația în timp a lui q_d se determină pe baza modelului potențialelor electromagnetice al câmpului electromagnetic menționat, aplicat pentru ansamblul celor trei regiuni.

Se notează cu S suprafața închisă ce mărginește bobina, care se va numi perete, și cu T_p temperatura într-un punct oarecare M al lui S , ce se va numi temperatura peretelui.

Impunând condițiile de frontieră menționate, prin rezolvarea ecuației (4.25) se află câmpul $T_f = T_f(\bar{r})$, unde T_f este temperatura dintr-un punct oarecare al sistemului studiat, pentru regimul liber, respectiv temperatura de regim liber.

În situația reală, prezența bobinei produce modificări ale câmpului menționat, care, în general, devine nestaționar, și pentru același punct oarecare se notează cu $T = T(t, \bar{r})$, numindu-se temperatură reală.

Prezența bobinei face ca particulele izolației aflate pe S să aibă temperatura T_p , adică să fie îndeplinită condiția:

$$T(t, \bar{r})\Big|_S = T_p \quad (4.26)$$

De asemenea, apare un schimb de căldură între bobină și izolație, care, în ipoteza că izolația nu conține surse de căldură și că $T_p > T_f$, are sensul de la bobină

la izolație. Acest schimb de căldură face să crească temperatura izolației, astfel că într-un punct oarecare al izolației temperatura T este mai mare decât valoarea corespunzătoare câmpului $T_f(\bar{r})$ din acel punct.

Prin analogie cu stratul limită hidrodinamic, se face ipoteza că prezența bobinei modifică substanțial temperatura izolației numai într-o porțiune din jurul acesteia, numită strat limită termic, iar în restul izolației se poate face abstracție de existența bobinei.

Ca urmare, în lungul normalei dusă în M la S , temperatura scade de la valoarea T_p în M la valoarea corespunzătoare câmpului $T_f(\bar{r})$ din punctele respective (figura 4.2). Distanța δ_t dintre M și M'' se numește grosime oarecare a stratului limită termic. Mulțimea punctelor M'' definește o suprafață S_t numită frontiera stratului limită termic, pentru care este valabilă condiția:

$$T(t, \bar{r})|_{S_t} = T_f, \quad (4.27)$$

unde s-a notat cu T_f valoarea câmpului $T_f(\bar{r})$ într-un punct oarecare al lui S_t .

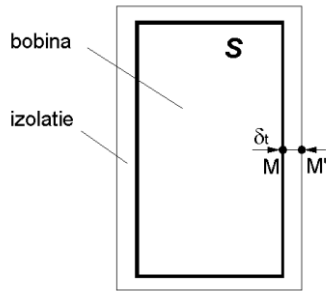


Figura 4.2. Grosimea stratului limită termic

Conform legii lui Newton, densitatea de suprafață q_s a fluxului termic transmis prin convecție de la bobină la izolație este:

$$q_s = \alpha(T_p - T_f) \quad (4.28)$$

Căldura degajată de bobină se transmite izolației prin conducție termică. Deci, dacă se notează cu \bar{q} vectorul densitate de suprafață al fluxului termic transmis prin conducție, atunci:

$$q_s = \bar{q} \cdot \bar{n}|_S, \quad (4.29)$$

unde \bar{n} este versorul normalei dusă în M la S , orientată spre interiorul bobinei, ceea ce justifică semnul plus din membrul drept al relației (4.29).

Întrucât este vorba despre un transfer de căldură prin conducție, este valabilă legea lui Fourier și relația (4.29) devine:

$$q_s = -\lambda \text{grad} T_m|_S = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n}|_S \quad (4.30)$$

Din egalarea relațiilor (4.28) și (4.30) se obține:

$$\alpha = \frac{-\lambda \frac{\partial T}{\partial n}|_S}{T_p - T_f} \quad (4.31)$$

Relația (4.31) este folosită pentru calculul lui α .

Mai întâi se impune o anumită valoare pentru T_p , sau, în prealabil, se face un studiu termic al bobinei, folosind ecuația energiei sub forma (4.25), iar ca și condiție de frontieră se impune valoarea lui α pe S .

Prin rezolvarea ecuației energetice se obține câmpul $T_s(t, \vec{r})$ și valoarea acestuia într-un punct oarecare a lui S este T_p .

Practic pentru T_f se alege valoarea temperaturii aerului din sistem.

Impunând condițiile de frontieră expuse mai sus, prin rezolvarea ecuațiilor menționate se determină câmpul $T=T(t, \vec{r})$, din care se poate calcula $\frac{\partial T}{\partial n}$ în punctul S , și din relația (4.31) se află α .

În final, pentru **modelul matematic continuu** al câmpului termic pentru sistemul bobină – izolație - aer s-a ajuns la relația:

$$\frac{\partial(c\Phi)}{\partial t} = \text{div}(k\text{grad}\Phi) + S \quad (4.32)$$

unde:

- Φ este mărimea necunoscută principală și anume temperatura;
- S reprezintă densitatea de volum a surselor, ce este cunoscută pentru fiecare ecuație;

- c , k sunt mărimi de material și anume: c este produsul dintre densitate și căldura specifică, iar k este conductivitatea termică.

4.2.1.2. Modelul matematic cu elemente finite pentru sistemul bobină – izolație - aer

Pentru elaborarea modelului matematic cu elemente finite s-a considerat modelul matematic continuu (4.32) unde s-a considerat că toate mărimile sunt variabile atât în spațiu cât și în timp, adică:

$$c = c(t, x, y, z); \quad \Phi = \Phi(t, x, y, z); \quad k = k(t, x, y, z); \quad S = S(t, x, y, z) \quad (4.33)$$

Funcția S este o funcție care depinde de suprafața frontierei.

Aceasta impune ca fiecare mărime să fie discretizată cu elemente finite, atât în timp cât și în spațiu.

Mai întâi se face o discretizare cu elemente finite în spațiu, presupunând că mărimea respectivă rămâne constantă în timp, egală cu valoarea sa dintr-un moment oarecare t .

Discretizarea cu elemente finite în spațiu înseamnă definirea aproximărilor:

$$c = \sum_{j=1}^p N_j c_j; \quad \Phi = \sum_{j=1}^p N_j \Phi_j; \quad k = \sum_{j=1}^p N_j k_j \quad (4.34)$$

unde:

$N_j = N_j(x, y, z)$ este funcția de formă atașată nodului j

$c_j = c_j(t); \quad \Phi_j = \Phi_j(t); \quad k_j = k_j(t);$ sunt valorile mărimilor respective

dintr-un moment oarecare t .

Pentru un produs, cum este cazul lui ρc , acesta se definește ca reprezentând o singură funcție $\Psi = c\Phi$, care se aproximează la fel ca orice funcție, adică:

$$\Psi = \sum_{j=1}^p N_j \Psi_j \quad (4.35)$$

Evident că:

$$\Psi_j = \Psi(t, x_j, y_j, z_j) = c(t, x_j, y_j, z_j) * \Phi(t, x_j, y_j, z_j) = c_j \Phi_j \quad (4.36)$$

și deci:

$$c\Phi = \sum_{j=1}^p N_j c_j \Phi_j \quad (4.37)$$

Se presupune că, în ecuația (4.32), fiecare mărime este înlocuită cu aproximarea respectivă și aplicând metoda reziduurilor ponderate [45] se obține:

$$\int_D N_i \frac{\partial(c\Phi)}{\partial t} dD - \int_D N_i \operatorname{div}(k \operatorname{grad}\Phi) dD = \int_D N_i S dD \quad i = \overline{1, p} \quad (4.38)$$

În continuare se consideră separat fiecare termen, ce se notează cu B_1 , B_2 , B_3 și mărimile respective se înlocuiesc cu aproximările, date de relațiile (4.34).

Se obține **modelul matematic cu elemente finite pentru câmpul termic**:

$$\int_D N_i \frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_{j=1}^p N_j c_j \Phi_j \right) dD = \sum_{j=1}^p \left(\int_D N_i N_j dD \right) \left[\frac{\partial}{\partial t} (c_j \Phi_j) \right] \quad j = \overline{1, p} \quad (4.39)$$

unde s-a avut în vedere faptul că N_j nu sunt funcții de timp și că, pentru un nod dat, j , $c_j \Phi_j$ sunt constante în raport cu integrala pe domeniul D .

Matricial, se obține:

$$B_1 = [K^1] \frac{\partial}{\partial t} ([c\Phi]) \quad (4.40)$$

unde $[K^1]$ este matricea de rigiditate corespunzătoare primului termen, iar

$$\frac{\partial}{\partial t} ([c\Phi]) = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} (c_1 \Phi_1) \\ \frac{\partial}{\partial t} (c_2 \Phi_2) \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{\partial}{\partial t} (c_p \Phi_p) \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

Al doilea termen, notat cu B_2 , are o formă ce este dificil de exprimat matricial. Din acest motiv se aduce la o formă mai simplă, folosind relația:

$$\operatorname{div}(N_i k \operatorname{grad}\Phi) = N_i \operatorname{div}(k \operatorname{grad}\Phi) + k \operatorname{grad}\Phi \operatorname{grad}N_i \quad (4.42)$$

din care se obține:

$$N_i \operatorname{div}(k \operatorname{grad}\Phi) = \operatorname{div}(N_i k \operatorname{grad}\Phi) - k \operatorname{grad}\Phi \operatorname{grad}N_i \quad (4.43)$$

Înlocuind și folosind formula lui Gauss - Ostrogradski, [33], se obține:

$$B_2 = \int_S N_i k \frac{\partial \Phi}{\partial n} ds - \int_D (\operatorname{grad}N_i) k \operatorname{grad}\Phi dD \quad (4.44)$$

unde S este frontiera lui D , iar $\frac{\partial \Phi}{\partial n}$ este derivata după direcția normalei într-un punct oarecare a lui S .

Primul termen din membrul drept intervine numai pentru elementele finite de pe frontiera S , unde, prin condiții de frontieră de tip Neumann [123], se cunoaște $k \frac{\partial \Phi}{\partial n}$ și deci acest termen reprezintă o cunoscută a problemei.

Rezultă că în membrul stâng rămâne doar termenul:

$$-B_2 = \int_D (\operatorname{grad}N_i) k \operatorname{grad}\Phi dD \quad i = \overline{1, p} \quad (4.45)$$

Se înlocuiesc k și Φ cu aproximările lor și se obține:

$$-B_2 = \int_D (\text{grad} N_i) \left(\sum_{j=1}^p N_j k_j \right) \text{grad} \left(\sum_{j=1}^p N_j \Phi_j \right) dD \quad (4.46)$$

Se notează cu $[N]$, $[k]$ vectorii coloană formați cu funcțiile de formă, respectiv cu valorile mărimii k , adică:

$$[N] = \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ N_p \end{bmatrix} \quad [k] = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ k_p \end{bmatrix} \quad (4.47)$$

Cu aceasta:

$$\sum_{j=1}^p N_j k_j = [N]^T [k] \quad (4.48)$$

Folosind proprietățile operatorului gradient și ținând cont că Φ_j , $j = \overline{1, p}$ sunt constante, se obține:

$$\text{grad} \left(\sum_{j=1}^p N_j k_j \right) = \sum_{j=1}^p (\text{grad} N_j) \Phi_j \quad (4.49)$$

Se înlocuiesc relațiile (4.48) și (4.49) cu relația (4.47) rezultând:

$$-B_2 = \int_D \left[(\text{grad} N_i) [N]^T [k] \sum_{j=1}^p (\text{grad} N_j) \Phi_j \right] dD \quad (4.50)$$

Factorul $(\text{grad} N_i) [N]^T [k]$ este o constantă față de însumarea în raport cu indicele j și deci pot fi introduși sub sumă. De asemenea, având în proprietățile unei integrale referitoare la o sumă și deoarece în fiecare integrală Φ_j este o constantă se obține:

$$-B_2 = \sum_{j=1}^p \left\{ \int_D (\text{grad} N_i) [N]^T [k] \text{grad} N_j \right\} \Phi_j \quad i = \overline{1, p} \quad (4.51)$$

Se notează:

$$K_{ij}^2 = \int_D (\text{grad} N_i) [N]^T [k] \text{grad} N_j \quad (4.52)$$

și se obține:

$$-B_2 = \sum_{j=1}^p K_{ij}^2 \Phi_j \quad i = \overline{1, p} \quad (4.53)$$

Se dau indicelui i toate valorile de la 1 la p și matricial, se obține:

$$-B_2 = [K^2] \cdot [\Phi] \quad (4.54)$$

unde $[K^2]$ este matricea de rigiditate corespunzătoare celui de-al doilea termen, având elementele date de relația (4.52), iar $[\Phi]$ este vectorul coloană al valorilor mărimii Φ .

Membrul drept, B_3 , al ecuației (4.38) se scrie matricial sub forma:

$$\int_D N_i S dD = [F] \quad (4.55)$$

unde $[F]$ este un vector coloană cu dimensiunile $p \times 1$, ale cărui elemente sunt date de relațiile:

$$F_i = \int_D N_i S dD \quad i = \overline{1, p} \quad (4.56)$$

Însă, după cum se observă din relațiile (4.41), (4.54) în expresiile lui B_1 , respectiv B_2 , nu intervine doar vectorul coloană al valorilor mărimii Φ ci și valorile unor mărimi ce se consideră cunoscute, pentru fiecare dintre ecuațiile menționate.

4.2.2. Modelarea câmpului electric pentru sistemul bobină – izolație – aer

4.2.2.1. Modelul matematic continuu al câmpului electric pentru sistemul bobină – izolație - aer

Rezolvarea directă a sistemelor de ecuații care descriu câmpul electromagnetic este, în general, dificilă. Dacă, însă, se efectuează o schimbare de variabile, prin introducerea unor funcții auxiliare, în general, spațio-temporale, denumite potențiale electromagnetice, atunci ecuațiile se reduc ca număr și se pot integra mai simplu. Această rezolvare indirectă a problemelor de analiză a câmpului electromagnetic se dovedește comodă și lucrativă, îndeosebi în cazul bidimensional [45].

În elaborarea modelului matematic al câmpului electric s-a considerat domeniul Ω ca fiind domeniul sistemului bobină – izolație – aer. Bobina alimentată în tensiune creează un câmp electric.

Stabilirea modelului matematic a avut la bază următoarele ipoteze [138]:

- potențialul vector magnetic \vec{A} s-a asociat cu potențialul electric scalar V_e ;
- potențialul vector electric \vec{T} s-a asociat cu potențialul magnetic scalar V_m .

În stabilirea acestuia s-a pornit de la constatarea că [32], întrucât $\text{div} \vec{B} = 0$, inducția magnetică \vec{B} definește un câmp vectorial solenoidal, putând fi exprimată ca rotorul unei alte funcții vectoriale \vec{A} , adică:

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A} \quad (4.57)$$

unde $\vec{A} = \vec{A}(t, \vec{r})$ este potențialul vector magnetic (sau potențialul magnetic vector).

Deoarece divergența unui rotor este nulă, vectorul \vec{B} , verifică ecuația $\text{div} \vec{B} = 0$.

Cu această formă locală a legii inducției electromagnetice se obține:

$$\text{rot} \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (4.58)$$

unde s-a admis comutativitatea operatorilor "rot" și " $\frac{\partial}{\partial t}$ ".

Deoarece vectorul $\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$ este irotațional poate fi exprimat prin gradientul unei funcții scalare V_e , adică:

$$\bar{E} + \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} = -\text{grad}V_e \text{ sau } \bar{E} = -\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - \text{grad}V_e \quad (4.59)$$

unde $V_e = V_e(t, \bar{r})$ se numește potențial electrodinamic scalar (sau potențial scalar electrodinamic).

Relațiile (4.57), (4.59) permit determinarea univocă a vectorilor câmp, \bar{E}, \bar{B} dacă se cunosc mărimile \bar{A}, V_e .

Pentru câmpul electromagnetic dat, când mărimile \bar{E}, \bar{B} sunt unice, s-au determinat potențialele \bar{A}, V_e , care satisfac relațiile (4.57), respectiv (4.58). Însă, acestea nu sunt unice, ci se obțin aceeași vectori câmp \bar{B}, \bar{E} , pentru orice alte potențiale \bar{A}', V_e' , date de relațiile:

$$\bar{A}' = \bar{A} + \text{grad} e \quad (4.60)$$

$$V_e' = V_e - \frac{\partial e}{\partial t} \quad (4.61)$$

unde $e = e(t, \bar{r})$ este o funcție scalară arbitrară.

În ipoteza că, potențialele \bar{A}', V_e' le corespunde \bar{B}', \bar{E}' , relațiile (4.57), (4.59), devin:

$$\bar{B}' = \text{rot} \bar{A}' \quad (4.62)$$

$$\bar{E}' = -\frac{\partial \bar{A}'}{\partial t} - \text{grad} V_e' \quad (4.63)$$

Dacă din relația (4.63) se înlocuiește \bar{A}' cu expresia dată de relația (4.60) și are în vedere că rotorul gradientului oricărei funcții scalare este nul, se obține:

$$\bar{B}' = \text{rot}(\bar{A} + \text{grad} e) = \text{rot} \bar{A} = \bar{B} \quad (4.64)$$

Din relațiile (4.61) și (4.63) se obține:

$$\bar{E}' = -\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial t}(\text{grad} e) - \text{grad} V_e + \text{grad}\left(\frac{\partial e}{\partial t}\right) \quad (4.65)$$

sau, admitând comutativitatea operatorului $\frac{\partial}{\partial t}$ și grad, rezultă:

$$\bar{E}' = -\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - \text{grad} V_e - \text{grad}\left(\frac{\partial e}{\partial t}\right) + \text{grad}\left(\frac{\partial e}{\partial t}\right) \quad (4.66)$$

$$\bar{E}' = -\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - \text{grad} V_e \quad \bar{E}' = \bar{E} \quad (4.67)$$

Potențialele \bar{A}, V_e se determină prin rezolvarea ecuațiilor modelului, care nu sunt unice. Din acest motiv, pentru a se asigura univocitatea determinării potențialelor \bar{A}, V_e , este necesar să se impună două condiții [89]:

a) În punctele domeniului Ω să se cunoască divergența de volum a potențialului vector magnetic, adică:

$$\text{div} \bar{A} = \bar{f}(t, \bar{r}); \quad \bar{r} \in \Omega \quad (4.68)$$

unde $\bar{f}(t, \bar{r})$ este o funcție vectorială cunoscută.

b) Pe frontiera S a lui Ω să se impună o condiție de frontieră, de exemplu, componenta normală a lui \bar{A} să fie cunoscută, adică:

$$\bar{A} \cdot \bar{n} = g(t, \bar{r}), \quad \bar{r} \in S \quad (4.69)$$

unde $g(t, \bar{r})$ este o funcție scalară ce se de dă, iar \bar{n} este vectorul normalei într-un punct oarecare a lui S , orientat spre exteriorul domeniului Ω , deoarece S este o suprafață închisă.

Condițiile (4.68), (4.69) trebuie să fie satisfăcute de orice potențial, deci și de \bar{A}' , adică:

$$\operatorname{div} \bar{A}' = \bar{f}(t, \bar{r}); \quad \bar{r} \in \Omega \quad (4.70)$$

$$\bar{A}' \cdot \bar{n} = g(t, \bar{r}), \quad \bar{r} \in S \quad (4.71)$$

Din relațiile (4.60), (4.68), (4.70) rezultă:

$$\operatorname{div}(\bar{A} - \bar{A}') = 0; \quad \operatorname{div}(\operatorname{grad} e) = 0 \quad (4.72)$$

$$\Delta e(t, \bar{r}) = 0 \quad \bar{r} \in \Omega \quad (4.73)$$

unde Δ este operatorul Laplace.

În mod similar, din relațiile (4.60), (4.69), (4.71) se obține:

$$(\bar{A} - \bar{A}') \cdot \bar{n} = 0; \quad (\operatorname{grad} e) \cdot \bar{n} = 0 \quad (4.74)$$

$$\frac{\partial e(t, \bar{r})}{\partial n} = 0 \quad \bar{r} \in S \quad (4.75)$$

Dacă funcția scalară „ e ” satisface egalitățile (4.73), (4.75), ea se reduce la o constantă reală în $\Omega \cup S$, adică:

$$e(t, \bar{r}) = \lambda \quad \bar{r} \in \Omega \cup S \quad (4.76)$$

unde λ este un număr real.

În relațiile (4.60), (4.61), se înlocuiește „ e ” cu relația (4.76) și, derivatele unei constante fiind nule, se obține $\bar{A} = \bar{A}'$, $V_e' = V_e$, adică potențialele determinate sunt unice, dacă se impun condițiile menționate.

Forma funcției $\bar{f}(t, \bar{r})$ se alege astfel încât, ecuațiile din care se determină potențialele \bar{A} , V_e , să fie cât mai simple. Uzual, în cazul unui regim staționar sau cvasistaționar, se alege $\bar{f}(t, \bar{r}) = 0$, și condiția (4.68) devine:

$$\operatorname{div} \bar{A} = 0 \quad \bar{r} \in \Omega \quad (4.77)$$

care se numește *condiția de etalonare* a lui Coulomb.

Dacă se impune că \bar{A} să satisfacă condiția (4.77), atunci reprezintă un câmp vectorial solenoidal și va avea numai componenta solenoidală \bar{A}_S , iar relația (4.58) devine:

$$\bar{E} = \frac{\partial \bar{A}_S}{\partial t} - \operatorname{grad} V_e \quad (4.78)$$

din care se deduce că, cele două componente solenoidală \bar{E}_S și potențială \bar{E}_p ale lui \bar{E} sunt date de relațiile:

$$\bar{E}_S = -\frac{\partial \bar{A}_S}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \quad (4.79)$$

$$\bar{E}_p = -\operatorname{grad} V_e \quad (4.80)$$

Însă, dacă se notează cu V potențialul electric, atunci, prin definiție:

$$\bar{E}_p = -\operatorname{grad} V \quad (4.81)$$

Din relațiile (4.80), (4.81) se obține $V_e = V + C$, unde C este o constantă de integrare. Dacă într-un punct al domeniului se impune potențialul electric de referință $V_0 = 0$, atunci $C = 0$ și $V_e = V$.

În concluzie, dacă se impune ca potențialul vector magnetic să satisfacă condiția de etalonare a lui Coulomb [139], atunci potențialul scalar electrodinamic este egal cu potențialul scalar electric și relația (4.59) se scrie sub forma:

$$\bar{E} = \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - \text{grad}V \quad (4.82)$$

Impunând condiția de etalonare a lui Coulomb, câmpul electric are o componentă solenoidală, reprezentată de câmpul electric indus prin pulsații de inducția magnetică și o componentă potențială, reprezentată de câmpul electric coulombian, ce apare ca urmare a existenței în domeniu a unei variații a potențialului electric. De exemplu, o astfel de variație se obține, dacă, din exterior, se aplică o tensiune electrică între două porțiuni ale sistemului [80].

Pornind de la ecuațiile:

$$\text{rot}\bar{H} = \bar{J} \quad (4.83)$$

$$\text{div}\bar{J} = 0 \quad (4.84)$$

se adaugă ecuațiile constitutive:

$$\bar{H} = \nu \cdot \bar{B} - \frac{1}{\nu_0} \nu \cdot \bar{M}_p \quad (4.85)$$

$$\bar{J} = \sigma \bar{E} \quad (4.86)$$

și dacă se înlocuiește \bar{E} cu expresia dată de relația (4.82) s-a obținut:

$$\bar{J} = -\sigma \text{grad}V - \sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \quad (4.87)$$

Primul termen din membrul drept al relației (4.87) este densitatea \bar{J}_a a curentului electric de aducție, iar al doilea este densitatea curentului electric indus prin pulsații ale câmpului magnetic.

Ca urmare, relația (4.87) se scrie sub forma:

$$\bar{J} = \bar{J}_a - \sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \quad (4.88)$$

$$\bar{J}_a = -\sigma \text{grad}V \quad (4.89)$$

Se menționează faptul că intervine \bar{J}_a numai dacă în domeniul considerat există câmp electric coulombian, determinat de sursele exterioare, deci de excitațiile câmpului magnetic.

În relațiile (4.83), (4.84) se înlocuiesc \bar{H} și \bar{J} cu expresii date de relațiile (4.85), respectiv (4.88) și se obțin:

$$\text{rot}(\nu \cdot \text{rot}\bar{A}) + \sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} = \bar{J}_a - \frac{1}{\nu_0} \text{rot}(\nu \cdot \bar{M}_p) \quad (4.90)$$

$$\text{div}\left(\bar{J}_a - \sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t}\right) = 0 \quad (4.91)$$

$$\bar{J}_a = -\sigma \text{grad}V \quad (4.92)$$

la care se adaugă ecuația de etalonare a lui Coulomb:

$$\text{div}\bar{A} = 0 \quad (4.93)$$

Pentru sistemul bobină – izolație - aer s-a obținut:

$$\text{rot}(\nu \cdot \text{rot}\bar{A}) + \sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} = \bar{J}_a - \frac{1}{\nu_0} \text{rot}(\nu \cdot \bar{M}_p) \quad (4.94)$$

$$\operatorname{div} \bar{A} = 0 \quad (4.95)$$

$$\bar{J}_a = -\sigma \operatorname{grad} V \quad (4.96)$$

$$\operatorname{div} \bar{J}_a = 0 \quad (4.97)$$

Modelul matematic continuu al sistemului bobină – izolație - aer, în cazul general, pentru câmpul electric este dat de relațiile (4.94) ÷ (4.97).

Dacă se impune \bar{J}_a și \bar{M}_p , ecuațiile (4.94), (4.95), ale potențialului magnetic vector, împreună cu condițiile de limită, ce se vor prezenta în continuare, sunt suficiente pentru a rezolva problema de câmp magnetic cvasistaționar, particularizând acest model pentru studiul sistemului bobină – izolație - aer.

Relația (4.97) este folosită pentru a verifica pe \bar{J}_a , iar relația (4.96) se utilizează atunci când se urmărește distribuția de potențial electric, cum este cazul studiat.

Admițând că mai există curenți electrici de conducție, s-a obținut:

$$\operatorname{rot}(\operatorname{vrot} \bar{A}) + \sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} = 0 \quad (4.98)$$

$$\operatorname{div} \bar{A} = 0 \quad (4.99)$$

Ecuațiile (4.98), (4.99), împreună cu condițiile de unicitate aferente sunt suficiente pentru a rezolva problema de curenți turbionari din bobină [78].

Condiții de interfață (de trecere) și de limită

Condițiile de interfață (de trecere) [16] constau în relațiile pe care trebuie să le satisfacă potențialele dacă în domeniul Ω al sistemului intervin medii cu proprietăți diferite, așa cum este suprafața S_{12} din figura 4.3.

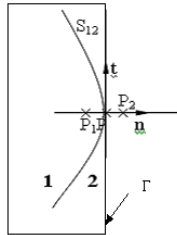


Figura 4.3. Suprafața de separație dintre medii diferite

Având în vedere relația (4.77) în punctul P al lui S_{12} , se obțin $\operatorname{div}_S \bar{A} = 0$ sau:

$$A_{1n} = A_{2n} \quad (4.100)$$

Deci, oricare ar fi suprafața de separație, componentele normale ale potențialului vector magnetic se conservă.

Pentru a stabili relația dintre componentele tangente \bar{A}_{1t} , \bar{A}_{2t} , în jurul punctului P se consideră conturul dreptunghiular elementar Γ al sistemului bobină – izolație - aer, cu bazele paralele cu S_{12} , de lungime Δl se obține:

$$\operatorname{div}_S \bar{A} = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\oint_{\Gamma} \bar{A} \cdot d\vec{l}}{\Delta l} \quad (4.101)$$

Folosind transformarea de integrală Stokes [84], se obține:

$$\oint_{\Gamma} \bar{A} \cdot d\vec{l} = \int_{S_{\Gamma}} \operatorname{rot} \bar{A} \cdot d\vec{s} = \int_{S_{\Gamma}} \bar{B} \cdot d\vec{s} = \phi \quad (4.102)$$

unde S_{Γ} este o suprafață de sprijin pe Γ iar ϕ este fluxul magnetic prin aceasta.

Cu aceasta relația (4.101) devine:

$$\text{rot}_S \bar{A} = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\phi}{\Delta l} = 0 \quad (4.103)$$

deoarece când $\Delta l \rightarrow 0$, și $\phi \rightarrow 0$.

Pe de altă parte:

$$\text{rot}_S \bar{A} = \bar{A}_{2t} - \bar{A}_{1t} \quad (4.104)$$

și din (4.103), (4.104), se obține:

$$\bar{A}_{2t} = \bar{A}_{1t} \quad (4.105)$$

sau:

$$\bar{n} \times \bar{A}_{2t} = \bar{n} \times \bar{A}_{1t} \quad (4.106)$$

Deci, componentele tangente ale potențialului vector magnetic se conservă pe orice suprafață de separație [87].

Din relațiile (4.100) și (4.105) se obține:

$$\bar{A}_2 = \bar{A}_1 \quad (4.107)$$

În concluzie, potențialul vector magnetic este continuu la traversarea oricărei suprafețe de separație, ca urmare \bar{A} este o funcție continuă în domeniul Ω al sistemului.

Pe suprafața S_{12} se alege un punct curent P , în care se reprezintă versorul \bar{n} al normalei duse în P la S_{12} și versorul \bar{t} al tangentei, obținută prin intersecția planului tangent, dus în P la S_{12} , cu planul determinat de \bar{n} și de mărimea ce se analizează. Dacă cu \bar{b} se notează versorul binormalei, atunci: $\bar{b} = \bar{t} \times \bar{n}$.

Sensul lui \bar{n} se alege ca fiind același cu sensul de referință al câmpului analizat.

Din $\bar{n} \times \bar{E}_2 = \bar{n} \times \bar{E}_1$, având în vedere relația (4.82) se obține:

$$\bar{n} \times \left(\text{grad}V + \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \right)_2 = \bar{n} \times \left(\text{grad}V + \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \right)_1 \quad (4.108)$$

Însă, atât în P_1 cât și în P_2 , $\text{grad}V$ este coliniar cu \bar{n} și din relația (4.108) se obține:

$$\bar{n} \times \left(\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \right)_2 = \bar{n} \times \left(\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \right)_1 \quad (4.109)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{n} \times \bar{A}_2) = \frac{\partial}{\partial t} (\bar{n} \times \bar{A}_1) \quad (4.110)$$

$$(\bar{n} \times \bar{A}_2) = (\bar{n} \times \bar{A}_1) \quad (4.111)$$

unde s-a ținut cont de faptul că \bar{n} este un vector constant.

Se observă că se obține tocmai relația (4.108), deci din condiția conservării componentelor tangente ale potențialului vector magnetic, rezultă satisfacerea condiției de conservare a componentelor tangente ale intensității câmpului electric.

Se aplică operatorul divergență ambilor membri ai relației (4.106), și având în vedere relația:

$$\text{div}(\bar{u} \times \bar{v}) = \bar{v} \text{rot} \bar{u} - \bar{u} \text{rot} \bar{v} \quad (4.112)$$

se obține:

$$\bar{n} \cdot \text{rot} \bar{A}_2 = \bar{n} \cdot \text{rot} \bar{A}_1 \quad (4.113)$$

sau:

$$\bar{n} \cdot \bar{B}_2 = \bar{n} \cdot \bar{B}_1 \quad (4.114)$$

unde s-a folosit observația că \bar{n} este un vector constant în $\text{rot } \bar{n} = 0$.

Însă, relația (4.114) reprezintă tocmai conservarea componentelor normale ale inducției magnetice și, deci, dacă se impune conservarea componentelor tangente ale potențialului vector magnetic, rezultă și conservarea componentelor normale ale inducției magnetice.

Condițiile inițiale, în general nule constau în a impune [140]:

$$\bar{A}(0, \bar{r}) = \bar{a}(\bar{r}); \quad V(\bar{r}, 0) = v(\bar{r}), \quad \bar{r} \in \Omega \quad (4.115)$$

unde $\bar{a}(\bar{r})$, $v(\bar{r})$ sunt funcții cunoscute.

În ceea ce privește condițiile de frontieră, în primul rând, pentru a asigura unicitatea determinării lui \bar{A} , se impune condiția ca pe frontiera S a lui Ω să fie cunoscută componenta normală a lui \bar{A} , adică să se cunoască:

$$\bar{n} \cdot \bar{A} = h(\bar{r}), \quad \bar{r} \in S \quad (4.116)$$

unde $h(\bar{r})$ trebuie să fie o funcție scalară cunoscută, de obicei nulă, adică:

$$\bar{n} \cdot \bar{A} = 0, \quad \bar{r} \in S \quad (4.117)$$

La aceasta se mai adaugă:

- o condiție de frontieră de tip Dirichlet [45], sau de primă speță, care cere cunoașterea componentei tangențiale a potențialului magnetic vector, pe cel puțin o porțiune S' a suprafeței S a bobinei, adică:

$$\bar{n} \times \bar{A} = \bar{g}(\bar{r}), \quad \bar{r} \in S' \quad (4.118)$$

unde $\bar{g}(\bar{r})$ trebuie să fie o funcție cunoscută.

- o condiție de frontieră de tip Neuman [45], sau de a doua speță, care cere ca, pe cealaltă porțiune S'' a suprafeței S a bobinei, se să cunoască componenta tangentă a lui $\text{vrot } \bar{A}$, adică:

$$\bar{n} \times (\text{vrot } \bar{A}) = \bar{b}(\bar{r}), \quad \bar{r} \in S'' \quad (4.119)$$

unde $\bar{b}(\bar{r})$ este o funcție vectorială cunoscută.

Dacă, ambilor membri ai relației (4.118) li se aplică operatorul divergență, se obține:

$$\text{div}(\bar{n} \times \bar{A}) = d(\bar{r}) \quad (4.120)$$

unde:

$$d(\bar{r}) = \text{div}(\bar{g}(\bar{r})) \quad (4.121)$$

Procedând la fel ca mai sus se obține:

$$\bar{n} \cdot \text{rot } \bar{A} = d(\bar{r}) \quad (4.122)$$

sau

$$\bar{n} \cdot \bar{B} = d(\bar{r}) \quad (4.123)$$

Deci, impunerea condiției de frontieră asupra componentei tangențiale a potențialului vector magnetic este echivalentă cu impunerea condiției de frontieră asupra componentei normale a inducției magnetice.

Astfel, dacă se impune condiția:

$$\bar{n} \times \bar{A} = 0 \quad (4.124)$$

rezultă că:

$$\bar{n} \cdot \bar{B} = 0 \quad (4.125)$$

Deci, condiția ca cel puțin pe o porțiune a frontierei bobinei, componenta tangentă a lui \bar{A} să fie nulă este echivalentă cu a impune că pe acea porțiune componenta normală a lui \bar{B} să fie nulă, adică *liniile de câmp magnetic să fie paralele cu porțiunea respectivă*.

De asemenea, presupunem că s-ar impune condiția:

$$\vec{n} \times \vec{B} = \vec{e}(\vec{r}) \quad (4.126)$$

adică componenta normală a inducției magnetice să fie cunoscută.

Se obține:

$$\vec{n} \cdot \vec{A} = h(\vec{r}) \quad (4.127)$$

unde:

$$h(\vec{r}) = \text{div}(\vec{e}(\vec{r})) \quad (4.128)$$

Astfel, dacă se impune condiția:

$$\vec{n} \cdot \vec{A} = 0 \quad (4.129)$$

rezultă:

$$\vec{n} \times \vec{B} = 0 \quad (4.130)$$

Deci, condiția ca, cel puțin pe o porțiune a frontierei bobinei, componenta

normală a lui \vec{A} să fie nulă, este echivalentă cu a impune ca pe acea porțiune componenta normală a inducției magnetice să fie nulă, adică *liniile de câmp magnetic să fie normale la porțiunea respectivă*.

Ca urmare, pentru studiul câmpului creat de bobină în sistem se folosește **modelul matematic continuu**:

$$\text{rot}(\text{rot}\vec{A}) = \mu_0 \vec{J}_S \quad (4.131)$$

unde \vec{A} , \vec{J}_S sunt potențialul magnetic vector, respectiv densitatea curentului dintr-un punct curent $P(x,y,z)$ al domeniului elementului finit respectiv.

Ecuția (4.131) se mai scrie sub forma:

$$\text{grad}(\text{div}\vec{A}) - \Delta\vec{A} = \vec{J}_S \quad (4.132)$$

4.2.2.2. Modelul matematic cu elemente finite al câmpului electric pentru sistemul bobină – izolație - aer

Pentru rezolvarea unei ecuații vectoriale, în care intervine ca necunoscută o mărime vectorială, se folosește metoda descompunerii pe componente [151]. Se obțin trei ecuații scalare, în care necunoscute sunt valorile componentelor mărimii vectoriale respective după axele sistemului de coordonate folosit. Fiecare componentă se aproximează printr-o relație [29].

Deci valoarea fiecărei componente se va aproxima prin suma produselor dintre funcția de formă atașată fiecărui nod al elementului finit și valoarea componenteii după axa respectivă a valorii vectoriale a mărimii vectoriale în acel nod, cu observația că funcția de formă atașată unui nod este aceeași în fiecare aproximare.

Pentru fiecare ecuație scalară se obține câte un model matematic cu elemente finite, model denumit și model elemental [151].

În ecuația (4.132) se presupune cunoscută \vec{J}_S , iar necunoscută va fi mărimea \vec{A} . Admițând că se folosește un sistem de coordonate carteziene, se notează cu $A_x, A_y, A_z, J_{sx}, J_{sy}, J_{sz}$ valorile componentelor după axe ale mărimii \vec{A} , respectiv ale mărimii \vec{J}_S . Evident că:

$$\vec{A} = A_x \vec{i} + A_y \vec{j} + A_z \vec{k} \quad (4.133)$$

unde $A_x \vec{i}, A_y \vec{j}, A_z \vec{k}$ sunt componentele mărimii vectoriale \vec{A} după axe, iar A_x, A_y, A_z reprezintă valorile acestor componente.

Se notează cu \bar{A}_λ valoarea vectorială a mărimii \bar{A} într-un nod arbitrar λ , iar $\bar{A}_{\lambda x}$, $\bar{A}_{\lambda y}$, $\bar{A}_{\lambda z}$ reprezintă valorile componentelor acesteia după axele respective. Evident că:

$$\bar{A}_\lambda = A_{\lambda x} \bar{i} + A_{\lambda y} \bar{j} + A_{\lambda z} \bar{k} \quad (4.134)$$

Conform celor precizate anterior, se definesc aproximările:

$$A_x = \sum_{\lambda=1}^p N_\lambda A_{\lambda x}; \quad A_y = \sum_{\lambda=1}^p N_\lambda A_{\lambda y}; \quad A_z = \sum_{\lambda=1}^p N_\lambda A_{\lambda z} \quad (4.135)$$

Se exprimă, în coordonate carteziene, operatorii ce intervin în relația (4.132) și apoi se grupează termenii ce multiplică câte unul dintre vectorii \bar{i} , \bar{j} , \bar{k} , care se egalează cu valoarea corespunzătoare a componentei lui \bar{J}_s . Se obțin astfel cele trei ecuații scalare menționate, în care A_x , A_y , A_z se înlocuiesc cu aproximările (4.135).

Folosind metoda reziduurilor ponderate a lui Galerkin [89], se obțin trei modele matematice cu elemente finite, denumite și modele elementale, în care necunoscutele sunt $A_{\lambda x}$, $A_{\lambda y}$, $A_{\lambda z}$, $\lambda = \overline{1, p}$, care se obțin prin rezolvarea modelelor numerice elementale. În final, se determină valoarea vectorială \bar{A}_λ , $\lambda = \overline{1, p}$, pe baza relației (4.134).

Însă, în scopul de a obține modele matematice cu elemente finite cât mai simple, se fac anumite transformări ale ecuației vectoriale date.

Astfel, se obține:

$$\bar{A} = \left(\sum_{\lambda=1}^p N_\lambda A_{\lambda x} \right) \bar{i} + \left(\sum_{\lambda=1}^p N_\lambda A_{\lambda y} \right) \bar{j} + \left(\sum_{\lambda=1}^p N_\lambda A_{\lambda z} \right) \bar{k} \quad (4.136)$$

Versorii \bar{i} , \bar{j} , \bar{k} , fiind constanți se pot introduce în sumă, și având în vedere relația (4.134) rezultă:

$$\bar{A} = \sum_{\lambda=1}^p N_\lambda \bar{A}_\lambda; \quad (4.137)$$

În ecuația vectorială (4.131), mărimea \bar{A} se înlocuiește cu expresia (4.137) și se are în vedere că, întrucât \bar{A}_λ este un vector constant, orice operator diferențial, aplicat lui \bar{A}_λ va da un rezultat nul.

Se consideră ecuația (4.131) și se obține:

$$\text{rot} \bar{A} = \text{rot} \left(\sum_{\lambda=1}^p N_\lambda \bar{A}_\lambda \right) = \sum_{\lambda=1}^p \text{rot} (N_\lambda \bar{A}_\lambda) = \sum_{\lambda=1}^p (\text{grad} N_\lambda \times \bar{A}_\lambda + N_\lambda \text{rot} \bar{A}_\lambda) \quad (4.138)$$

$$\text{rot} \bar{A} = \sum_{\lambda=1}^p \text{grad} N_\lambda \times \bar{A}_\lambda \quad (4.139)$$

unde s-a ținut cont de cele menționate mai sus și, deci:

$$\text{rot} \bar{A}_\lambda = 0 \quad (4.140)$$

Deci:

$$\text{rot}(\text{rot} \bar{A}) = \text{rot} \left(\sum_{\lambda=1}^p \text{grad} N_\lambda \times \bar{A}_\lambda \right) = \sum_{\lambda=1}^p \text{rot}(\text{grad} N_\lambda \times \bar{A}_\lambda) \quad (4.141)$$

Se folosește relația:

$$\text{rot}(\bar{u} \times \bar{v}) = -\bar{v} \text{div} \bar{u} + (\bar{v} \nabla) \bar{u} + \bar{u} \text{div} \bar{v} + (\bar{u} \nabla) \bar{v} \quad (4.142)$$

Alegând $\bar{u} = \text{grad}N_\lambda$, $\bar{v} = \bar{A}_\lambda$, se obține:

$$\text{rot}(\text{grad}N_\lambda \times \bar{A}_\lambda) = -\bar{A}_\lambda \text{div}(\text{grad}N_\lambda) + (\bar{A}_\lambda \nabla) \text{grad}N_\lambda + \text{grad}N_\lambda \text{div}\bar{A}_\lambda + (\text{grad}N_\lambda \nabla) \bar{A}_\lambda \quad (4.143)$$

Pe baza celor precizate mai sus, și deoarece $\text{div}(\text{grad}N_\lambda) = \Delta N_\lambda$ se obține:

$$\text{rot}(\text{rot}\bar{A}) = \sum_{\lambda=1}^p [(\bar{A}_\lambda \nabla) \text{grad}N_\lambda - \bar{A}_\lambda \Delta N_\lambda] \quad (4.144)$$

Se notează:

$$\bar{v} = \text{rot}(\text{rot}\bar{A}) \quad (4.145)$$

obținându-se:

$$\bar{v} = \sum_{\lambda=1}^p [(\bar{A}_\lambda \cdot \nabla) \text{grad}N_\lambda - \bar{A}_\lambda \Delta N_\lambda] \quad (4.146)$$

iar ecuația (4.131) devine:

$$\bar{v} = \mu_0 \bar{J}_s \quad (4.147)$$

Cele trei ecuații scalare vor fi:

$$v_x = \mu_0 J_{sx}; \quad v_y = \mu_0 J_{sy}; \quad v_z = \mu_0 J_{sz} \quad (4.148)$$

Pentru aflarea expresiilor lui v_x , v_y , v_z , se exprimă $\text{grad}N_\lambda$ în coordonate carteziene, iar vectorului astfel obținut i se aplică operatorul $\bar{A}_\lambda \nabla$ exprimat tot în coordonate carteziene. Grupând termenii, așa cum s-a menționat, și schimbând ordinea de derivare în anumiți termeni se obține:

$$\begin{aligned} v_x &= \sum_{\lambda=1}^p \left\{ \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial N_\lambda}{\partial x} \right) - \Delta N_\lambda \right] A_{\lambda x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial N_\lambda}{\partial y} \right) A_{\lambda y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial N_\lambda}{\partial z} \right) A_{\lambda z} \right\} \\ v_y &= \sum_{\lambda=1}^p \left\{ \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial N_\lambda}{\partial x} \right) A_{\lambda x} + \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial N_\lambda}{\partial y} \right) - \Delta N_\lambda \right] A_{\lambda y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial N_\lambda}{\partial z} \right) A_{\lambda z} \right\} \\ v_z &= \sum_{\lambda=1}^p \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial N_\lambda}{\partial x} \right) A_{\lambda x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial N_\lambda}{\partial y} \right) A_{\lambda y} + \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial N_\lambda}{\partial z} \right) - \Delta N_\lambda \right] A_{\lambda z} \right\} \end{aligned} \quad (4.149)$$

Implementarea pe calculator implică ca ecuațiile respective să fie scrise sub formă condensată și în acest scop se fac schimbări de notații. Astfel axele se notează cu x_1 , x_2 , x_3 și deci se fac următoarele înlocuiri: $x \rightarrow x_1$, $y \rightarrow x_2$, $z \rightarrow x_3$. Valoarea oricărei componente se notează cu un același indice ca și axa respectivă, adică se fac schimbările de notație: $A_{\lambda x} \rightarrow A_{\lambda 1}$, $A_{\lambda y} \rightarrow A_{\lambda 2}$, $A_{\lambda z} \rightarrow A_{\lambda 3}$; $J_{sx} \rightarrow J_{s1}$, $J_{sy} \rightarrow J_{s2}$, $J_{sz} \rightarrow J_{s3}$.

Ecuațiile (4.148) devin:

$$v_1 = \mu_0 J_{s1}; \quad v_2 = \mu_0 J_{s2}; \quad v_3 = \mu_0 J_{s3} \quad (4.150)$$

Relațiile (4.150) se transformă în:

$$\begin{aligned} v_1 &= \sum_{\lambda=1}^p \left\{ \left[\frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{\partial N_\lambda}{\partial x_1} \right) - \Delta N_\lambda \right] A_{\lambda 1} + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{\partial N_\lambda}{\partial x_2} \right) A_{\lambda 2} + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{\partial N_\lambda}{\partial x_3} \right) A_{\lambda 3} \right\} \\ v_2 &= \sum_{\lambda=1}^p \left\{ \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{\partial N_\lambda}{\partial x_1} \right) A_{\lambda 1} + \left[\frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{\partial N_\lambda}{\partial x_2} \right) - \Delta N_\lambda \right] A_{\lambda 2} + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{\partial N_\lambda}{\partial x_3} \right) A_{\lambda 3} \right\} \end{aligned} \quad (4.151)$$

$$v_3 = \sum_{\lambda=1}^p \left\{ \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\frac{\partial N_\lambda}{\partial x_1} \right) A_{\lambda 1} + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\frac{\partial N_\lambda}{\partial x_2} \right) A_{\lambda 2} + \left[\frac{\partial}{\partial x_3} \left(\frac{\partial N_\lambda}{\partial x_3} \right) - \Delta N_\lambda \right] A_{\lambda 3} \right\}$$

Pentru fiecare valoare a lui λ , necunoscute sunt $A_{\lambda 1}$, $A_{\lambda 2}$, $A_{\lambda 3}$, iar coeficienții lor, din cele trei relații (4.151), se notează cu C_{ij}^λ și se obțin cu relațiile:

$$C_{ij}^\lambda = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial N_\lambda}{\partial x_j} \right) - \delta_{ij} \Delta N_\lambda, i = \overline{1,3}; j = \overline{1,3} \quad (4.152)$$

unde δ_{ij} este simbolul lui Kroneker.

Cu ajutorul acestor coeficienți relațiile (4.151) devin:

$$\begin{aligned} v_1 &= \sum_{\lambda=1}^p (C_{11}^\lambda A_{\lambda 1} + C_{12}^\lambda A_{\lambda 2} + C_{13}^\lambda A_{\lambda 3}) \\ v_2 &= \sum_{\lambda=1}^p (C_{21}^\lambda A_{\lambda 1} + C_{22}^\lambda A_{\lambda 2} + C_{23}^\lambda A_{\lambda 3}) \\ v_3 &= \sum_{\lambda=1}^p (C_{31}^\lambda A_{\lambda 1} + C_{32}^\lambda A_{\lambda 2} + C_{33}^\lambda A_{\lambda 3}) \end{aligned} \quad (4.153)$$

sau condensat:

$$v_i = \sum_{\lambda=1}^p \left(\sum_{j=1}^3 C_{ij}^\lambda A_{\lambda j} \right), i = \overline{1,3} \quad (4.154)$$

În această relație, pe rând λ ia valorile $1, 2, \dots, p$ și pentru fiecare dintre aceste valori, mai întâi indicele i obține câte una dintre valorile $1, 2, 3$ și pentru fiecare dintre ele se face succesiv $j=1, 2, 3$.

În calculul matricial fiecărui vector i se asociază un vector coloană, ale cărui componente sunt valorile componentelor vectorului respectiv.

Deci, dacă pentru vectorii $\bar{v}, \bar{A}_\lambda, \bar{J}_s$, vectorii coloană asociați se notează cu $[v], [A_\lambda], [J_s]$, fiecare are dimensiunea 3×1 și expresiile:

$$[v] = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix}, \quad [A_\lambda] = \begin{bmatrix} A_{\lambda 1} \\ A_{\lambda 2} \\ A_{\lambda 3} \end{bmatrix}, \quad [J_s] = \begin{bmatrix} J_{s1} \\ J_{s2} \\ J_{s3} \end{bmatrix} \quad (4.155)$$

Aceasta permite ca ecuațiile (4.150) să se scrie condensat sub forma matricială:

$$[v] = \mu_0 [J_s] \quad (4.156)$$

Vectorul $[A_\lambda]$ se definește cu cele trei necunoscute din nodul λ și pentru toate cele p noduri va rezulta un număr de $3p$ necunoscute. Pentru ca modelul matematic cu elemente finite să aibă forma unui sistem de tip Cramer, cele $3p$ necunoscute trebuie să fie componentele unui vector coloană cu dimensiunile $3p \times 1$. Acesta se numește vectorul coloană al necunoscutelor problemei, ce se notează cu

$[A]$ și se obține prin concatenarea după coloane a vectorilor coloană $[A_\lambda]$, $\lambda = \overline{1, p}$, adică:

$$[A] = \begin{bmatrix} [A_1] \\ [A_2] \\ \vdots \\ [A_p] \end{bmatrix}; \quad [A] = \begin{bmatrix} [A_{11}] \\ [A_{12}] \\ [A_{13}] \\ [A_{21}] \\ [A_{22}] \\ [A_{23}] \\ \vdots \\ [A_{p1}] \\ [A_{p2}] \\ [A_{p3}] \end{bmatrix} \quad (4.157)$$

Pentru fiecare dintre relațiile (4.153) și pentru fiecare vector $[A_\lambda]$, $\lambda = \overline{1, p}$, se definește câte un vector linie, ce are ca și componente coeficienții necunoscutelor care intervin în vectorul $[A_\lambda]$. Acești vectori vor avea dimensiunile 1×3 , se notează cu $[C_i^\lambda]$ și au expresiile:

$$[C_i^\lambda] = [C_{i1}^\lambda C_{i2}^\lambda C_{i3}^\lambda], \quad i = \overline{1, 3}, \quad \lambda = \overline{1, p} \quad (4.158)$$

Se observă că elementele vectorilor $[C_i^\lambda]$ sunt tocmai coeficienții $[C_{ij}^\lambda]$, dați de relațiile (4.158)

Se notează cu $[C_i]$, $i = \overline{1, 3}$, vectorul linie obținut prin concatenare după linii a vectorilor $[C_{ij}^\lambda]$, $\lambda = \overline{1, p}$, adică:

$$[C_i] = [C_i^1 + C_i^2 + \dots + C_i^p], \quad i = \overline{1, 3} \quad (4.159)$$

Având în vedere relațiile (4.158), dezvoltat se obține:

$$[C_i] = [C_{i1}^1 C_{i2}^1 C_{i3}^1 C_{i1}^2 C_{i2}^2 C_{i3}^2 \dots C_{i1}^p C_{i2}^p C_{i3}^p], \quad i = \overline{1, 3} \quad (4.160)$$

Fiecare dintre vectorii $[C_i]$ are dimensiunea $1 \times 3p$ și conține toți coeficienții ce intervin în expresia lui v_i din relațiile (4.153).

Cu ajutorul vectorului coloană $[A]$, definit prin relația (4.157) și al vectorilor $[C_i]$, definiți prin relațiile (4.159), matricial, relațiile (4.153) se scriu sub forma:

$$v_1 = [C_1][A]; \quad v_2 = [C_2][A]; \quad v_3 = [C_3][A] \quad (4.161)$$

Pentru obținerea matricei $[v]$, se notează cu $[C]$ matricea obținută prin concatenarea după coloane a vectorilor $[C_i]$, $i = \overline{1, 3}$, adică:

$$[C] = \begin{bmatrix} [C_1] \\ [C_2] \\ [C_3] \end{bmatrix} \quad (4.162)$$

Având în vedere relațiile (4.158), matricea $[C]$ este:

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11}^1 C_{12}^1 C_{13}^1 C_{11}^2 C_{12}^2 C_{13}^2 \dots C_{11}^p C_{12}^p C_{13}^p \\ C_{21}^1 C_{22}^1 C_{23}^1 C_{21}^2 C_{22}^2 C_{23}^2 \dots C_{21}^p C_{22}^p C_{23}^p \\ C_{31}^1 C_{32}^1 C_{33}^1 C_{31}^2 C_{32}^2 C_{33}^2 \dots C_{31}^p C_{32}^p C_{33}^p \end{bmatrix} \quad (4.163)$$

Matricea $[C]$ are dimensiunile $3 \times 3p$ și conține toți coeficienții din relațiile (4.153).

Ținând cont de relațiile (4.161), (4.162) se observă, că matricial, relațiile (4.153) se scriu sub forma:

$$[v] = [C] * [A] \quad (4.164)$$

Conform procedurii menționate pentru metoda elementelor finite a lui Galerkin, pe rând, pentru fiecare nod, în ordinea crescătoare a indicelui, ecuația (4.156) se înmulțește cu funcția de formă a nodului respectiv și se integrează pe domeniul D al elementului finit.

Pentru un nod arbitrar α se obține:

$$\int_D N_\alpha [v] dD = \int_D \mu_0 N_\alpha [J_s] dD \quad \alpha = \overline{1, p} \quad (4.165)$$

Se înlocuiește $[v]$ cu expresia dată de (4.164) și ținând cont că elementele matricei $[A]$ sunt constante, se obține:

$$\left(\int_D N_\alpha [C] dD \right) [A] = \int_D \mu_0 N_\alpha [J_s] dD \quad \alpha = \overline{1, p} \quad (4.166)$$

Se introduc notațiile:

$$[K_\alpha] = \int_D N_\alpha [C] dD; \quad [F_\alpha] = \int_D \mu_0 N_\alpha [J_s] dD \quad \alpha = \overline{1, p} \quad (4.167)$$

Ecuatiile (4.166) se scriu sub forma:

$$[K_\alpha] \cdot [A] = [F_\alpha] \quad \alpha = \overline{1, p} \quad (4.168)$$

Ecuția (4.168) reprezintă **modelul matematic cu elemente finite** al câmpului electric pentru sistemul bobină - izolație - aer.

Elementele matricei $[K_\alpha]$ se obțin înmulțind fiecare element al matricei $[C]$ cu N_α și apoi fiecare element astfel stabilit, se integrează pe domeniul D .

Evident că $[K_\alpha]$ are aceleași dimensiuni ca și $[C]$, adică $3 \times 3p$.

Pentru deducerea vectorului coloană $[F_\alpha]$, fiecare element al vectorului coloană $[J_s]$ se înmulțește cu $\mu_0 N_\alpha$ și apoi, fiecare element astfel obținut, se integrează pe domeniul D .

Vectorul $[F_\alpha]$ va avea aceleași dimensiuni ca și $[J_s]$, adică 3×1 .

Se notează cu $[K]$ matricea obținută prin concatenarea după linii a matricelor $[K_\alpha]$, $\alpha = \overline{1, p}$ și cu $[F]$ vectorul coloană obținut prin concatenarea după linii a vectorilor $[F_\alpha]$, $\alpha = \overline{1, p}$, adică:

$$[K] = \begin{bmatrix} [K_1] \\ [K_2] \\ \vdots \\ [K_p] \end{bmatrix}; \quad [F] = \begin{bmatrix} [F_1] \\ [F_2] \\ \vdots \\ [F_p] \end{bmatrix} \quad (4.169)$$

Ecuatiile (4.168) obțin forma matricială:

$$[K] * [A] = [F] \quad (4.170)$$

Matricea $[K]$ are dimensiunile $3p \times 3p$ și va fi tocmai matricea de rigiditate elementală, iar $[F]$ are dimensiunile $3p \times 1$ și va fi vectorul termenilor liberi elementali.

Pentru implementare elementele matricei $[C]$ trebuie notate în mod obișnuit, adică:

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} & \dots & C_{13p} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} & \dots & C_{23p} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} & \dots & C_{33p} \end{bmatrix} \quad (4.171)$$

Notând cu $C_{\alpha\beta}$ un element arbitrar al matricei $[C]$ în relația (4.171) se pune problema de a stabili valorile lui i, j, λ pentru ca elementul $C_{\alpha\beta}$ să poată fi calculat cu relația (4.152).

Se notează cu $\beta \bmod 3$ (β modulo 3) restul împărțirii lui β la 3.

Comparând expresia (4.171) cu expresia (4.163) se obțin:

$$j = \begin{cases} i = \alpha \\ \beta \text{ dacă } \beta \leq 3 \\ 3 \text{ dacă } \beta \bmod 3 = 0 \\ \beta \bmod 3 \text{ dacă } \beta \bmod 3 \neq 0 \end{cases} \quad (4.172)$$

$$\lambda = \text{ceilling}\left(\frac{\beta}{3}\right)$$

unde $\text{ceilling}\left(\frac{\beta}{3}\right)$ este o funcție de rotunjire superioară și dacă, $\frac{\beta}{3}$ este un întreg, are valoarea egală cu acel întreg, iar în caz contrar valoarea este egală cu a întregului imediat superior.

Valorile lui i se implementează printr-o instrucțiune de atribuire, valorile lui j cu instrucțiunea IF, THEN, ELSE, iar pentru valorile lui λ se folosește funcțiunea $\text{ceilling}(x)$ pe care o posedă orice limbaj de programare.

Pentru a stabili o relație, cu ajutorul căreia să se poată calcula direct elementele matricei $[K]$, mai întâi, se definește o matrice $[B]$ cu dimensiunile $3p \times 3p$, la care, fiecare grup de câte trei linii consecutive se obțin înmulțind elementele matricei $[C]$ cu N_1 , respectiv cu N_2 , respectiv cu N_3, \dots , respectiv cu N_p , adică:

$$[B] = \begin{bmatrix} N_1 C_{11} & N_1 C_{12} & N_1 C_{13} & N_1 C_{14} & N_1 C_{15} & N_1 C_{16} & \dots & N_1 C_{13p} \\ N_1 C_{21} & N_1 C_{22} & N_1 C_{23} & N_1 C_{24} & N_1 C_{25} & N_1 C_{26} & \dots & N_1 C_{23p} \\ N_1 C_{31} & N_1 C_{32} & N_1 C_{33} & N_1 C_{34} & N_1 C_{35} & N_1 C_{36} & \dots & N_1 C_{33p} \\ N_2 C_{11} & N_2 C_{12} & N_2 C_{13} & N_2 C_{14} & N_2 C_{15} & N_2 C_{16} & \dots & N_2 C_{13p} \\ N_2 C_{21} & N_2 C_{22} & N_2 C_{23} & N_2 C_{24} & N_2 C_{25} & N_2 C_{26} & \dots & N_2 C_{23p} \\ N_2 C_{31} & N_2 C_{32} & N_2 C_{33} & N_2 C_{34} & N_2 C_{35} & N_2 C_{36} & \dots & N_2 C_{33p} \\ N_3 C_{11} & N_3 C_{12} & N_3 C_{13} & N_3 C_{14} & N_3 C_{15} & N_3 C_{16} & \dots & N_3 C_{13p} \\ N_3 C_{21} & N_3 C_{22} & N_3 C_{23} & N_3 C_{24} & N_3 C_{25} & N_3 C_{26} & \dots & N_3 C_{23p} \\ N_3 C_{31} & N_3 C_{32} & N_3 C_{33} & N_3 C_{34} & N_3 C_{35} & N_3 C_{36} & \dots & N_3 C_{33p} \end{bmatrix} \quad (4.173)$$

Folosind notația obișnuită, se obține:

$$[B] = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} & B_{14} & B_{15} & B_{16} & \dots & B_{13p} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} & B_{24} & B_{25} & B_{26} & \dots & B_{23p} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} & B_{34} & B_{35} & B_{36} & \dots & B_{33p} \\ B_{41} & B_{42} & B_{43} & B_{44} & B_{45} & B_{46} & \dots & B_{43p} \\ B_{51} & B_{52} & B_{53} & B_{54} & B_{55} & B_{56} & \dots & B_{53p} \\ B_{61} & B_{62} & B_{63} & B_{64} & B_{65} & B_{66} & \dots & B_{63p} \\ B_{71} & B_{72} & B_{73} & B_{74} & B_{75} & B_{76} & \dots & B_{73p} \\ B_{81} & B_{82} & B_{83} & B_{84} & B_{85} & B_{86} & \dots & B_{83p} \\ B_{91} & B_{92} & B_{93} & B_{94} & B_{95} & B_{96} & \dots & B_{93p} \end{bmatrix} \quad (4.174)$$

Comparând relațiile de mai sus, rezultă că un element arbitrar al matricei [B], notat cu $B_{\gamma\delta}$, se obține dintr-un element arbitrar $C_{\alpha\beta}$ al matricei [C], cu relația:

$$B_{\gamma\delta} = N_k C_{\alpha\beta} \quad (4.175)$$

în care:

$$\alpha = \begin{cases} \gamma & \text{dacă } \gamma \leq 3 \\ 3 & \text{dacă } \gamma \bmod 3 = 0 \\ \gamma \bmod 3 & \text{dacă } \gamma \bmod 3 \neq 0 \end{cases} \quad (4.176)$$

$$k = \text{round}\left(\frac{\gamma}{3}\right)$$

Pe baza celor precizate, rezultă că un element arbitrar al matricei de rigiditate elementală, notat cu $K_{\gamma\delta}$, se calculează cu relația:

$$K_{\gamma\delta} = \int_{\gamma} N_k C_{\alpha\beta} dD \quad (4.177)$$

unde valorile lui α , β se stabilesc conform relațiilor (4.176). Pentru calculul valorilor lui $C_{\alpha\beta}$, se determină mai întâi i , j , λ cu relațiile (4.172), și apoi:

$$C_{\alpha\beta} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial N_{\lambda}}{\partial x_i} \right) - \delta_{ij} N_{\lambda} \quad (4.178)$$

Notând cu F_{α} , $\alpha = \overline{1,3p}$ un element al vectorului [F] acesta se calculează cu relația:

$$F_{\alpha} = N_{\lambda} F_i \quad (4.179)$$

unde:

$$i = \begin{cases} \alpha & \text{dacă } \alpha \leq 3 \\ 3 & \text{dacă } \alpha \bmod 3 = 0 \\ \alpha \bmod 3 & \text{dacă } \alpha \bmod 3 \neq 0 \end{cases} \quad (4.180)$$

$$\lambda = \text{ceilling}\left(\frac{\alpha}{3}\right)$$

În felul acesta se calculează direct toate elementele matricei de rigiditate elementale și ale vectorului coloană elemental.

4.2.3. Calculul unghiului de pierderi dielectrice

Prin intermediul programului de simulare s-a calculat tangenta unghiului de pierderi $\text{tg}\delta$ la diferite tensiuni în trepte, de la $0,2U_n$ până la $1,4U_n$.

Pe baza modelului matematic continuu și a modelului matematic cu elemente finite pentru determinarea câmpului electric, tangenta unghiului de pierderi dielectrice s-a determinat din matricea de conductivitate electrică $[\sigma]$, ținând cont de pierderile care apar în materialele dielectrice.

În acest caz matricea de conductivitate este înlocuită cu matricea de conductivitate efectivă $[\sigma_{eff}]$ definită astfel:

$$[\sigma_{eff}] = [\sigma] + \omega[\varepsilon]\tan\delta \quad (4.181)$$

Tangenta unghiului de pierderi dielectrice reprezintă tocmai capacitatea C dintre armătura considerată bobină și armătura considerată aer, adică izolația.

Formula de calcul a capacității C este:

$$C = (w * 2) / ((V1 - V0) * *2) \quad (4.182)$$

unde:

w este distanța dintre cele două armături [mm];

V1 este tensiunea electrică care se aplică [V];

V0 este tensiunea electrică de referință [V].

Rezultatele obținute sunt ilustrate în figurile 4.4 ÷ 4.12.

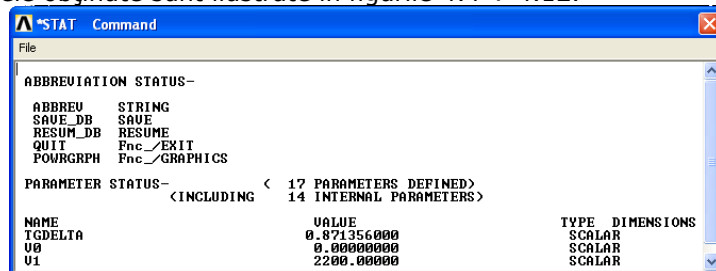


Figura 4.4. Tangenta unghiului de pierderi tgδ la tensiunea 0,2U_n

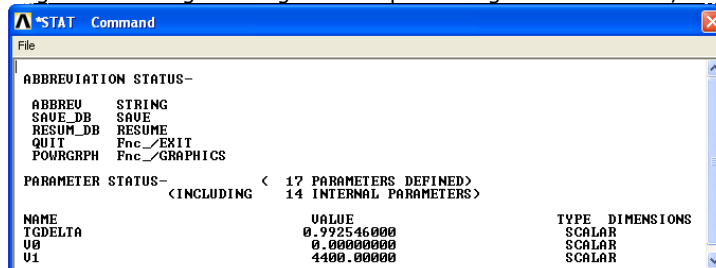


Figura 4.5. Tangenta unghiului de pierderi tgδ la tensiunea 0,4U_n

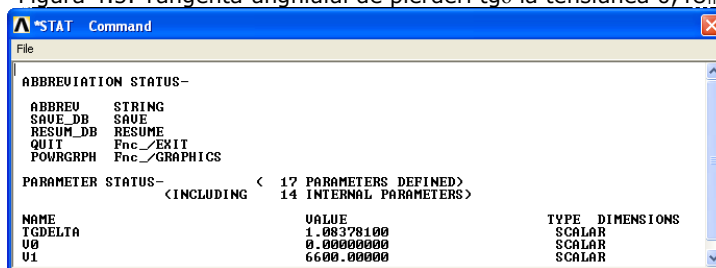


Figura 4.6. Tangenta unghiului de pierderi tgδ la tensiunea 0,6U_n

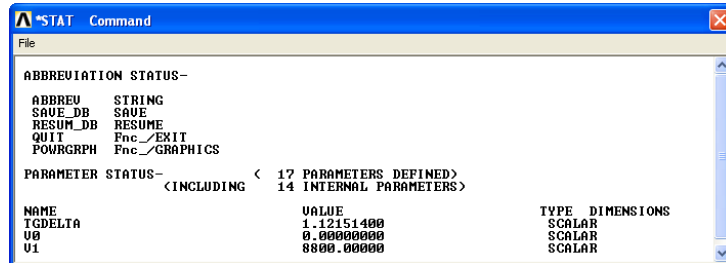


Figura 4.7. Tangenta unghiului de pierderi $tg\delta$ la tensiunea $0,8U_n$

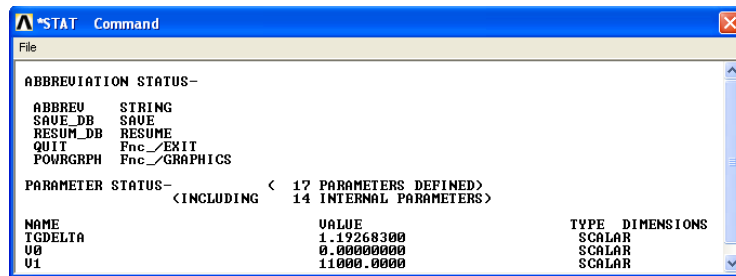


Figura 4.8. Tangenta unghiului de pierderi $tg\delta$ la tensiunea U_n

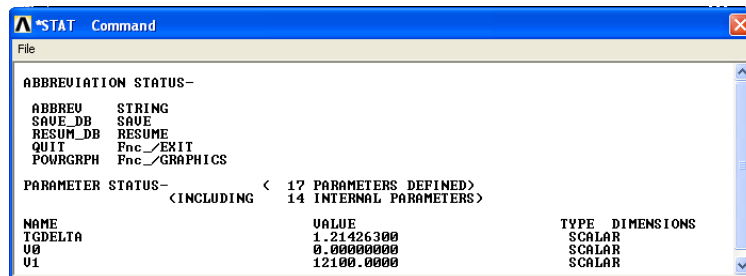


Figura 4.9. Tangenta unghiului de pierderi $tg\delta$ la tensiunea $1,1U_n$

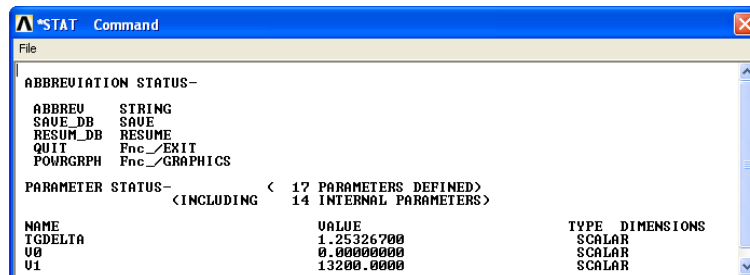
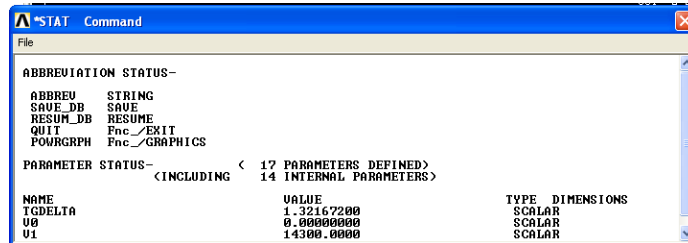
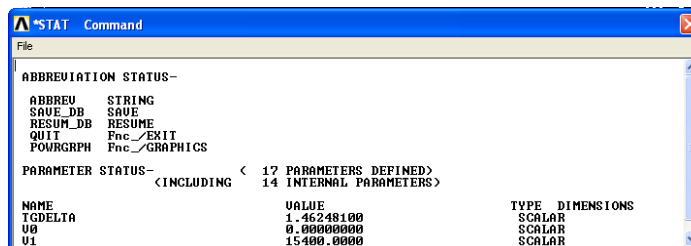


Figura 4.10. Tangenta unghiului de pierderi $tg\delta$ la tensiunea $1,2U_n$

Figura 4.11. Tangenta unghiului de pierderi tg δ la tensiunea 1,3U_nFigura 4.12. Tangenta unghiului de pierderi tg δ la tensiunea 1,4U_n

4.3. Etapele utilizate în simularea sistemului bobină – izolație – aer

Simularea sistemului bobină – izolație – aer a fost realizată cu mediul de simulare ANSYS.

Simularea implică trei etape: preprocesare, procesare (soluționare), postprocesare.

Etapa de preprocesare

În această etapă autorul a realizat următoarele:

1. Alegerea tipului de analiză și anume: analiza termică și analiză electrică.
 2. Pentru analizele precizate mai sus, s-au ales tipurile de elemente finite care se pretează cel mai bine analizelor.
 3. S-au stabilit proprietățile materialelor din care este format modelul geometric.
 4. Construirea modelului geometric al sistemului bobină – izolație – aer, pe baza dimensionării bobinei și a izolației prezentată în capitolul 5.
 5. Atribuirea tipului de element și a materialului, pentru fiecare arie a modelului geometric, având în vedere că acesta este constituit din materiale diferite și ariile sunt discretizate cu tipuri de elemente diferite.
- Fiecărui material și tip de element ales i s-a atribuit un indicator (pointers). Pentru fiecare arie s-au atribuit indicatorul corespunzător materialului și indicatorul tipului de element stabilit.
6. Stabilirea parametrilor rețelei de discretizare și a tipul de rețea utilizată.
 7. Discretizarea modelului geometric în elemente finite.

Etapa de procesare

În etapa de procesare autorul a stabilit următoarele:

1. a ales regimul analizei ca fiind unul nestaționar (tranzitoriu)
2. modelele matematice și discretizarea acestora pentru rezolvarea sistemului de ecuații liniare și a celei pentru rezolvarea sistemului de ecuații neliniare.

3. numărul de iterații (pentru problemele neliniare) și a criteriului de convergență.

4. mărimile de interes pentru care se stochează valorile, în vederea postprocesării, precum și a numărului de valori ce se stochează.

5. Impunerea condițiilor de frontieră și sarcinile aplicate pe elementele modelului discretizat, elemente care în prealabil au fost selectate.

Etapa de postprocesare

În această etapă au fost obținute rezultatele simulării. Aceste rezultate au fost redată sub forma de distribuție pe model și sub forma grafică.

4.4. Modelul geometric al sistemului bobină – izolație – aer

Modelul geometric pentru sistemul bobină – izolație - aer

Autorul a elaborat un model geometric, prezentat în capitolul 5, identic din punct de vedere dimensional, cu sistemul bobină stator – izolație [119], [120], model care este constituit din două arii și anume:

- aria conductoarelor elementare – aria 1

- aria izolației – aria 2

prezentat în figura 4.13.

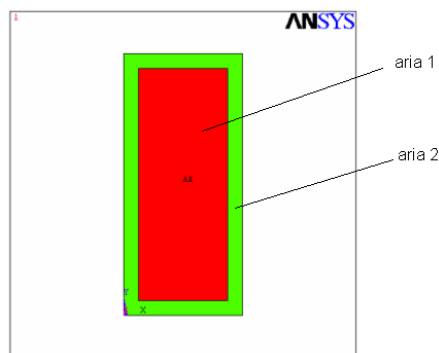


Figura 4.13. Model geometric al sistemului bobină – izolație

Având în vedere că testele asupra izolației bobinei se execută cu bobinele pe stand, în modelul geometric s-a inclus și zona de aer – aria 3. Această zonă are valoarea de 1 metru, valoare considerată infinită în comparație cu dimensiunile bobinei stator. Eroarea apărută ca urmare a acestei aproximări rezultă neglijabilă.

În figura 4.14. s-a ilustrat modelul geometric al sistemului bobină – izolație – aer.

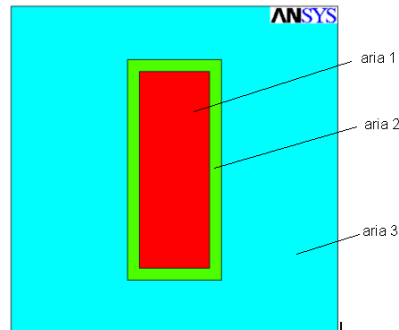


Figura 4.14. Modelul geometric al sistemului bobină – izolație – aer

Proprietățile de material pentru sistemul bobină – izolație – aer

Modelului geometric creat de către autor i s-au atribuit aceleași proprietăți de material ca și bobinelor realizate fizic, adică:

- aria 1 – cupru, [41], cu următoarele proprietăți: densitatea la 20°C: $\rho = 0,01724 \text{ mm}^2/\text{m}$; coeficientul de dilatare termică: $\alpha = 0,00393 \text{ K}^{-1}$; greutatea specifică: $\gamma = 8930 \text{ kg/m}^3$.

- aria 2 – Calmicaglass 2005, [40], pentru izolație, cu următoarele proprietăți: densitatea $1,8 \text{ g/cm}^3$; conductivitatea termică: $0,25 \text{ W/mxK}$; coeficientul de dilatare liniară: cca. $10 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$; rigiditatea dielectrică: $\geq 50 \text{ kV/mm}$; constanta dielectrică: 4,5; factorul de pierderi dielectrice la: 23°C: $\leq 10 \times 10^{-3}$, 90°C: $\leq 25 \times 10^{-3}$, 155°C: $\leq 100 \times 10^{-3}$; clasa termică de izolație: F (155°C).

- aria 3 – aer având permeabilitate magnetică relativă $\mu_r = 1$.

Discretizarea domeniului sistemului bobină – izolație – aer

Rețeaua de discretizare este realizată cu două tipuri de elemente finite [87], 2D și anume:

- pentru bobină s-a ales tipul de element finit PLANE55 (figura 4.15), deoarece bobina fiind alimentată la o anumită tensiune și fiind parcursă de un anumit curent aceasta se încălzește, degajând căldură în masa izolației. Totodată, bobina fiind parcursă de un anumit curent, creează un câmp electric, câmp care are influență și asupra izolației [89].

- pentru izolație și pentru aer s-a ales tipul de element finit PLANE53 (figura 4.16).

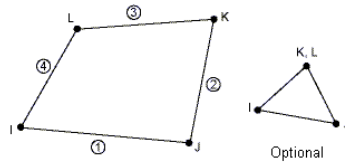


Figura 4.15. Element finit tip PLANE55

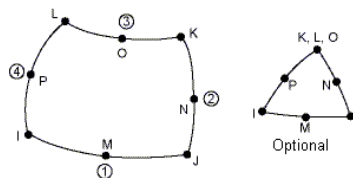


Figura 4.16. Element finit tip PLANE53

În urma alegerii acestui tip de element finit, s-a obținut o rețea de discretizare prezentată în figurile 4.17 și 4.18.

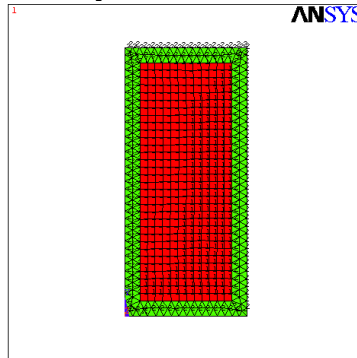


Figura 4.17. Discretizarea modelului geometric al sistemului bobină – izolație

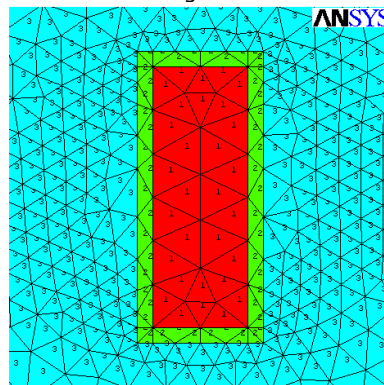


Figura 4.18. Sistemul bobină – izolație – aer discretizat

4.5. Simularea câmpului termic pentru sistemul bobină – izolație – aer

Pe baza modelului matematic cu elemente finite al câmpului termic în sistem, s-a simulat temperatura maximă în sistem, obținându-se rezultatele prezentate în figura 4.19 și figura 4.20, fără a ține cont de zona de aer, din exteriorul acesteia.

Distribuția temperaturii în izolație când înfășurarea stator are 75°C iar temperatura mediului ambiant este de 30°C este ilustrată în figura 4.19.

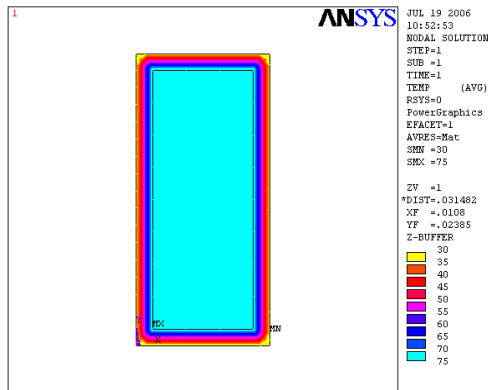


Figura 4.19. Distribuția temperaturii în izolație când înfășurarea stator are 75°C iar temperatura mediului ambiant are 30°C

Distribuția temperaturii sub forma grafică în izolație când înfășurarea stator are 75°C la 30°C (temperatura mediului ambiant) este ilustrată în figura 4.20.

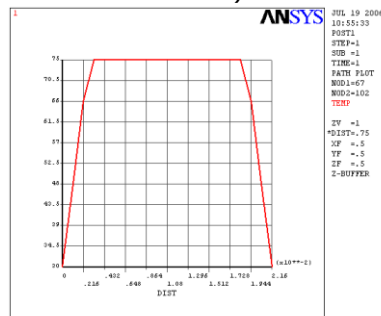


Figura 4.20. Graficul distribuției temperaturii în izolație când înfășurarea stator are 75°C iar temperatura mediului ambiant are 30°C

Ținând cont și de zona de aer, în urma simulării câmpului termic la temperatura maximă a bobinei s-au obținut următoarele rezultate: distribuția temperaturii în sistem; distribuția gradientului termic, atât sub formă grafică cât și valorile acestor mărimi.

Distribuția temperaturii în sistem când înfășurarea stator are 75°C iar temperatura mediului ambiant este de 30°C, detalierea sistemului și graficul acestei distribuții sunt ilustrate în figura 4.21, figura 4.22 și figura 4.23.

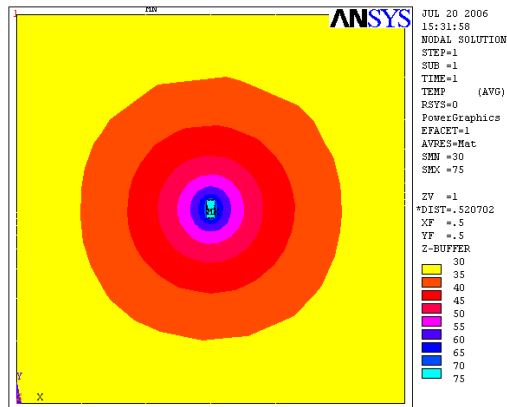


Figura 4.21. Distribuția temperaturii în sistem când înfășurarea stator are 75°C iar temperatura mediului ambiant este de 30°C

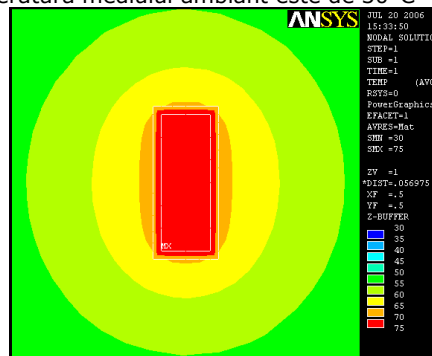


Figura 4.22. Detalierea zonei sistemului bobină – izolație – aer

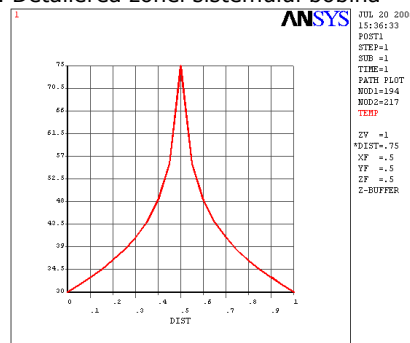


Figura 4.23. Graficul distribuției temperaturii în izolație când înfășurarea stator are 75°C la 30°C (temperatura mediului ambiant)

Gradientul termic în sistem când are loc transferul de temperatură de la 75°C (temperatura bobinajului) iar temperatura mediului ambiant este de 30°C este ilustrat în figura 4.24.

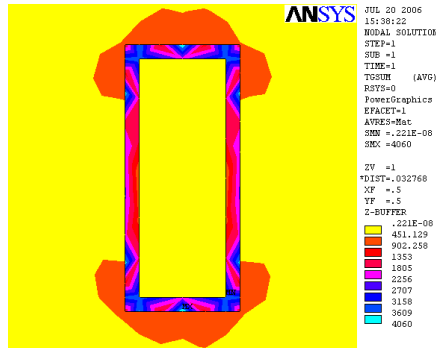


Figura 4.24. Gradientul termic în sistem la transferul de temperatură de la 75°C (temperatura bobinajului) iar temperatura mediului ambiant este de 30°C
În zona critică, gradientul de temperatură sub formă grafică este ilustrat în figura 4.25.

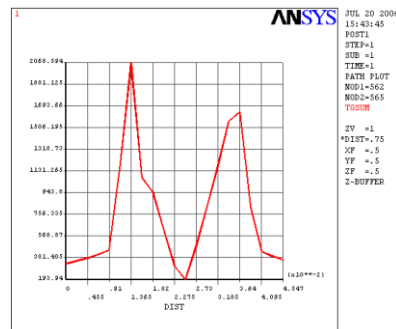


Figura 4.25. Graficul gradientului de temperatură în zonele critice ale sistemului de la 75°C (temperatura bobinajului) la 30°C (temperatura mediului ambiant)

Pe baza discretizării modelului matematic al câmpului electric din sistem, s-au simulat diferite tensiuni de alimentare ale bobinei, obținându-se rezultatele prezentate pentru tensiunea nominală și pentru tensiunea de străpungere.

4.6. Simularea câmpului electric pentru sistemul bobină – izolație – aer

Distribuția potențialului electric în sistemul bobină – izolație - aer când înfășurarea stator este alimentată la tensiunea nominală $U_n = 11$ kV iar zona exterioară are potențial zero este ilustrată în figura 4.26, iar în figura 4.27 se prezintă distribuția grafică a acestui potențial.

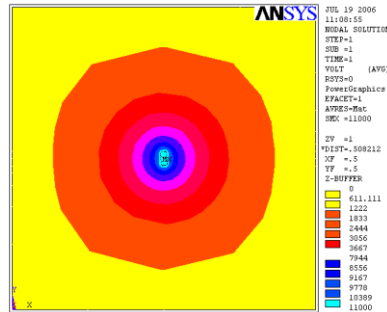


Figura 4.26. Distribuția potențialului electric în sistem când bobina este alimentată la $U_n = 11 \text{ kV}$

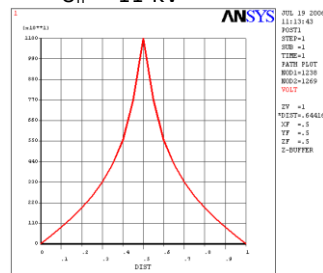


Figura 4.27. Graficul distribuția potențialului electric în sistem când bobina este alimentată la $U_n = 11 \text{ kV}$

Câmpul electric în sistem, atunci când bobina este alimentată la $U_n = 11 \text{ kV}$ are o distribuție ca și în figura 4.28 iar în figura 4.29 este ilustrat graficul acestuia.

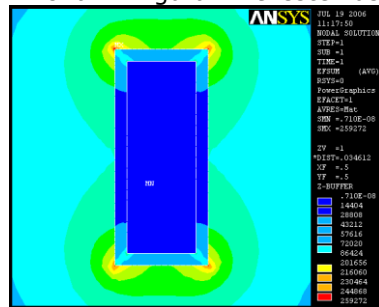


Figura 4.28. Câmpul electric creat de bobină în sistem

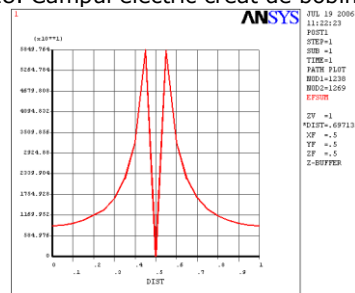


Figura 4.29. Graficul câmpului electric creat de bobină în sistem
Sub formă grafică distribuția câmpului electric, în zonele critice ale sistemului, este redată în figura 4.30.

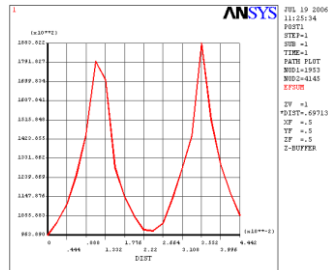


Figura 4.30. Graficul câmpului electric creat de bobină în sistem, în zonele critice

4.7. Simularea sistemului bobină – izolație - aer la tensiunea de străpungere

În urma analizei izolației la diferite tensiuni de străpungere s-a constatat că tensiunea de străpungere a izolației este de 40 kV. Această tensiune de străpungere, obținută prin simulare corespunde cu valoarea practică, rezultată în urma testărilor pe stand a bobinelor.

Distribuția potențialului electric în sistemul bobină - izolație atunci când bobina este alimentată la tensiunea de străpungere de 40 kV este redată în figura 4.31, iar în figura 4.32 este ilustrat graficul acestui potențial.

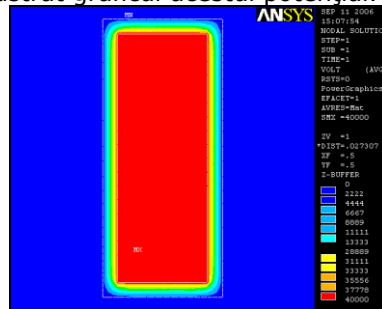


Figura 4.31. Distribuția potențialul electric în sistemul bobină – izolație

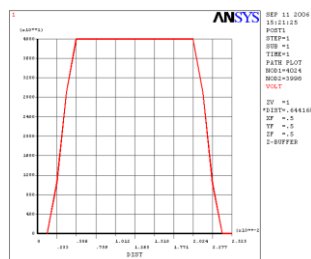


Figura 4.32. Graficul distribuției potențialului electric în sistemul bobină - izolație
 Distribuția câmpului electric în sistemul bobină – izolație este redată în figura 4.33 și graficul acestei distribuții este ilustrat în figura 4.34.

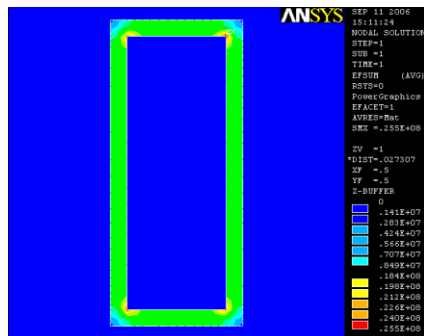


Figura 4.33. Distribuția câmpului electric în sistemul bobină – izolație

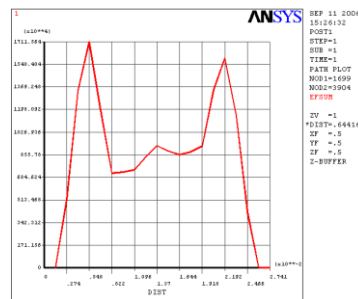


Figura 4.34. Graficul distribuției câmpului electric în sistemul bobină - izolație

În figura 4.35 și figura 4.36 sunt ilustrate densitatea fluxului electric și graficul acestei distribuții în sistemul bobină – izolație.

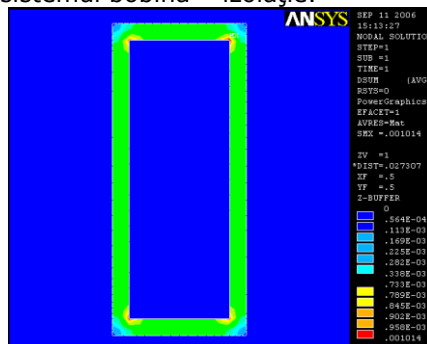


Figura 4.35. Densitatea fluxului electric în sistemul bobină – izolație

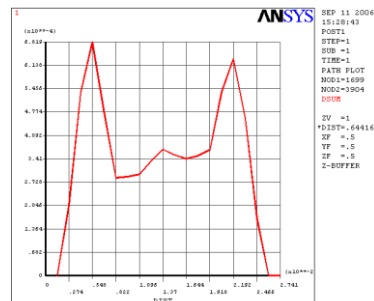


Figura 4.36. Graficul densității fluxului electric în sistemul bobină – izolație

4.7 – Simularea sistemului bobină – izolație – aer la tensiunea de străpungere 59

Pentru o analiză mai exactă a tensiunii de străpungere s-a ținut cont și de zona aerului.

În sistemul bobină – izolație – aer potențialul electric și graficul acestuia sunt ilustrate în figurile 4.37 și 4.38.

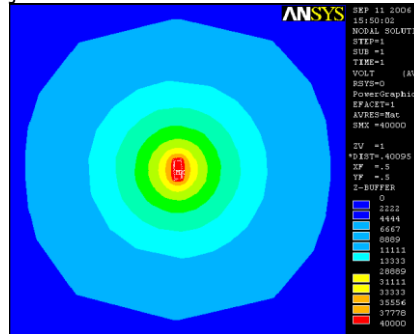


Figura 4.37. Potențialului electric în sistem

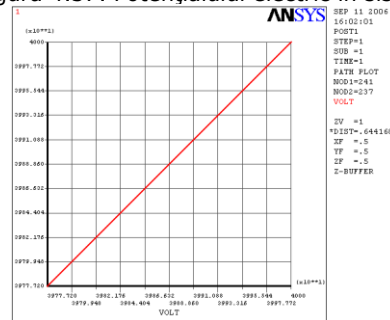


Figura 4.38. Graficul distribuției potențialului electric în sistem

În figura 4.39 și în figura 4.40 s-au ilustrat detalierea sistemului bobină – izolație – aer pentru potențialul electric și graficul acestuia.



Figura 4.39. Detalierea sistemului bobină – izolație – aer pentru potențialul electric

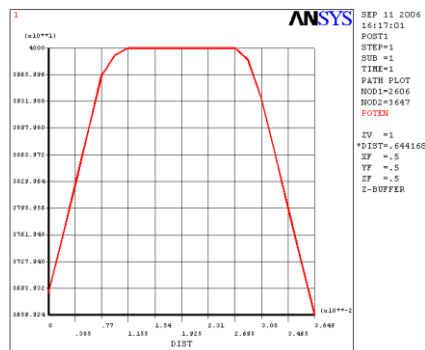


Figura 4.40. Graficul potențialului electric pentru sistemul bobină – izolație – aer
 Figurile 4.41 și 4.42 redau distribuția câmpului electric și graficul acestei distribuții în sistem.

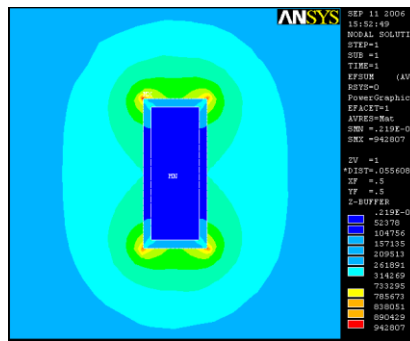


Figura 4.41. Distribuția câmpului electric în sistem

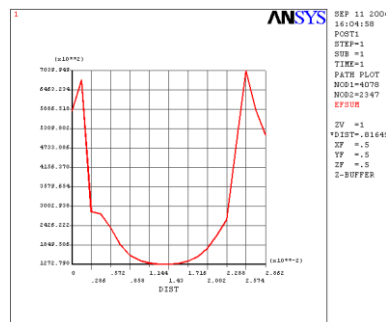


Figura 4.42. Graficul distribuției câmpului electric în sistem

Figurile 4.43. și 4.44 ilustrează distribuția densității fluxului electric și graficul acesteia în sistem.

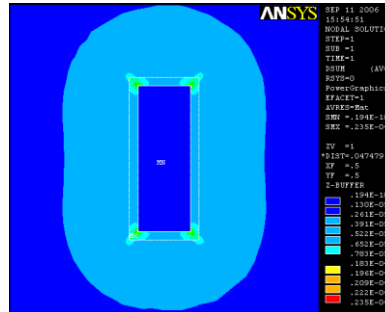


Figura 4.43. Distribuția densității fluxului electric în sistem

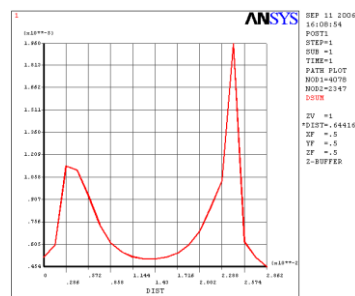


Figura 4.44. Graficul fluxului electric în sistem

4.8. Concluzii

Studiul termic al sistemului bobină – izolație - aer urmărește determinarea evoluției în timp a temperaturii din punctele izolației, având în vedere că de această evoluție depinde calitatea izolației.

Ecuatiile modelului matematic continuu al câmpului termic se exprimă prin ecuații cu derivate parțiale. Rezolvarea acestor ecuații impune integrarea lor în timp și spațiu. Constantele de integrare necesare pentru obținerea unor soluții unice, se determină impunând condiții inițiale și de frontieră. Condițiile inițiale stabilesc distribuția de temperatură la începutul procesului. Condițiile de frontieră stabilesc parametrii schimbului de căldură pe frontiera sistemului bobină – izolație – aer.

Pentru simularea câmpului termic cu mediul specializat ANSYS, având ca bază modelul matematic continuu s-a determinat modelul matematic cu elemente finite al câmpului termic.

Expresiile matricelor de rigiditate (conductivitate) și a vectorului încărcărilor termice, din modelul matematic cu elemente finite, se determină pe baza tipului de element finit ales.

În urma analizei câmpului termic din izolație se constată următoarele:

- distribuția spațială a temperaturii în sistem nu este uniformă. Analizând figurile 4.19÷4.23 se constată că în masa izolației temperatura crește brusc de la temperatura pe care o are izolația la exterior, adică temperatura mediului ambiant de 30°C la temperatura de 75°C în jurul bobinei;

- temperatura în masa izolației nu este uniformă, iar gradientul de temperatură nu este constant de-a lungul izolației. Gradientul de temperatură atinge valori maxime acolo unde distanța dintre suprafețele izoterme este mai mică.

Valorile de temperatură obținute cu modelul matematic cu elemente finite implementat în ANSYS furnizează valori ale temperaturii în izolație, valori care nu poate fi determinate în straturile izolației prin măsurători.

Elaborarea modelului matematic continuu al câmpului electric a avut la bază forma locală a legii inducției electromagnetice.

Condițiile de interfață (de trecere) s-au impus deoarece în sistemul bobină – izolație – aer intervin medii cu proprietăți diferite.

Condițiile inițiale și de frontieră pentru câmpul electric al sistemului bobină – izolație – aer a condus la scrierea condensată a modelului matematic continuu.

Obținerea modelului matematic cu elemente finite al câmpului electric are la bază modelul matematic continuu.

Deoarece modelul matematic continuu al câmpului electric este exprimat printr-o ecuație vectorială, în care intervine ca necunoscută o mărime vectorială, pentru rezolvarea acestuia se folosește metoda descompunerii pe componente, după axele sistemului de coordonate, obținându-se astfel trei ecuații scalare.

Pentru fiecare ecuație scalară s-a obținut câte un model matematic cu elemente finite, model denumit și model elemental.

Implementarea pe calculator implică ca ecuațiile modelului matematic cu elemente finite să fie scrise sub formă matricială.

În urma analizei potențialului electric și a câmpului electric din izolație se constată următoarele:

- distribuția acestora în sistemul bobină – izolație – aer nu este uniformă. Analizând figurile 4.26÷4.30 se constată că în masa izolației potențialul electric, respectiv câmpul electric ating valori maxime în colțurile izolației;

- la tensiunea de străpungere de $U_{str}=40kV$, din figura 4.33 și figura 4.34, respectiv figura 4.41 și figura 4.42 se constată că în sistem, câmpul electric atinge valoarea maximă în colțurile izolației, unde aceasta străpunge; pe direcție longitudinală câmpul electric are o valoare constantă iar pe direcție transversală, variația acestuia este minimă;

- deoarece câmpul electric la tensiunea de străpungere nu are o variație uniformă în masa izolației, fluxul electric nu este constant de-a lungul izolației, atingând valori maxime în zonele în care izolația străpunge, adică în colțurile izolației.

Prin simularea și determinarea câmpului termic și a câmpului electric cu metoda elementelor finite apare posibilitatea unei optimizări a izolației. Astfel, se poate stabili grosimea izolației astfel încât să se obțină o grosime optimă a acesteia încă din faza de proiectare a statorului.

Validarea metodei cu elemente finite presupune o comparație între valorile obținute prin rezolvarea modelelor cu elemente finite ale câmpurilor termic și electric și valorile determinate experimental. Validarea este detaliată în capitolul 8 al prezentei lucrări.

Simularea cu elemente finite s-a dovedit o alternativă viabilă în studiul câmpului termic și electric. Modelul matematic cu elemente finite se dovedește a fi cel mai în măsură să simuleze fenomenele reale care apar în sistemele de izolații.

Modelele matematice elaborate pentru studiul câmpului termic și al câmpului electric prezentate pot fi utilizate și în studiul altor sisteme de izolație cu geometrii mai complexe.

5. ALGORITM PENTRU DETERMINAREA PARAMETRILOR GEOMETRICI AI HIDROGENERATOARELOR

5.1. Introducere

Capitolul de față prezintă elaborarea de către autor a unui algoritm de calcul a dimensiunilor geometrice pentru hidrogeneratoare.

Acest algoritm de dimensionare a hidrogeneratoarelor introduce un concept nou în dimensionarea acestora, având ca rezultat mărirea preciziei rezultatelor obținute și reducerea timpul destinat dimensionării hidrogeneratoarelor.

Autorul a sistematizat și apoi a optimizat procedura de determinare a dimensiunilor geometrice pentru hidrogeneratoare, a conceput un algoritm de calcul și a scris programul în limbajul Visual Basic.

În cadrul acestui algoritm, optimizarea dimensiunilor geometrice ale generatorului s-a realizat după curentul nominal stator.

Se prezintă, algoritmul utilizat în elaborarea programului de către autor, interfețele acestuia și rezultatele obținute.

Datele geometrice obținute servesc ca bază pentru dimensionarea din punct de vedere electromagnetic al hidrogeneratorului.

5.2. Elaborarea algoritmului de calcul pentru parametri geometrici ai hidrogeneratorului

Dimensionarea hidrogeneratoarelor implică un volum mare de calcule atât din punct de vedere geometric cât și din punct de vedere electromagnetic [108].

Pe baza experienței din practică a autorului în studiul, proiectarea și mentenanța hidrogeneratoarelor în cadrul SC UCM Reșița SA, acesta a elaborat un algoritm de calcul original [111], cu precizarea că până la elaborarea algoritmului, calculul geometric al generatoarelor se realiza în special după tehnici empirice.

Algoritmul de calcul reprezintă o noutate în domeniul studiului hidrogeneratoarelor, conducând la dimensiuni optime și la un timp mai redus de obținere a acestora.

Având un grad de complexitate ridicat, algoritmul de calcul elaborat s-a realizat pe patru etape corelate între ele, datele rezultate dintr-o etapă de programare servind ca bază de intrare pentru următoarea etapă.

Implementarea algoritmului s-a realizat în limbajul de programare Visual Basic. S-a ales acest limbaj deoarece Visual Basic [55], este un limbaj ușor de utilizat.

Programul se bazează pe două categorii de date de intrare și anume:

- Date nominale.
- Date de proiectare.

Algoritmul de calcul

Algoritmul de calcul a fost structurat pe patru etape și anume:

- etapa I – determinarea datelor de proiectare generale;
- etapa II – calculul bobinajului stator;
- etapa III – calculul lungimilor generatorului;
- etapa IV – calculul polilor rotor, a bobinajului rotor și a înfășurării de amortizare

În elaborarea algoritmului s-a avut în vedere de către autor o dimensionare optimă în funcție de curentul stator pe o cale a creștăturii stator și respectiv alegerea corectă a conductoarelor de bobinaj stator și respectiv a izolației acestora.

Dimensiunile creștăturii stator influențează în mod direct diametrul statorului generatorului.

Aceasta implică alegerea optimă a dimensiunilor conductorului de cupru din care se realizează înfășurarea stator, alegerea izolațiilor la masă, respectiv la spiră în funcție de tensiunea generatorului.

La ora actuală izolațiile cele mai performante sunt cele impregnate cu rășini. Ca urmare a performanțelor izolațiilor, grosimile rezultate sunt mici pentru supratensiunile și supratemperaturile ce intervin în exploatare. Cercetările au fost efectuate utilizând izolații de proveniență ISOVOLTA Austria, unul dintre producătorii de top la nivel mondial.

Dimensionând corect creștătura se obține un generator fiabil, având un diametru minim, ceea ce implică un preț de cost scăzut.

Etapa I - Determinarea datelor de proiectare generale

Această etapă are ca bază datele de intrare generale: puterea la cupla generatorului P_c [kW], tensiunea nominală de alimentare U_n [kV], randamentul η , factorul de putere $\cos\varphi$, frecvența f [Hz], turația nominală n [rpm], numărul de căi de curent în paralel a , densitatea de curent estimată j [A/mm²], numărul de creștături pe pol și fază q , numărul de faze m .

Pe baza acestor date se determină datele de ieșire și anume: puterea la bornele generatorului P [kW], puterea aparentă S_n [kVA], curentul pe fază I_1 [A], curentul pe o cale I_{1a} [A], secțiunea necesară conductoarelor pentru bobinajul stator S_{nec} [mm²].

Datele de ieșire sunt calculate astfel:

- puterea la bornele generatorului:

$$P = P_c * \eta \quad [kW] \quad (5.1)$$

- puterea aparentă:

$$S_n = \frac{P}{\cos\varphi} \quad [kVA] \quad (5.2)$$

- curentul pe fază:

$$I_1 = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_n} \quad [A] \quad (5.3)$$

- în funcție de numărul căilor de curent, a , stabilite iterativ se calculează curentul pe o cale:

$$I_{1a} = \frac{I_1}{a} \quad [A] \quad (5.4)$$

- prin intermediul densității de curent estimate j , se determină secțiunea necesară pentru conductori:

$$S_{nec} = \frac{I_{1a}}{j} \quad [mm^2] \quad (5.5)$$

În situația în care datele de ieșire sunt corecte se trece la etapa a II a.

Etapa II - Calculul bobinajului stator

În această etapă se stabilesc și se determină, pe baza calculului din etapa I, datele pentru creștătura stator.

Se alege conductorul de bobinaj stator standardizat [146], respectiv grosimea izolației acestuia.

În funcție de acesta se determină numărul de conductoare elementare ale bobinajului stator, se dimensionează creștătura, recalculându-se densitatea de curent. Această densitate de curent recalculată se compară cu densitatea de curent estimată prin datele inițiale. Dacă cele două sunt egale sau aproximativ egale se trece la etapa a III a.

Dacă aceste densități diferă se alege alt conductor de bobinaj, calculul putând fi reluat pentru alte dimensiuni ale conductorului elementar.

Aceste date se determină astfel:

- pe baza secțiunii necesare, ținând cont de densitatea de curent, din tabele se alege conductorul de bobinaj standardizat, care are o grosimea „a”, lățimea „b” și secțiunea S_c .

Se calculează numărul de conductoare elementare necesare:

$$N_{ce} = \frac{S_{nec}}{S_c} \quad (5.6)$$

- densitatea de curent recalculată:

$$j = \frac{I_{1a}}{N_{ce} * S_c} \quad [A/mm^2] \quad (5.7)$$

Dacă această densitate are valoarea aproximativ egală cu cea estimată se dimensionează bobina astfel:

- lățimea intermediară a spirei bobinei:

$$B = 2 * b + 2 * g_1 \quad [mm] \quad (5.8)$$

unde g_1 - grosimea izolației la spiră în funcție de tensiunea de alimentare

- lățimea totală a bobinei:

$$B_c = B + 2 * g + c \quad [mm] \quad (5.9)$$

unde g - grosimea izolației la masă în funcție de tensiunea de alimentare

c - coeficient de abatere superioară

- înălțimea intermediară a spirei bobinei:

$$H = a * n_c + 2 * g_1 \quad [mm] \quad (5.10)$$

unde:

n_c - numărul de conductoare pe înălțime

- înălțimea totală a spirelor:

$$H_s = H * n_s + 2 * g + c \quad [mm] \quad (5.11)$$

unde n_s - numărul de spire.

Dimensiunile creștăturii sunt:

- lățimea totală a creștăturii:

$$B_{tot} = B_c + c_1 \quad [mm] \quad (5.12)$$

c_1 - coeficient (joc)

- înălțimea totală a creștăturii:

$$H_{tot} = a' + b' + c' + H_s + d' + H_s + e' + c_1 \quad [mm] \quad (5.13)$$

unde:

a' - coeficient care ține cont de înălțimea istmului;

b' – coeficient care ține cont de înălțimea penei;
 c' – coeficient care ține cont de distanța dintre spiră și pană;
 d' – coeficient care ține cont de distanța dintre spine;
 e' – coeficient care ține cont de distanța de la spiră până la fundul creștăturii;

Coeficienții se obțin din tabele.

Se verifică relația:

$$\frac{H_{tot}}{B_{tot}} = 4...7,5 \quad (5.14)$$

Etapă III – Calculul lungimilor generatorului

Având ca date de intrare înălțimea, h_{cv} , și lățimea, b_{cv} , canalului de ventilație stator, numărul de canele de ventilație n_{cv} , numărul de pachete elementare stator n_{pac} , lungimea pachetului l_{pac} și dimensiunea întrefierului minim δ_{min} , această etapă are ca obiectiv determinarea numărului de perechi de poli rotor, p , a numărului de creștături stator N_1 , a pasului creștăturii γ_1 , pasului dentar t_1 , realizând calculul diametrelor interior, D , și exterior, D_{e1} , stator și a lungimii statorului, l .

Numărul de poli este:

$$p = \frac{60 * f}{n} \quad (5.15)$$

Se alege numărul de creștături pe poli și fază, q , în funcție de standarde [70], [74], [146].

Cu acesta se calculează numărul de creștături stator:

$$N_1 = 2 * p * m * q \quad (5.16)$$

Pasul creștăturii este:

$$\gamma_1 = \beta * \gamma_\tau \quad (5.17)$$

cu:

$$\gamma_\tau = 3 * q \quad (5.18)$$

β - coeficient de umplere

Pasul dentar se obține cu:

$$t_1 = \frac{B_{tot}}{0,4} \quad [mm] \quad (5.19)$$

Diametrul interior în funcție de parametrii definiți mai sus este:

$$D = \frac{N_1 t_1}{\pi} \quad [mm] \quad (5.20)$$

În urma calculului pentru diametrul interior D se alege o valoare întregă cât mai apropiată de cea calculată.

Astfel, se recalculează pasul dentar:

$$t_1 = \frac{\pi * D}{N_1} \quad [mm] \quad (5.21)$$

Diametrul exterior stator se obține cu:

$$D_{e1} = D + 2 * \delta \quad [mm] \quad (5.22)$$

Întrefierul maxim este:

$$\delta = \delta_0 + \frac{\delta_0}{2} \quad [mm] \quad (5.23)$$

Iar lungimea statorului:

$$L = n_{pac} * l_{pac} + n_{cv} * b_{cv} \quad [mm] \quad (5.24)$$

În situația în care datele de ieșire sunt corecte se trece la etapa a IV a.

Etapa IV – Calculul polilor rotor, a bobinajului rotor și a înfășurării de amortizare

După definitivarea numărului de perechi de poli, se determină pasul polar τ , lățimea tălpii polului b_p , lungimea corpului polului l_k .

Pasul polar se determină cu ajutorul mărimilor prezentate mai sus și este:

$$\tau = \frac{\pi * D}{2p} \quad [mm] \quad (5.25)$$

Se pot determina cu ușurință și:

- lățimea tălpii polare:

$$b_p = c_2 * \tau \quad [mm] \quad (5.26)$$

unde c_2 – coeficient de scurtare

- lungimea corpului polului:

$$l_k = L - c_3 \quad [mm] \quad (5.27)$$

unde c_3 – coeficient care are valoarea cuprinsă între:

$$c_3 = (40 \div 50) [mm] \quad (5.28)$$

În funcție de alegerea numărului de conductoarele care formează bobinajul rotor (bobinaj de excitație), a dimensiunilor acestora adică a grosimii a_{ex} și a lățimii b_{ex} spirei de excitație, în această etapă se mai calculează dimensiunile polilor rotor, adică lungimea, l_p și înălțimea, h_p a tălpii polare, lățimea, b_k și înălțimea, h_k a corpului polului, respectiv lungimea spirei de excitație l_f .

Lungimea tălpii polare se obține cu:

$$l_p = L + 4 * \delta \quad [mm] \quad (5.29)$$

Înălțimea tălpii polare se alege în funcție de turația mașinii, având valoarea cuprinsă între:

$$h_p = (60 \div 80) \quad [mm] \quad (5.30)$$

Lățimea corpului polului este:

$$b_k = b_p - 2 * b_{ex} \quad [mm] \quad (5.31)$$

Pentru determinarea înălțimii corpului polului, din tabele se alege conductorul standardizat al bobinajului rotor, care are o grosimea „ a_{ex} ”, lățimea „ b_{ex} ” și secțiunea S_c alegându-se numărul de conductoare de bobinaj $n_{con,ex}$ și grosimea plăcilor de strângere g_{ps} , grosime care se alege din următorul șir de valori:

$$g_{ps} = (6 \div 10) \quad [mm] \quad (5.32)$$

Cu aceste date înălțimea corpului polului se calculează astfel:

$$h_k = (n_{cond,ex} + 0.5) * b_{ex} + n_{iz} * g_{iz} + 2 * g_{ps} + c_4 \quad (5.33)$$

unde:

n_{iz} – numărul de izolații între conductoarele de bobinaj care se determină cu relația:

$$n_{iz} = n_{cond,ex} - 1 \quad (5.34)$$

g_{iz} – grosimea izolației care are o valoare standardizată, cuprinsă în următorul șir de valori:

$$g_{iz} = (0.1 \div 0.5) \quad [mm] \quad (5.35)$$

c_4 – abaterea admisă pentru construcția bobinajului

Lungimea spirei bobinajului de excitație este:

$$l_f = 2l_k + 2b_k + 4b_{ex} \quad [mm] \quad (5.36)$$

68 Algoritm pentru determinarea parametrilor geometrici ai hidrogenatoarelor- 5

Stabilindu-se dimensiunile tălpii polare se execută și un calcul pentru dimensionarea înfășurării de amortizare, determinându-se numărul de bare de amortizare ND , pasul creștăturii de amortizare t_D , diametrul barei de amortizare d_D , diametrul creștăturii bobinajului de amortizare D_{CD} și lungimea barei de amortizare l_D .

Numărul barelor de amortizare:

$$ND = 2q \pm 2 \quad (5.37)$$

pentru q – număr întreg

Pasul creștăturii bobinajului de amortizare :

$$t_D = \frac{2q}{2q \pm 2} t_1 \quad [mm] \quad (5.38)$$

Lățimea (b_{SD}) și înălțimea (h_{SD}) istmului creștăturii bobinajului de amortizare au valori standardizate și se aleg în funcție de tensiunea nominală stator.

Diametrul barei de amortizare:

$$d_D = c_5 * \sqrt{t_D^2} \quad [mm] \quad (5.39)$$

unde c_5 – coeficient de calcul.

Diametrul creștăturii bobinajului de amortizare:

$$D_{CD} = d_D + c_6 \quad [mm] \quad (5.40)$$

c_6 – coeficient care ține seama de jocul barei de amortizare în creștătură.

Lungimea barei de amortizare:

$$l_D = l_k + c_7 \tau \quad [mm] \quad (5.41)$$

c_7 – coeficient de scurtare a pasului polar.

Schema logică a algoritmului este prezentată în figura 5.1.

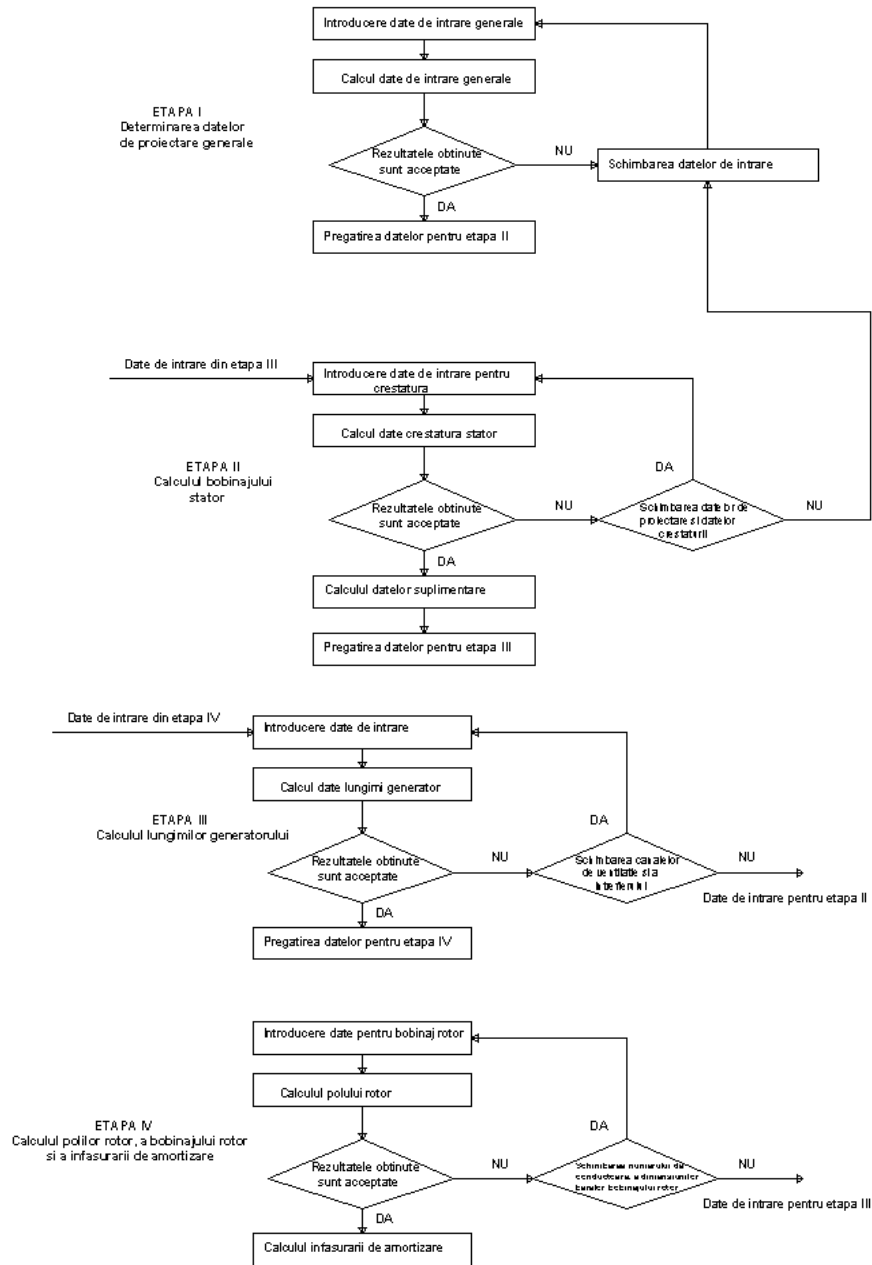


Fig. 5.1. Schema logică a algoritmului elaborat

Prezentarea programului

Programul elaborat de către autor are o interfață prietenoasă, făcându-l ușor de utilizat și care, pe lângă calculul dimensiunilor generatorului, realizează și un calcul exact al crestăturii stator, respectiv al înfășurării stator [113].

Meniul programului este structurat pe trei submeniuri și anume:

70 Algoritm pentru determinarea parametrilor geometrici ai hidrogenatoarelor- 5

- fișier
- date
- calcul

Aceste submeniuri sunt ilustrate în figurile 5.2, 5.3, 5.4.

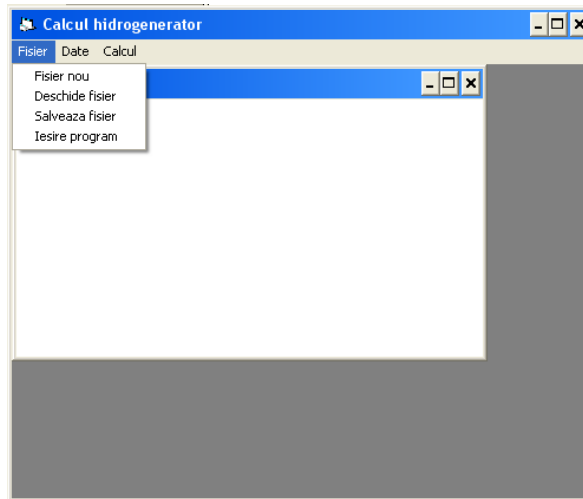


Fig. 5.2. Submeniul „Fișier”

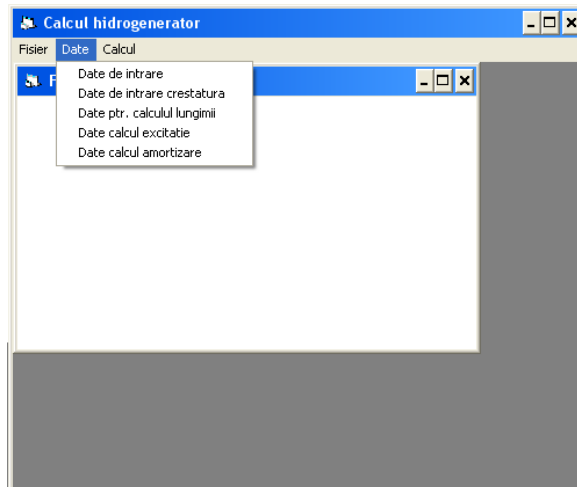


Fig. 5.3. Submeniul „Date”

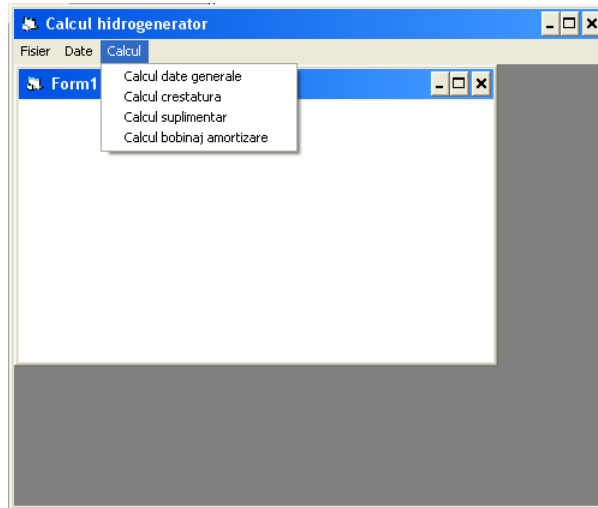


Fig. 5.4. Submeniul „Calcul”

În lucrare programul ilustrează efectuarea calculului hidrogenatorului pentru Middle Kolab India, cu următoarele caracteristici tehnice:

- puterea aparentă $S_n = 14710$ kVA;
- tensiunea nominală $U_n = 11$ kV;
- factorul de putere $\cos \varphi = 0,85$;
- turația nominală a generatorului $n = 250$ rpm;
- frecvența de alimentare $f = 50$ Hz.

Aceste caracteristici tehnice reprezintă datele de intrare ale programului. Aceste date sunt introduse în program astfel (figura 5.5):

Date de intrare generale	
Puterea la cupla Pc[kW]	13260
Tensiunea Un [kV]	11
Randamentul	0.971
Factor de putere	0.85
Frecventa [Hz]	50
Turatia nominala n [rpm]	250
Nr. cai de curent in paralel a	1
Densitatea de curent estimata j [A/mm2]	2.75
Nr. crestaturi pe pol si faza q	3
Nr. de faze m	3

OK

Fig.5.5. Introducerea datelor în program

Programul calculează datele de proiectare inițiale, aceste date fiind ilustrate în figura 5.6:

72 Algoritm pentru determinarea parametrilor geometrici ai hidrogeneratoarelor- 5

Calcul hidrogenerator - [Form4]
Fisier Date Calcul

Date de iesire generale

Puterea calculata [kW]	12875,46
Puterea aparenta [kVA]	14708,3196
Curentul pe faza [A]	772,009
Curentul pe o cale [A]	772,009
Sectiunea necesara [mm2]	280,730

Abandon

Fig.5.6. Calculul datelor inițiale în program
Pentru calculul bobinajului stator se folosesc următoarele date, ilustrate în figura 5.7:

Calcul hidrogenerator - [Form5]
Fisier Date Calcul

Date de intrare ptr. crestatura

Alegerea dimensiunilor conductorului elementar

Grosimea a [mm]	<input type="text" value="2.24"/>
Latimea b [mm]	<input type="text" value="7.1"/>
Sectiunea S [mm2]	<input type="text" value="15.54"/>

Izolatie aplicata conductorului elementar 0.35 x 0.35

Izolatiile aplicate crestaturii [mm]

Izolatie e1 [mm] (0.2-0.35)	<input type="text" value="0.2"/>
Istm a' (0.5-1)	<input type="text" value="0.5"/>
Pana b' (6.5-8)	<input type="text" value="6.5"/>
Sub pana c' (2-2.5)	<input type="text" value="2"/>
Intre bare d' (3-4)	<input type="text" value="3"/>
La fund e' (2-2.5)	<input type="text" value="2"/>
Grosimea unilaterala a izolatiei	<input type="text" value="2.7"/>

Ptr. U=6.3 kV u=2 mm
Ptr. U=10.5 kV u=3 mm

OK

Fig. 5.7. Date de intrare pentru bobinajul stator
Programul elaborat calculează crestătura stator, datele obținute în urma acestui calcul fiind ilustrate de figura 5.8.:

Calcul hidrogenerator - [Form6]

Fisier Date Calcul

Calcul crestatura

Nr. de cond. elem. in paralel Nce calculati 6,00

Nr. de cond. elem. in paralel Nce alesi

Densitatea de crt. recalculata j [A/mm2] 2,75

Noile dimensiuni ale conductorului cu izolatie

a1 [mm] 2,59

b1 [mm] 7,45

Latimea initiala B0 [mm] 14,889

Inaltimea initiala H0 [mm] 7,65

Latimea intermediara B [mm] 16,155

Inaltime intermediara H [mm] 8,955

Latimea totala Btot [mm] 21,55

Inaltime totala Htot [mm] 50,405

OK

Fig. 5.8. Calculul crestăturii stator

Aceste date preliminare sunt introduse în cel de-al doilea program de calcul care realizează o dimensionare din punct de vedere electromagnetic al generatorului.

Totodată prin intermediul programului elaborat s-a creat o bază de date puternică care permite realizarea, în funcție de puterea aparentă, tensiunea de alimentare a bobinajului stator și în funcție de turația hidrogeneratoarelor, a unui studiu comparativ între diverse hidrogeneratoare.

5.3. Verificarea generatorului din punct de vedere electromagnetic

Verificarea generatorului din punct de vedere electromagnetic [108] se face pe baza calculului de dimensionare elaborat de către autor, rezultatele obținute fiind introduse în cel de-al doilea program de calcul.

În figura 5.9 sunt redate rezultatele obținute din programul elaborat de autor, care constituie date de intrare în cel de-al doilea program.

74 Algoritm pentru determinarea parametrilor geometrici ai hidrogeneratoarelor- 5

```

Date de intrare :
-----
ICONST = 3          Sn = 14710.0 [ kVA ]
ICNX = 1            Pn = .0 [ kW ]
IFB = 1             rand = .000 [ % ]
ITS = 107          Un = 11.00 [ kV ]
ITR = 3            cfi = .850 [ -- ]
IMBI = 11          n = 250.00 [ r/min ]
IDEC = 0           p = 12.0 [ -- ]
                  F = 50.00 [ Hz ]
                  KFe1 = .93 [ -- ]
                  KFe2 = .97 [ -- ]
                  ROI = .00 [ -- ]
                  xasi = .0000 [ p.u. ]

STATOR
-----
De1 = 4200.0 [ mm ]  de10 = 20.00 [ mm ]
D = 3700.0 [ mm ]   de1M = 30.00 [ mm ]
l = 900.0 [ mm ]    zn1 = 4.0 [ -- ]
N1 = 216.0 [ -- ]   a = 1.0 [ -- ]
bc1 = 22.00 [ mm ] y1 = 8.0 [ -- ]
hc1 = 50.00 [ mm ] lb1 = 2150.0 [ mm ]
nv = 20.0 [ -- ]   h1 = 47.42 [ mm ]
bv = 8.00 [ mm ]   h11 = 5.00 [ mm ]
at = 18.00 [ mm ]  h2 = 9.00 [ mm ]
ct = 18.00 [ mm ]  qcu1 = 279.7 [ mmp ]
dbc1 = .20 [ mm ]
hfix = 10.00 [ mm ]

ROTOR
-----
lp = 980.0 [ mm ]   wf = 58.0 [ -- ]
lk = 850.0 [ mm ]   Tf = 2636.0 [ mm ]
ls = 120.00 [ mm ]  Qf = 164.0 [ mmp ]
bp = 340.00 [ mm ]  be = 90.00 [ mm ]
hp = 50.00 [ mm ]   ND = 8.0 [ -- ]
bk = 240.00 [ mm ]  tD = 40.40 [ mm ]
hk = 270.00 [ mm ]  bsD = 2.00 [ mm ]
hk1 = 249.70 [ mm ] hsD = 2.00 [ mm ]
hk2 = 10.00 [ mm ]  DD = 16.00 [ mm ]
qk = .0000 [ mp ]   DCD = 16.30 [ mm ] (hd)
hj2 = 300.00 [ mm ] lD = 1000.0 [ mm ]
                  QI = 925.0 [ mmp ]
    
```

Fig.5.9. Date de intrare pentru calculul electromagnetic al generatorului

În figura 5.10 sunt prezentate unele din rezultatele obținute din punct de vedere electromagnetic, la diferite tensiuni de alimentare a statorului.

```

SOLICITARI MAGNETICE LA MERS IN GOL
-----
Un [ pu ] .500 .750 1.000 1.300 1.450
FI1 [ wb ] .105021 .157531 .210041 .273054 .304560
FI [ wb ] .106011 .159017 .212023 .275629 .307433
Bde1 [ T ] .35278 .52917 .70556 .91723 1.02306
Fde1 [ Asp ] 12134.9 18202.3 24269.8 31550.7 35191.2
Bzvf [ T ] .80065 1.20098 1.60131 2.08170 2.32190
Bzm [ T ] .75731 1.13597 1.51463 1.96901 2.19621
Bzb [ T ] .71842 1.07763 1.43684 1.86790 2.08343
Fz1 [ Asp ] 30.0 82.1 659.4 5377.0 14670.4
Bj1 [ T ] .63865 .95797 1.27729 1.66048 1.85207
Fj1 [ Asp ] 54.7 120.7 240.9 1434.2 3378.0
Fjsk [ wb ] .035714 .053793 .073565 .112121 .155604
sigk [ - ] 1.33689 1.33828 1.34697 1.40678 1.50614
sigp [ - ] 1.14378 1.14437 1.14808 1.17361 1.21601
Bk [ T ] .66764 1.00250 1.34533 1.82660 2.18125
Bp [ T ] .57120 .85724 1.14669 1.52384 1.76108
Bmed [ T ] .64353 .96618 1.29567 1.75091 2.07621
Fpk [ Asp ] 318.6 572.3 940.8 4512.3 17960.0
Bz2 [ T ] .51292 .76937 1.02583 1.33358 1.48746
Fz2 [ Asp ] 15.2 27.7 41.3 69.7 104.8
Bj2 [ T ] .25009 .37552 .50395 .68422 .81708
Fj2 [ Asp ] 31.2 94.9 160.1 253.0 326.0
F2 [ Asp ] 698.8 1196.1 1814.8 5748.3 19481.3
FF0 [ Asp ] 12918.4 19601.2 26984.9 44110.2 72720.9
    
```

Fig.5.10. Calcul electromagnetic al generatorului
Acele solicitări trebuie să se încadreze între anumite limite [146].

În urma calculelor de dimensionare, au rezultat datele prezentate în figura 5.11:

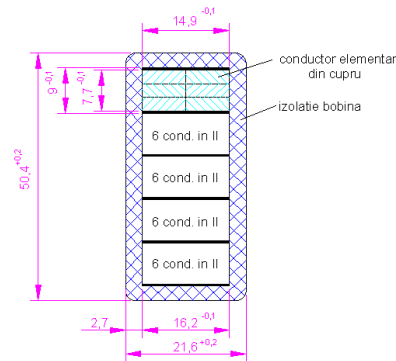


Fig.5.11. Înfășurare stator (bobină stator)

Generatorul rezultat în urma calculelor a fost executat și expedit beneficiarului, funcționând corect până în prezent.

5.4. Concluzii

S-a realizat algoritmul de calcul pentru optimizarea dimensiunilor geometrice ale generatorului, după curentul nominal stator.

Având un grad de complexitate ridicat, algoritmul de calcul elaborat s-a realizat pe patru etape corelate între ele, datele rezultate dintr-o etapă de programare servind ca bază de intrare pentru următoarea etapă.

În elaborarea algoritmului, o importanță deosebită prezintă dimensionarea creștăturii stator respectiv dimensionarea izolației bobinei stator, deoarece acestea condiționează esențial diametrul statorului.

Algoritmul elaborat este stabil deoarece elimină erorile apărute în proiectare.

Algoritmul de calcul reprezintă o noutate în domeniul studiului hidrogenatoarelor, conducând la dimensiuni optime.

Implementarea algoritmului s-a realizat în limbajul de programare Visual Basic.

S-a optimizat operarea programului nominalizat mai sus prin crearea unei interfețe prietenoase cu utilizatorul.

S-a creat o bază de date puternică care permite realizarea, în funcție de puterea aparentă, tensiunea de alimentare a bobinajului stator și în funcție de turația hidrogenatoarelor, a unui studiu comparativ între diverse hidrogenatoare.

Rezultatele obținute utilizând algoritmul prezentat sunt folosite în cel de-al doilea program, cu care se verifică generatorul din punct de vedere electromagnetic.

Realizarea algoritmului de calcul pentru determinarea dimensiunilor geometrice ale generatorului reduce timpul destinat proiectării acestuia.

Prin elaborarea algoritmului se obține o dimensionare optimă a generatorului, respectiv a înfășurării bobinajului stator, ceea ce implică un consum minim de material, manoperă și totodată un preț de cost redus.

6. SISTEM DE MONITORIZARE A STĂRII IZOLAȚIEI

6.1. Introducere

Acest capitol, în totalitate original, are ca scop prezentarea unui sistem de monitorizare a stării izolației.

Sistemul de monitorizare conține ca elemente esențiale două subsisteme și anume: un subsistem de achiziție date și un subsistem care are ca bază logica fuzzy destinat reglării temperaturii.

În cadrul sistemului de achiziție a datelor mărimilor de interes referitoare la izolația bobinelor, s-a elaborat un program în limbajul grafic LabView, program ce permite monitorizarea stării curente a izolației hidrogenatorului.

Sistemul fuzzy are ca scop îmbunătățirea condițiilor de funcționare a hidrogenatorului, intervenindu-se asupra temperaturii la care lucrează bobinajul stator.

6.2. Sistem de monitorizare a stării izolației

Diagnosticarea defectelor poate fi realizată prin diverse metode dintre care cele mai importante sunt [91], [99]:

- metode de diagnoză bazate pe modele analitice
- metode utilizând logica fuzzy
- metode bazate pe modele de rețele neuronale
- metode bazate pe sisteme expert
- metode bazate pe analiza vectorială a mașinilor electrice
- metode bazate pe analiza descărcărilor parțiale în izolații
- metode bazate pe monitorizarea fluxului magnetic în mașina electrică

Autorul a conceput un sistem de monitorizare a stării izolației necesar pentru a preveni avarierea hidrogenatorului ca urmare a distrugerii izolației în timpul funcționării acestuia.

Schema bloc propusă pentru acest sistem este prezentată în figura 6.1.

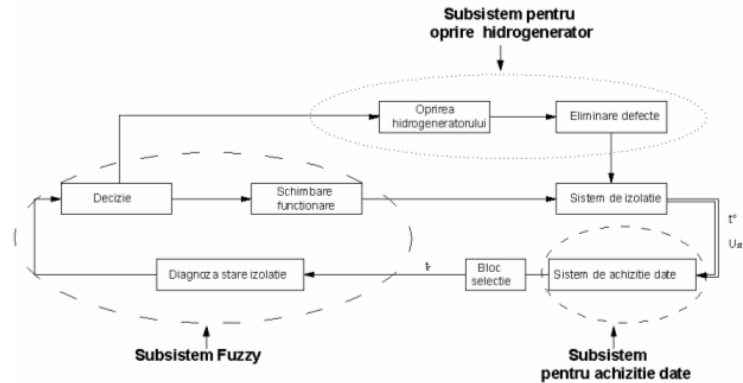


Figura 6.1. Sistem de monitorizare stare izolație

Se urmărește monitorizarea sistemului bobinajului stator. În acest scop, prin intermediul sistemului de achiziție sunt culese și stocate valorile temperaturii bobinelor stator precum și tensiunea acestora.

Prin intermediul blocului de selecție se stabilește, printr-un algoritm adecvat temperatura de reacție t_r , pentru sistemul fuzzy, care este temperatura cea mai mare a bobinelor stator.

Prin sistemul fuzzy se decide dacă se intervine asupra hidrogenatorului în sensul modificării (micșorării) temperaturii bobinajului, sau dacă acest lucru nu este posibil se decide oprirea hidrogenatorului.

Dacă se decide modificarea temperaturii bobinajului statoric, regulatorul fuzzy din cadrul sistemului fuzzy furnizează la ieșire valoarea mărimii de comandă pentru elementul de execuție, ventilatorul (turbosuflantă).

6.2.1. Subsistem pentru achiziție de date

Schema bloc a ansamblului platformă de producție – sistem de achiziție de date este prezentată în figura 6.2

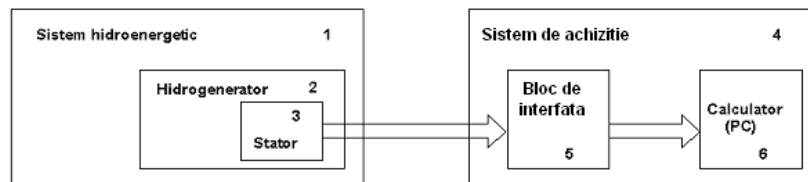


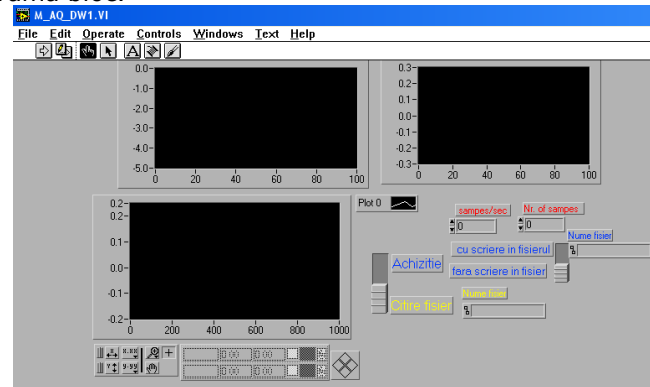
Figura 6.2. Schema bloc a ansamblului platformă de producție – sistem de achiziție de date

Platforma de producție este reprezentată prin sistemul hidroelectric 1, hidrogenatorul 2 constituind un subsistem al acestuia. Componenta direct vizată pentru monitorizare este statorul hidrogenatorului.

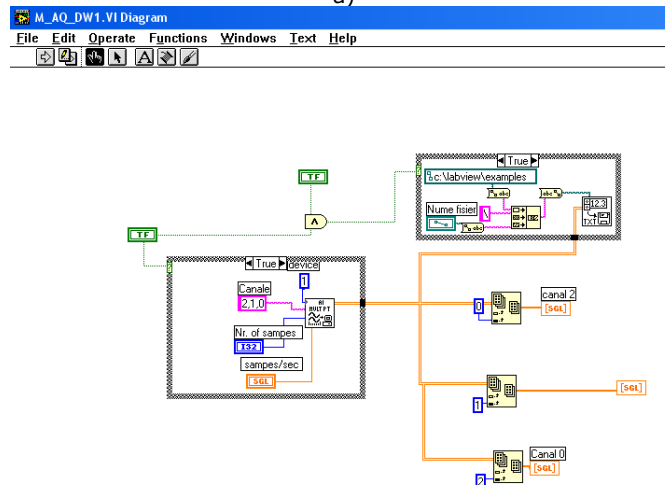
Pentru unii dintre parametrii statorului monitorizarea este posibilă (de ex.: temperatura în diverse puncte, tensiunea de lucru) [82], alții însă nu pot fi cunoscuți permanent (de ex.: grosimea izolației la fiecare bobină) ci doar în momentele când mașina este în revizie [43].

Sistemul de achiziție de date, 4, permite culegerea și stocarea continuă a parametrilor ce pot fi măsurați direct și continuu [97], [98].

În figura 6.3 este prezentat programul (M-AQ-DW1.VI) conceput, realizat și testat pentru achiziția de date din stator [104]. Programul este de tip grafic, realizat în LabView și are două componente interdependente figura 6.3.a - Panoul frontal și figura 6.3.b - Diagrama bloc.



a)



b)

Figura 6.3 Program pentru achiziția de date a mărimilor de interes:
a) Panou frontal; b) Diagrama bloc

Din diagrama bloc se constată că programul a fost conceput pentru analiza simultană a datelor în simplă precizie, pe 3 canale, notate canal 0, canal 1 și canal 2.

De la panoul frontal al blocului DI Mult PI (prezentat în figura 6.3) se alege de către operator numărul total de eșantioane achiziționate, precum și numărul de eșantioane achiziționate în unitatea de timp.

Precizia și viteza de eșantionare sunt condiționate în primul rând de placa de achiziție utilizată. S-a utilizat o placă de achiziție de tip NI LabPC+.

Placa s-a dovedit adecvată scopului propus și anume monitorizării temperaturii izolației precum și a tensiunii și curentului în stator.

Din observarea panoului frontal se constată că mărimile achiziționate pot fi vizualizate fiecare pe câte un aparat de tip plotter, în același timp, ele putând fi memorate sau nu într-un fișier (prin selecțiile „achiziție cu scriere în fișier” respectiv „achiziție fără scriere în fișier”).

Mărimile achiziționate pot fi citite ulterior oricând din fișierul în care au fost memorate („citire fișier”).

O altă problemă care a trebuit rezolvată a constat în transmiterea datelor din fișier către alt periferic al PC-ului în care a fost realizată achiziția. În acest scop a fost conceput, realizat și testat programul numit D_EX_D2K.VI al cărui panou frontal este dat în figura 6.4. a, iar digrama bloc asociată în figura 6.4. b.

Prin acest program [105] datele achiziționate în fișierul inițial pot fi transmise într-un alt fișier prin butonul „Generare semnal către fișier”. Transmiterea se poate face spre exterior, prin portul paralel al PC-ului, fie într-un alt fișier din PC.

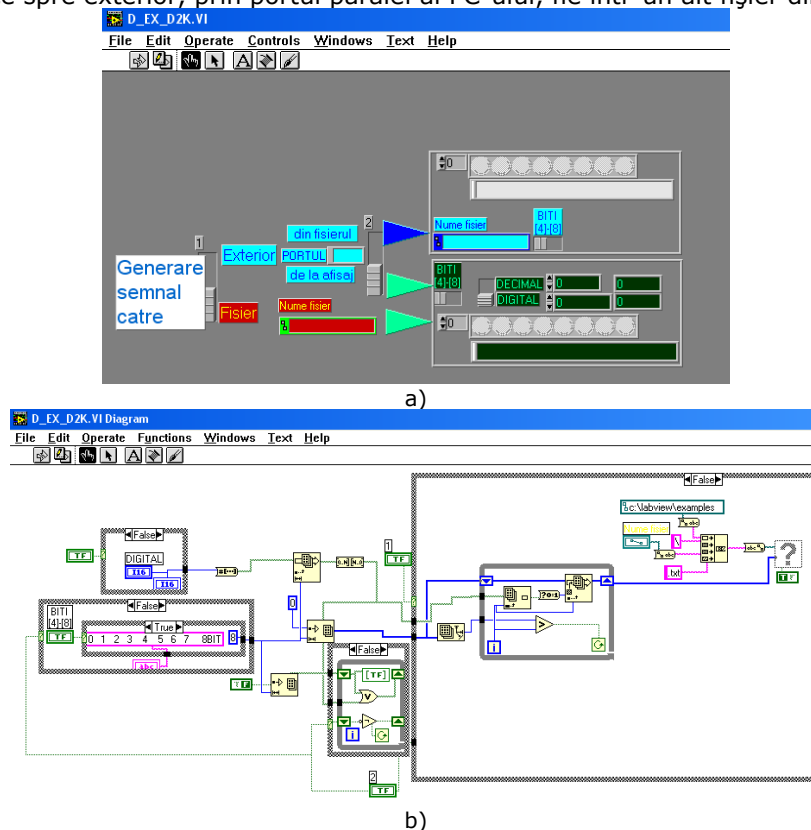


Figura 6.4 Program de transmitere date între sistemul de achiziție și sistemul de monitorizare:

a) Panou frontal; b) Diagrama bloc

6.2.2. Subsistemul fuzzy

Metodele bazate pe logica fuzzy [35], [36] nu au algoritmi foarte clari precizați, ele făcând apel, în mare măsură la experiența specialistului în domeniu. Pentru problematica în discuție [37], [38] s-a apelat la construirea unei baze de date constituită din informațiile culese de-a lungul timpului în procesul de testare al generatoarelor, în exploatarea acestora și cu ocazia reviziilor acestora. Diagnosticarea defectelor [91] se face prin corelarea experienței specialiștilor cu informațiile din baza de date. Ca rezultat se obține decizia prin care se diagnostichează starea izolației generatorului.

Pe baza figurii 6.1 se poate adopta una din cele două categorii de decizii:

- generarea setului de comenzi prin subsistemul de decizie pentru funcționarea în condiții de siguranță a generatorului
- oprirea hidrogenatorului în vederea remedierii defectelor constatate; având în vedere că nu au avut loc defecte majore (oprirea agregatului) se estimează că acestea se remediază rapid și fără costuri mari.

În mod concret, sistemul fuzzy conceput de autor pentru diagnoză, evaluare și decizie [107] în cazul sistemului de izolație al hidrogenatorului este prezentat în figura 6.7.

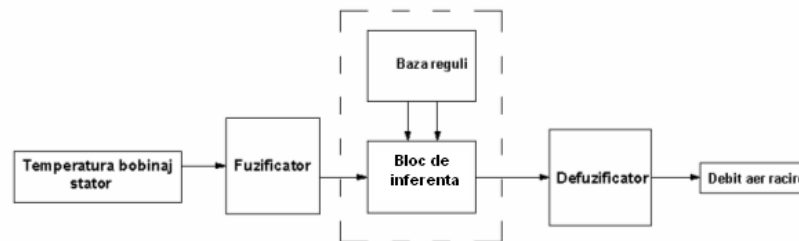


Figura 6.7. Sistem fuzzy

Se constată că, din proces se preia setul de temperaturi din stator iar parametrul controlat va fi debitul aerului de răcire pentru bobinajul stator. În continuare prin acest debit de aer se modifică temperatura statorului.

Pentru controlul debitului de aer s-au conceput și analizat mai multe variante pentru sistemul de reglare prin intermediul mediului specializat de simulare MATLAB/SIMULINK.

6.2.2.1. Sistem fuzzy de reglare a debitului de aer

Se urmărește reglarea temperaturii, t° , a bobinajului stator prin modificarea debitului de aer al unui ventilator folosind un controler fuzzy.

Controlerul are ca mărimi de intrare eroarea de temperatură prescrisă și derivata acestei erori.

În cadrul sistemului, controlerul a fost conceput cu doi ascendenți și un consecvent, cu funcții de apartenență de tip triunghiular și trapezoidal. Defuzificatorul este de tip centroid. Elementul de execuție este ventilatorul.

Implementarea și simularea sistemului de conducere pentru debitul de aer cu controler fuzzy s-a realizat în MATLAB/SIMULINK.

În tabelul 6.1 se prezintă tabela de decizie (inferență) pentru cazul studiat.

Tabel 6.1

debit-aer		Eroarea (p)				
		p1	p2	p3	p4	p5
Derivata erorii (dp)	dp1	c1	c 1	c 1	c 2	c 2
	dp2	c 1	c 2	c 2	c 2	c 3
	dp3	c 1	c 2	c 4	c 4	c 4
	dp4	c 2	c 2	c 4	c 4	c 5
	dp5	c 2	c 3	c 4	c 5	c 5

În cazul studiat termenii lingvistici folosiți sunt:

- pentru eroare: p1, p2, p3, p4, p5, iar funcțiile de apartenență atașate sunt redate în figura 6.8

- pentru derivata erorii: dp1, dp2, dp3, dp4, dp5, iar funcțiile de apartenență atașate sunt redată în figura 6.9
- pentru debitul aerului: c1, c2, c3, c4, c5, iar funcțiile de apartenență atașate sunt redată în figura 6.10

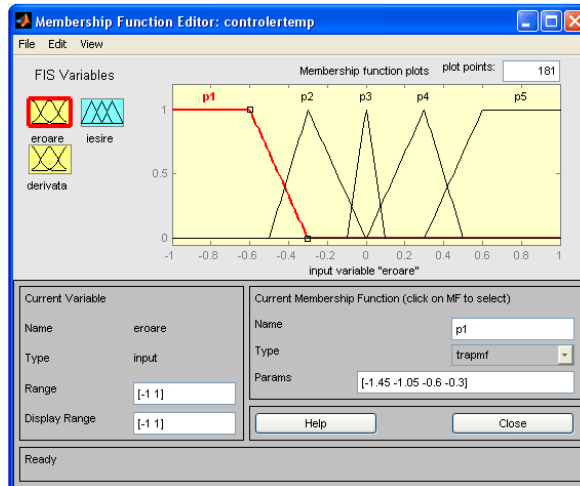


Figura 6.8. Funcțiile de apartenență pentru eroarea temperaturii

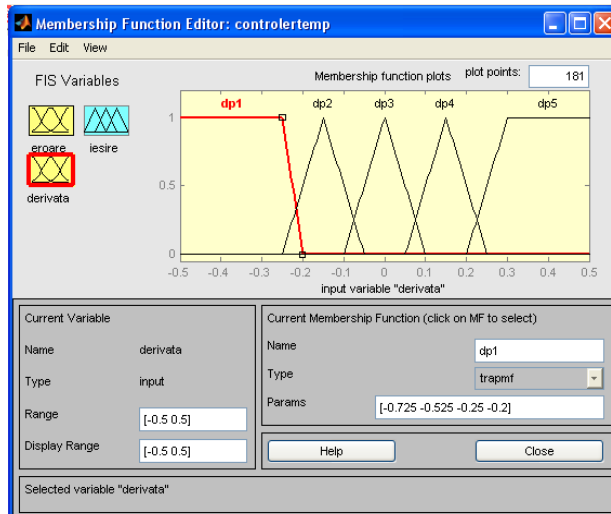


Figura 6.9. Funcțiile de apartenență pentru derivata erorii temperaturii

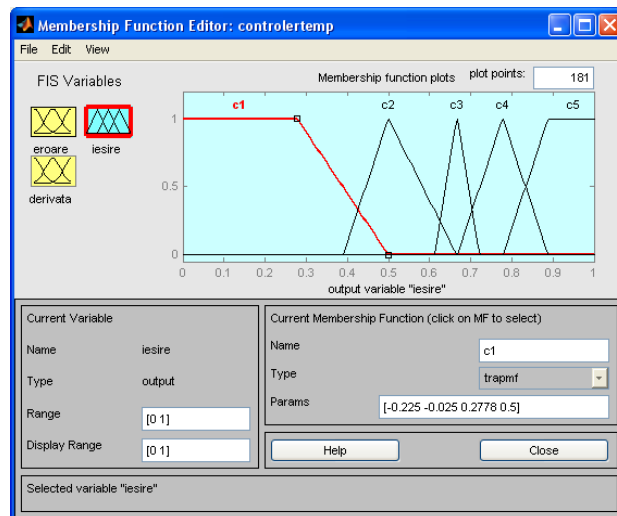


Figura 6.9. Funcțiile de apartenență pentru ieșire

În figura 6.10 se prezintă suprafața de control a elementelor ce caracterizează calitatea modelului identificat funcție de eroarea și derivata erorii temperaturii.

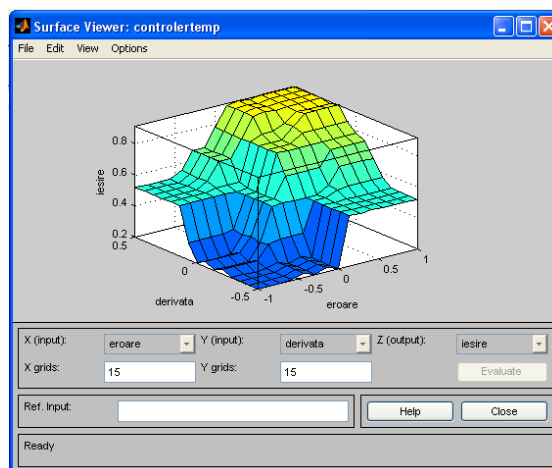


Figura 6.10. Suprafața de control a elementelor ce caracterizează calitatea modelului identificat funcție de eroarea și derivata erorii temperaturii

Controlerul fuzzy implementat a fost introdus în sistemul de reglare prezentat în figura 6.11.

Se constată că la intrarea controlerului sunt aduse eroarea de temperatură (Discrete Filter) și derivata erorii de temperatură (Discrete Filter1).

Domeniul temperaturii de lucru al bobinajului stator s-a considerat ca fiind cuprins între 20°C și 120°C. Acestui domeniu i s-a asociat un domeniu liniar continuu având valori de la 0 la 1, valoarea 0 fiind asociată temperaturii minime, iar valoarea 1 temperaturii maxime.

Eroarea din ieșirea blocului sumator apare ca urmare a diferenței dintre temperatura prescrisă (Step) și temperatura măsurată în bobinajul stator.

La ieșirea controlerului se obține mărimea de comandă pentru elementul de execuție, modelat ca un element de tip PT1 (Transfer Fcn1), care este un grup de turbosuflante (ventilatorul).

Procesul constituit din bobinajul stator în care se dorește menținerea temperaturii prescrise este modelat, de asemenea, ca un element de tip PT1 (Transfer Fcn).

În figura 6.11 se consideră că asupra procesului acționează o perturbație de tip treaptă (Step1) iar în figura 6.12 sunt prezentate formele de undă în punctele de interes.

În sistemul real perturbația este reprezentată de variația tensiunii de alimentare stator. Creșterea acesteia determină creșterea curentului prin bobinaj și implicit creșterea temperaturii bobinajului stator.

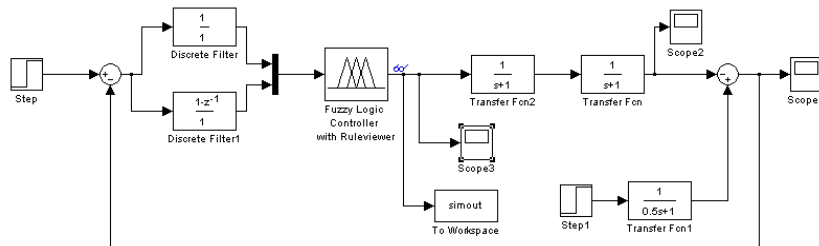


Figura 6.11. Modelul Simulink al sistemului de reglare cu reacție unitară cu perturbație

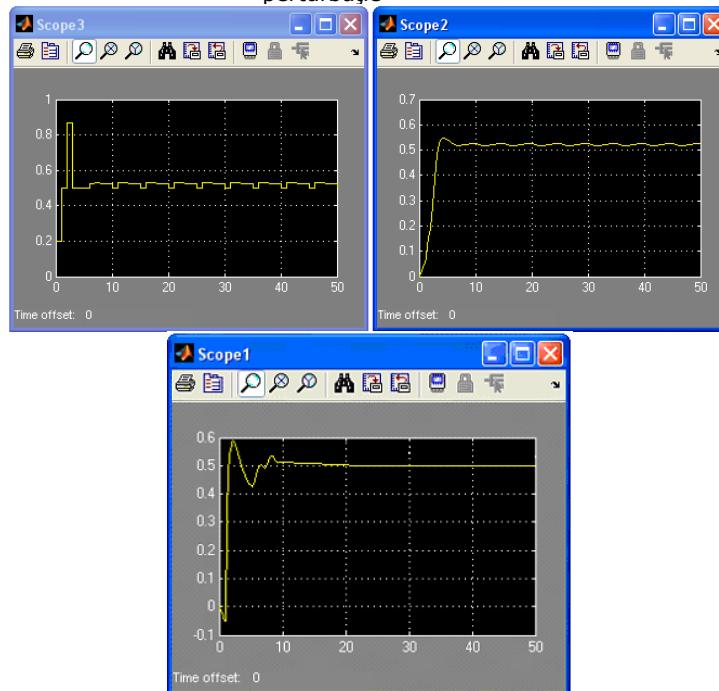


Figura 6.12. Formele de undă ale semnalului pentru sistemul de reglare cu reacție unitară cu perturbație treaptă

Din figura 6.12 se constată că mărimea de la ieșire are o ușoară variație în jurul valorii de echilibru.

S-a studiat și comportarea sistemului în cazul în care perturbația acționează atât asupra procesului cât și asupra regulatorului fuzzy (figura 6.13, figura 6.14).

În acest caz regulatorul fuzzy a fost conceput cu trei ascendenți și un consecvent, cu funcții de apartenență de tip triunghiular și trapezoidal.

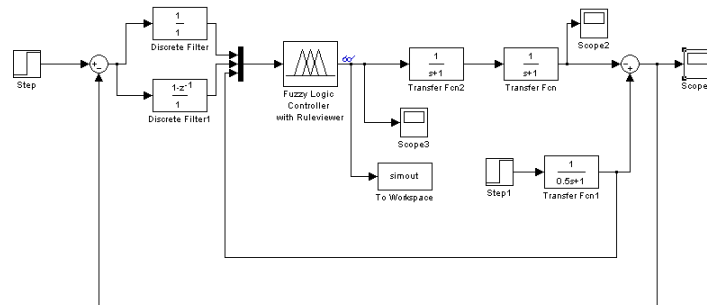


Figura 6.13. Modelul Simulink al sistemului de reglare cu reacție unitară cu perturbație atât asupra procesului cât și a regulatorului fuzzy

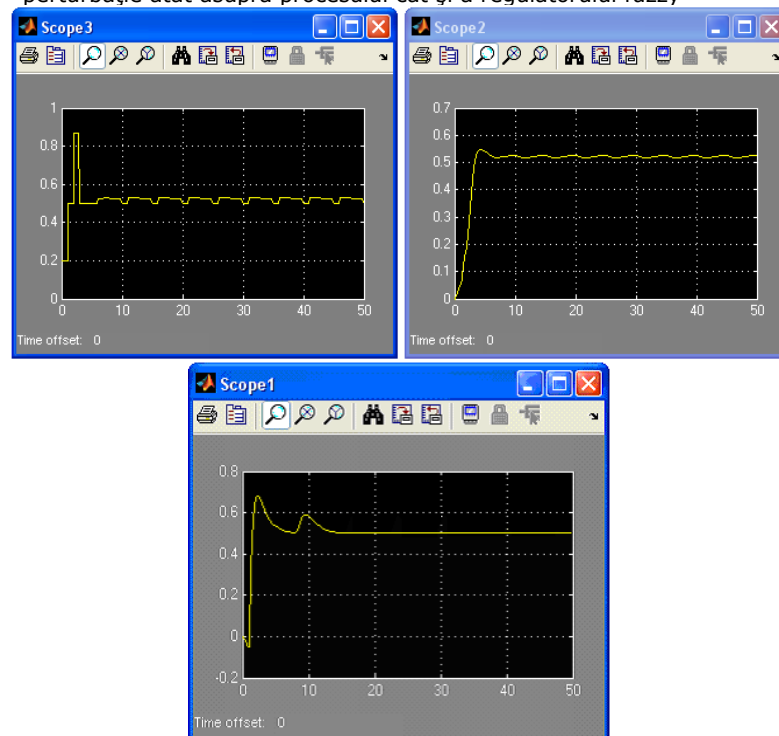


Figura 6.14. Formele de undă ale semnalului pentru sistemul de reglare cu reacție unitară cu perturbație atât asupra procesului cât și a regulatorului fuzzy

Din analiza comparativă a formelor de undă obținute se constată că, calitatea reglării este mai slabă decât în cazul în care perturbația acționează doar asupra procesului. Acest fapt este relevat de evoluția răspunsului în jurul valorii de echilibru cu o valoare ușor mai mare (figura 6.14).

Prin sistemul prezentat nu se urmărește și nu se realizează conducerea generatorului în mod normal ci el este conceput ca un sistem suplimentar de protecție al generatorului, justificat prin scăderea performanțelor în timp ale sistemului de izolație datorat îmbătrânirii și suprasarcinilor din exploatare.

În regim curent de funcționare, dacă se constată înrăutățirea parametrilor calității izolației, în scopul prevenirii apariției unui defect catastrofal, acest sistem va intra în funcțiune.

Efectul intrării în funcțiune al subsistemului prezentat se poate manifesta în următoarele direcții:

- dacă prin setul de comenzi rezultat în urma procesului de decizie parametrii curenți ai hidrogenatorului sunt modificați în limitele abaterilor nominale, se poate considera că intervenția sistemului de decizie este total transparentă

- dacă prin setul de comenzi rezultat în urma procesului de decizie parametrii curenți ai hidrogenatorului sunt modificați în afara limitelor abaterilor nominale, efectul este acela că are loc o înrăutățire sub aspect calitativ a performanțelor generatorului

- dacă prin setul de comenzi rezultat în urma procesului de decizie rezultă oprirea hidrogenatorului desigur că hidrogenatorul va fi scos din funcție o perioadă de timp pentru remedierea defectului dar, în același timp, s-a evitat apariția unui defect catastrofal cauzat de starea izolației.

6.3. Concluzii

Conceperea și realizarea unui sistem de monitorizare pentru determinarea stării izolației a dus la posibilitatea de a preveni distrugerea hidrogenatorului ca urmare a distrugerii izolației în timpul funcționării acestuia.

Deoarece acest sistem de monitorizare este un sistem complex el este privit ca având în componența sa două subsisteme și anume: sistemul de achiziție date și sistemul fuzzy.

Sistemul de achiziții de date permite achiziționarea mărimilor de interes din proces și totodată, prin intermediul acestuia, s-a creat o bază puternică de date pentru starea curentă a izolației hidrogenatorului.

Prin sistemul fuzzy prezentat nu se realizează conducerea generatorului, ci el este conceput ca un sistem suplimentar util în funcționarea generatorului.

În urma implementării în MATLAB/SIMULINK a sistemelor de reglare, se constată, pe baza analizei formelor de undă că:

- pentru sistemul de reglare cu perturbație treaptă se constată că mărimea de la ieșire are o ușoară variație în jurul valorii de echilibru.

- calitatea reglării este mai slabă în cazul în care perturbația acționează atât asupra procesului cât și asupra regulatorului fuzzy, decât în cazul în care perturbația acționează doar asupra procesului.

- controlerul fuzzy realizat este unul superior unuia clasic, asigurând o evoluție mai rapidă a mărimii reglate către valoarea staționară, cu amplitudinea oscilațiilor amortizate mai mici.

7. MODEL ON-LINE PENTRU ESTIMAREA CONTINUĂ A TIMPULUI DE VIAȚĂ AL IZOLAȚIEI BOBINAJULUI

7.1. Introducere

Deoarece defectele apărute la hidrogeneratoare se datorează în principal deteriorării izolației, autorul a elaborat un model on-line pentru estimarea duratei de viață a izolației.

În acest capitol, în totalitate original, s-a conceput un model pentru estimarea în orice moment a timpului de viață al izolației bobinajului stator.

Determinarea timpului de viață se face pe baza informațiilor culese în mod continuu din izolația bobinajului stator prin intermediul unui sistem de achiziții de date precum și a măsurărilor efectuate asupra acestuia, în special, în timpul reviziilor, programate sau neprogramate.

Informațiile culese se referă în mod concret la fiecare sistem de izolație individual de pe fiecare bobină stator.

Informațiile culese în mod continuu și care reflectă starea izolației din acel moment, sunt comparate cu valorile prognozate inițial, pe baza standardelor și a datelor de fabricație.

Diferențele apărute sunt cuantificate prin indici de corecție, care se aplică asupra estimării teoretice a timpului de viață, stabilit inițial.

Timpul de viață este estimat în valori raportate, adimensionale, considerându-se valoarea 1 la intrarea în exploatare a hidrogeneratorului și valoarea 0 la finalul duratei de viață T , inițial programată pentru hidrogenerator.

7.2. Model pentru estimarea duratei de viață a izolației bobinajului hidrogeneratorului

Durata de exploatare normală, T , a unui hidrogenerator este de ordinul a câtorva zeci de ani. În acest timp este inclus faptul că bobinajul hidrogeneratorului trebuie să funcționeze corect, în parametrii optimi și să nu se defecteze.

Se dorește estimarea permanentă a timpului de viață a izolației bobinajului, știindu-se că pe parcursul funcționării hidrogeneratorului pot apărea regimuri de funcționare necorespunzătoare ale acestuia, sau pot apărea defecte care pot duce la îmbătrânirea prematură a izolației, având ca și consecință scurtarea timpului de viață a acestuia la un timp T_1 :

$$T_1 < T \quad (7.1)$$

Parametrul principal pe baza căruia se estimează timpul de viață al izolației este tangenta unghiului de pierderi dielectrice $tg\delta$. Valoarea acestuia crește pe durata exploatării generatorului și se consideră că de la o anumită valoare în sus

probabilitatea de defectare a izolației fiind ridicată, izolația respectivă nu mai este acceptată a fi menținută în funcționare. Acest fapt este reglementat prin standarde [73], [146].

Pe parcursul exploatării normale a hidrogenatorului sunt programate revizii al căror număr este considerat a fi p , dar există și revizii și reparații neprogramate datorate, în principal, defectării altor subansamble ale hidrogenatorului, unor erori în sistem sau a turbinei, al căror număr se consideră a fi egal cu r .

Bobinajul stator al hidrogenatorului este constituit din numeroase bobine, considerate în număr de n . Dacă o singură bobină se defectează întreg bobinajul este compromis. De aceea trebuie urmărită în mod individual starea izolației fiecărei bobine.

Starea izolației se urmărește în permanență cu ajutorul unui sistem de achiziție de date [97], [98] rezultatele culese fiind utilizate pentru calcule directe imediate, dar și ca bază pentru simulări în scopul determinării altor parametri legați de izolație.

Se definește drept „matricea timpului de viață inițial estimat normat”, matricea:

$$[\varepsilon_k^0], \quad k = \overline{1, n} \quad (7.2)$$

adică:

$$[\varepsilon_k^0] = \begin{bmatrix} \varepsilon_1^0 \\ \varepsilon_2^0 \\ \dots \\ \dots \\ \varepsilon_n^0 \end{bmatrix} \quad (7.3)$$

unde:

ε_k^0 - timpul de viață inițial estimat normat al bobinei numărul k

n - numărul de bobine ale rotorului hidrogenatorului

Această matrice este o matrice coloană unitară, adică:

$$[\varepsilon_k^0] = \begin{bmatrix} \varepsilon_1^0 \\ \varepsilon_2^0 \\ \dots \\ \dots \\ \varepsilon_n^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \dots \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

care este asociată stării inițiale a bobinajului și anume la intrarea în exploatare a acestuia.

Fiecărui parametru ε_k^0 din matrice i se asociază valoarea corespunzătoare inițială a bobinei corespunzătoare $tg_k^0 \delta$, care se determină pe baza măsurătorilor și în urma simulărilor [11].

Se profită de fiecare revizie, având în vedere valorile obținute prin achiziție dar și măsurătorile directe asupra izolației, fapt posibil în aceste condiții, când hidrogenatorul este oprit.

Se definește drept „matricea timpului de viață curent estimat normat”, $[\varepsilon_k^i]$ matricea asociată timpului de viață momentului curent în funcționarea hidrogenatorului:

$$[\varepsilon_k^i] = \begin{bmatrix} \varepsilon_1^i \\ \varepsilon_2^i \\ \dots \\ \dots \\ \varepsilon_n^i \end{bmatrix} \quad (7.5)$$

cu

$$0 < i < Z \quad (7.6)$$

Z – numărul maxim de estimări care se fac pe parcursul duratei de viață a hidrogenatorului și care reflectă starea fiecărei bobine a statorului hidrogenatorului.

Precizia valorilor ε_k^i ai matricei depinde de valorile parametrilor prin care sunt calculați și având în vedere că în timpul funcționării hidrogenatorului sunt posibile a fi cunoscute doar o parte dintre mărimile de interes, se poate concluziona că precizia de estimare nu este foarte ridicată. Îmbunătățirea estimării se poate face în momentele de revizie, cele programate fiind în număr de p :

$$\Delta p = \frac{T}{p} \quad (7.7)$$

cu :

Δp - intervalul de timp dintre două revizii programate iar cele neprogramate fiind în număr de r.

Se definește drept „matricea timpului de viață curent estimat normat pentru revizia programată j” matricea $[\varepsilon_k^j]$, matrice ce exprimă timpului de viață estimat în momentul efectuării reviziei respective. Această estimare se determină cu ajutorul matricei de corecție $[c_k^j]$, care este o matrice diagonală:

$$[c_k^j] = \begin{bmatrix} c_1^j & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & c_2^j & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & c_3^j & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & c_n^j \end{bmatrix} \quad (7.8)$$

pentru fiecare din cele $j = \overline{1, p}$, revizii programate,

cu:

$$0 \leq [c_k^j] \leq 1 \quad (7.9)$$

unde

j - numărul de ordine al reviziei programate

Astfel:

$$[\varepsilon_k^j] = [c_k^j] * [\varepsilon_k^{j,t}] \quad (7.10)$$

adică:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1^j \\ \varepsilon_2^j \\ \dots \\ \dots \\ \varepsilon_n^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1^j & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & c_2^j & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & c_3^j & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & c_n^j \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1^{j,t} \\ \varepsilon_2^{j,t} \\ \dots \\ \dots \\ \varepsilon_n^{j,t} \end{bmatrix} \quad (7.11)$$

unde:

$\begin{bmatrix} \varepsilon_k^{j,t} \end{bmatrix}$ - „matricea timpului de viață teoretic estimat normat la revizia programată de ordinul j ”, determinată pe baza standardelor .

Dacă comportarea hidrogenatorului este în acord cu previziunile teoretice, matricea diagonală $\begin{bmatrix} c_k^j \end{bmatrix}$ are coeficienții unitari, adică este chiar matricea diagonală unitate, situație întâlnită rar în practică și numai pe intervale de timp relativ mici:

$$\begin{bmatrix} c_1^j & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & c_2^j & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & c_3^j & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & c_n^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & 1 & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.12)$$

Legătura dintre „matricele timpului de viață estimat normat” asociate a două revizii programate consecutiv este dat de relația:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_k^j \end{bmatrix}_p = \begin{bmatrix} \varepsilon_k^{j-1} \end{bmatrix}_p - \begin{bmatrix} \varepsilon_k^{\Delta p} \end{bmatrix} \quad (7.13)$$

adică:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1^j \\ \varepsilon_2^j \\ \dots \\ \dots \\ \varepsilon_n^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1^{j-1} \\ \varepsilon_2^{j-1} \\ \dots \\ \dots \\ \varepsilon_n^{j-1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \varepsilon_1^{\Delta p} \\ \varepsilon_2^{\Delta p} \\ \dots \\ \dots \\ \varepsilon_n^{\Delta p} \end{bmatrix} \quad (7.14)$$

Fiecare valoare $\varepsilon_k^{\Delta p}$ a matricei $\begin{bmatrix} \varepsilon_k^{\Delta p} \end{bmatrix}$ se determină cu relația:

$$\varepsilon_k^{\Delta p} = \varepsilon_k^{j-1} - \overline{t_{\Delta p}} \quad (7.15)$$

valoarea normată $\overline{t_{\Delta p}}$ fiind :

$$\overline{t_{\Delta p}} = \frac{t_{\Delta p}}{T} \quad (7.16)$$

Se observă că pentru $j = 1$ se obține chiar „matricea timpului de viață inițial estimat normat”, $\begin{bmatrix} \varepsilon_k^0 \end{bmatrix}$.

Dacă există și revizii neprogramate, timpul de viață rămas trebuie reestimat datorită faptului că este foarte posibil ca erorile din sistem să se răsfrângă și asupra calității izolației. În aceste condiții „matricea timpului de viață curent estimat normat”, $\begin{bmatrix} \varepsilon_k^i \end{bmatrix}$ devine:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_k^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_k^r \end{bmatrix} \cdot \left(\begin{bmatrix} \varepsilon_k^j \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \varepsilon_k^{\Delta t_{j,r}} \end{bmatrix} \right) \quad (7.17)$$

cu:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_k^{\Delta t_{j,r}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1^{\Delta t_{j,r}} \\ \varepsilon_2^{\Delta t_{j,r}} \\ \dots \\ \dots \\ \varepsilon_n^{\Delta t_{j,r}} \end{bmatrix} \quad (7.18)$$

$\begin{bmatrix} \varepsilon_k^{\Delta t_{j,r}} \end{bmatrix}$ - matricea timpului de viață estimat dintre momentul reviziei programate j și momentul reviziei neprogramate r, dacă revizia neprogramată r a avut loc la intervalul normat $\overline{\Delta t_{j,r}}$ după revizia programată j

și:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_k^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_k^r \end{bmatrix} \cdot \left(\begin{bmatrix} \varepsilon_k^j \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \varepsilon_k^{\Delta t_{r-1,r}} \end{bmatrix} \right) \quad (7.19)$$

cu:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_k^{\Delta t_{r-1,r}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1^{\Delta t_{r-1,r}} \\ \varepsilon_2^{\Delta t_{r-1,r}} \\ \dots \\ \dots \\ \varepsilon_n^{\Delta t_{r-1,r}} \end{bmatrix} \quad (7.20)$$

$\begin{bmatrix} \varepsilon_k^{\Delta t_{r-1,r}} \end{bmatrix}$ - matricea timpului de viață estimat dintre momentele reviziilor neprogramate r-1 și r dacă revizia neprogramată r a avut loc la intervalul $\overline{\Delta t_{r-1,r}}$ după o altă revizie neprogramată r-1.

Timpii normați $\overline{\Delta t_{j,r}}$, respectiv $\overline{\Delta t_{r-1,r}}$ au expresiile:

$$\overline{\Delta t_{j,r}} = \frac{\Delta \cdot t_{j,r}}{T} \quad (7.21)$$

respectiv:

$$\overline{\Delta t_{r-1,r}} = \frac{\Delta \cdot t_{r-1,r}}{T} \quad (7.22)$$

Matricea rezultată $\begin{bmatrix} \varepsilon_k^j \end{bmatrix}$ din relațiile (7.17) și (7.19) va fi redenumită ulterior pentru cazul reviziilor neprogramate cu indicele r, corecțiile aplicate „matricei timpului de viață estimat normat”, $\begin{bmatrix} \varepsilon_k^r \end{bmatrix}$ realizându-se cu ajutorul matricelor de corecție de tip $\begin{bmatrix} c_k^r \end{bmatrix}$, matrice de tip diagonală:

$$\begin{bmatrix} c_k^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1^r & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & c_2^r & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & c_3^r & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & c_n^r \end{bmatrix} \quad (7.23)$$

Matricea $[c_k^r]$ este matricea de corecție pentru fiecare din cele $r = \overline{1, q}$ revizii neprogramate. Termenii matricei sunt obținuți pe baza măsurătorilor și simulărilor asupra hidrogeneratorului.

Timpul de viață rămas estimat pentru bobinaj se poate determina în fiecare moment prin matricea $[\varepsilon_k^i]$, cu condiția:

$$[\varepsilon_k^i] > 0 \quad (7.24)$$

adică:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1^i \\ \varepsilon_2^i \\ \dots \\ \dots \\ \varepsilon_n^i \end{bmatrix} > \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.25)$$

Dacă, oricând, pe parcursul funcționării hidrogeneratorului se constată că:

$$[\varepsilon_k^i] < [\varepsilon_k^{\Delta p}] \quad (7.26)$$

adică:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1^i \\ \varepsilon_2^i \\ \dots \\ \dots \\ \varepsilon_n^i \end{bmatrix} < \begin{bmatrix} \varepsilon_1^{\Delta p} \\ \varepsilon_2^{\Delta p} \\ \dots \\ \dots \\ \varepsilon_n^{\Delta p} \end{bmatrix} \quad (7.27)$$

unde, se poate considera, în mod normal, că:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1^{\Delta p} \\ \varepsilon_2^{\Delta p} \\ \dots \\ \dots \\ \varepsilon_n^{\Delta p} \end{bmatrix} = \frac{1}{p} \begin{bmatrix} \varepsilon_1^0 \\ \varepsilon_2^0 \\ \dots \\ \dots \\ \varepsilon_n^0 \end{bmatrix} \quad (7.28)$$

Trebuie avută în vedere oprirea în scurt timp a funcționării hidrogeneratorului deoarece se estimează ca până la următoarea revizie nu va mai fi îndeplinită condiția (7.25).

Determinarea timpului de viață se face pe baza relației (7.24), obținut prin relațiile (7.10), (7.12), (7.13), (7.15), (7.16), (7.17), (7.19), (7.21), (7.22).

Mai trebuie specificat că în ceea ce privește „matricea timpului de viață teoretic estimat normat la revizia programată de ordinul j ” $[\varepsilon_k^{j,t}]$, valoarea indicată în standarde se va folosi eventual, doar la prima revizie, ulterior operandu-se cu o matrice $[\varepsilon_k^{j,t}]^*$, pe care o vom denumi „matricea timpului de viață teoretic corectat estimat normat la revizia programată de ordinul j ”, a căror valori sunt determinate iterativ pe baza standardelor corelate cu elementele prezentate în paragraful prezent și a calculelor și simulărilor efectuate pentru fiecare caz în parte.

Se mai poate adăuga faptul că, doar teoretic, cel puțin în acest moment, precizia maximă pentru determinarea valorilor coeficienților matricei $[\varepsilon_k^i]$ s-ar

obține, dacă în locul matricelor diagonale $[c_k^j]$ și $[c_k^r]$ s-ar utiliza matricea pătratică de forma $[c_{xy}^j]$

$$[c_{xy}^j] = \begin{bmatrix} c_{11}^j & c_{12}^j & \dots & \dots & c_{1n}^j \\ c_{21}^j & c_{22}^j & \dots & \dots & \dots \\ c_{31}^j & \dots & c_{33}^j & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & c_{n-1,n}^j \\ c_{n1}^j & \dots & \dots & c_{n,n-1}^j & c_{nn}^j \end{bmatrix} \quad (7.29)$$

respectiv $[c_{xy}^r]$:

$$[c_{xy}^r] = \begin{bmatrix} c_{11}^r & c_{12}^r & \dots & \dots & c_{1n}^r \\ c_{21}^r & c_{22}^r & \dots & \dots & \dots \\ c_{31}^r & \dots & c_{33}^r & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & c_{n-1,n}^r \\ c_{n1}^r & \dots & \dots & c_{n,n-1}^r & c_{nn}^r \end{bmatrix} \quad (7.30)$$

coeficienți c_{xy}^j , c_{xy}^r , $x = \overline{1, n}$, $y = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, p}$, $r = \overline{1, q}$ exprimând interacțiunea dintre bobinele x și y . Datorită complexității problemei, în literatura de specialitate nu se cunosc nici un fel de studii teoretice și/sau experimentale prin care să poată fi identificați acești coeficienți.

7.3. Concluzii

Determinarea timpului de viață al izolației bobinajelor este foarte importantă, deoarece prin acesta se poate estima în orice moment durata de viață rămasă a izolației, evitând în acest fel apariția defectelor de izolație în timpul funcționării generatorului.

Pentru aceasta s-a conceput o metodă de estimare on-line a timpului de viață a izolației hidrogenatorului.

Utilitatea modelului este aceea că, pe baza estimării stabilite se poate evita avarierea hidrogenatorului ca urmare a defectelor de izolație, prin aceea că se poate decide, pe baza informațiilor culese, remedierea sistemului de izolație atunci când parametrii acestuia tind spre valorile limită inferioare admisibile.

Pentru elaborarea modelului au fost definiți atât lingvistic cât și matematic mai mulți termeni, fiind introdusă noțiunea de „matricea timpului de viață estimat”, cu diverse subcategorii: „inițial”, „curent”, „revizie programată”, „revizie neprogramată”, asociate la situații ce intervin în exploatare și pe baza cărora se determină „timpul de viață estimat normal”.

Modelul a fost conceput într-o formă matricială, fiind astfel ușor de implementat pe calculator.

Având în vedere că timpul de viață este estimat în valori raportate, modelul are un mare grad de generalitate putându-se aplica, practic, la toate mașinile electrice.

Ca perspectivă, prin extensie se poate determina un model de estimare a timpului de viață și pentru izolația sistemului rotor.

8. TESTAREA STĂRII IZOLAȚIEI BOBINAJULUI STATOR AL HIDROGENERATOARELOR

8.1. *Introducere*

În acest capitol se prezintă programul de teste și rezultatele obținute pentru determinarea parametrilor de interes ai izolațiilor bobinelor stator.

Aceste teste au fost efectuate în standul SC UCMR SA, pe 215 bobine stator, în vederea obținerii de rezultate practice privind comportarea izolației bobinelor stator. În finalul capitolului se face un studiu comparativ între rezultatele experimentale și cele obținute prin simulare.

8.2. *Determinarea stării izolației bobinajului stator*

Determinarea stării izolației este foarte importantă pentru ca generatorul să funcționeze în condiții nominale.

Pentru determinarea stării izolației bobinajului stator hidrogenatorul a fost supus la un program complex de măsurători și investigații.

Cauzele deteriorării bobinajelor

Principalele cauze care produc deteriorarea bobinajelor stator se pot împărți în două categorii, în funcție de zonele în care apar defectele:

- Zona bobinajului din interiorul creștăturii
- Zona capetelor frontale ale bobinajului

În zona din interiorul creștăturii deteriorarea bobinajului se manifestă prin :

- Slăbirea fixării radiale și axiale a bobinajului în creștătură care dă naștere la vibrații, datorită forțelor de natură electromagnetică, producându-se distrugerea lacului conductor de pe suprafața barelor, frecarea izolației și apariția jocurilor între bară și creștătură [44].

- Supratemperaturi locale, datorită încălzirii pachetului de tole sau a unor sarcini accidentale, care solicită termic izolația [59].

- Apariția, în timp, a descărcărilor parțiale [28] în interiorul izolației și între bobină și miezul magnetic.

- Pătrunderea unei cantități excesive de ulei și impurități în creștătură care afectează, în timp, lacul conductor de pe bobine și izolația creștăturii, micșorând considerabil coeficientii de frecare dintre bobine și creștătură, favorizând mișcarea bobinajului.

- Impregnarea insuficientă cu rășină epoxy a bobinelor și barelor.

În zona capetelor frontale deteriorarea bobinajului se manifestă prin :

- Slăbirea consolidării capetelor frontale ale bobinajelor care dă naștere la vibrații de natura electromagnetică [118], la distrugerea lacului semiconductor și a

celui izolant, producându-se frecarea izolației și apariția unor curenți de scurgeri de valoare mare.

- Desprinderea pieselor de consolidare care produce frecarea izolației sub acțiunea vitezelor aerului de ventilație.

- Contaminarea cu vapori de ulei și impurități care duce la deteriorări ale lacului semiconductor și de protecție și apariția efectului Corona [13].

- Ventilația neuniformă a generatoarelor care provoacă încălziri locale ale bobinajelor și îmbătrâniri premature [85].

- Scurtcircuitele, care apar în bobinaje.

- Lovituri mecanice ale capetelor frontale datorită unor piese în mișcare.

8.3. Program de teste efectuate asupra bobinajului stator

Testele s-au realizat pe înfășurarea stator a generatorului destinat CHE Middle Kolab India.

Înfășurarea stator este alimentată la tensiunea de 11 kV și din, rezultatele obținute cu programul prezentat în capitolul 5, a rezultat că această înfășurare se realizează din bobine, cu conductoare elementare de cupru cu 7,1 mm x 2,24 mm (lățimea x înălțimea conductorului elementar).

Izolația acestuia este din Calmicaglass 2005, care este o izolație compusă din hârtie de mică muscovit calcinată și țesătura de sticlă, impregnată cu o rășină epoxi-novolac termoreactivă. Aceasta izolație, foarte flexibilă, poate fi înfășurată cu ușurință pe toată lățimea conductorului de cupru, manual sau automat. După polimerizare într-o presa cu încălzire, se obține o izolație cu excelente proprietăți dielectrice, termice, mecanice și chimice.

Având la bază bobina stator dimensionată pe baza algoritmului din capitolul 5 și prezentată în figura 5.11, au fost realizate practic cele 215 bobine stator, una dintre acestea fiind ilustrată în figura 8.1.

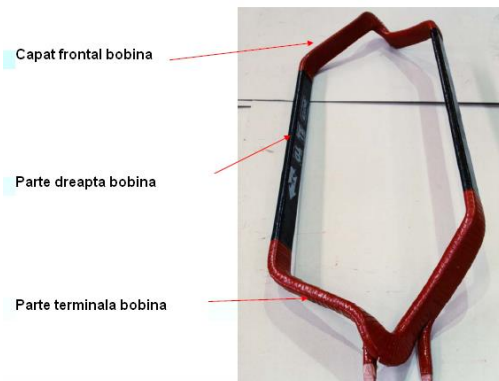


Figura 8.1. Bobină stator

Înfășurarea stator realizată cu aceste bobine este ilustrată în figura 8.2.

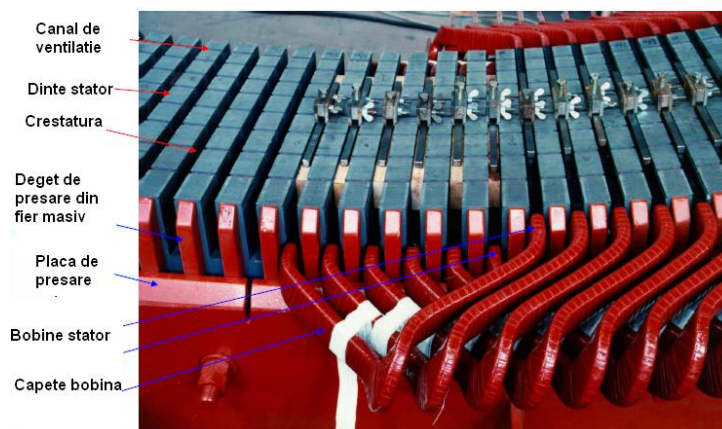


Figura 8.2. Stator bobinat

Bobinajul stator a fost supus unui program complex de testare și anume:

- Măsurarea rezistenței de izolație
- Determinarea coeficientului de absorbție
- Determinarea indicelui de polarizare
- Determinarea tensiunii de străpungere a izolației.
- Măsurarea $\text{tg } \delta$ în trepte de câte $0.2 \times U_n$ până la tensiunea $1,4 \times U_n$.
- Măsurarea descărcărilor parțiale, la $0.6 \times U_n$

Ca urmare a aplicării acestui program de testare, s-au elaborat criterii de acceptare a izolației bobinajelor stator. Dacă valorile obținute nu se încadrează în limitele acceptate, bobinajele se penalizează, printr-un sistem de coeficienți numerici. Dacă suma coeficienților este de 100 de puncte sau mai mare, izolația nu este corespunzătoare conducând la schimbarea izolației.

8.3.1. Măsurarea rezistenței de izolație

Pentru măsurarea rezistenței de izolație, pe stand s-a folosit metoda megohmetrului, măsurarea făcându-se la intervale de timp standardizate [62], de 15 secunde, 60 secunde și la 10 minute de la aplicarea tensiunii. Rezistențele măsurate după acești timpi se notează cu R_{15} , R_{60} (sau R_1) și respectiv R_{10} .

Criteriul de apreciere, [64], a rezistenței de izolație este:

$$R_{60\text{sec}} \geq 100\text{M}\Omega \quad (8.1)$$

unde:

$R_{60\text{sec}}$ - rezistența de izolație pentru bobinajul complet la 40°C .

În figura 8.3 se ilustrează modul de măsurare a acesteia pe stand.



Figura 8.3. Măsurarea rezistenței de izolație cu megohmetru

Rezultatele măsurătorilor efectuate aleator, pentru un număr limitat de bobine de pe fiecare fază sunt reținute în tabelul 8.1.

Tabel 8.1

Faza	R _{15sec} [MΩ]	R _{60sec} [MΩ]	R _{600sec} [MΩ]
R	1350	3360	14900
S	1400	3440	15100
T	1370	3670	15900

8.3.2. Măsurarea coeficientului de absorbție

În cadrul acestei probe criteriul de apreciere pentru coeficientul de absorbție k_{abs} este:

$$k_{abs} = \frac{R_{60sec}}{R_{15sec}} > 1.3 \quad (8.2)$$

Acest coeficient de absorbție permite să se aprecieze starea de umiditate a dielectricului [146], astfel:

- un coeficient de absorbție mai mic de 1,3 indică o izolație umedă;
- un coeficient de absorbție mai mare de 1,3 indică o izolație uscată;

Ca urmare a măsurătorilor rezistenței de izolație și a valorilor prezentate în tabelul 8.1, în tabelul 8.2 se prezintă valorile calculate ale coeficientului de absorbție.

Tabel 8.2

Faza	k_{abs} [-]
R	2.49
S	2.46
T	2.68

8.3.3. Măsurarea indicelui de polarizare

În cadrul acestei probe criteriul de apreciere pentru indicele de polarizare k_p este:

$$k_p = \frac{R_{10sec}}{R_{60sec}} > 1.5 \quad (8.3)$$

Acest indice de polarizare permite să se aprecieze starea de umiditate a dielectricului [146], astfel:

- un indice de polarizare mai mic de 1,5 indică o izolație umedă;
- un indice de polarizare mai mare de 1,5 indică o izolație uscată;

Ca urmare a măsurătorilor rezistenței de izolație și a valorilor prezentate în tabelul 1, în tabelul 8.3 se prezintă valorile calculate ale indicelui de polarizare pentru fiecare fază.

Tabel 8.3

Faza	k_p [-]
R	4.43
S	4.39
T	4.33

8.3.4. Proba profilactica în c.a. (a.c. hipot test)

Bobinajul este supus unui test cu înaltă tensiune [68], pe fiecare fază, până la valoarea tensiunii de testare:

$$U_{test} = 1,25 \times \frac{U_N}{\sqrt{3}} \quad [kV] \quad (8.4)$$

În timpul probei au fost măsurați curenții de fugă.

Proba se efectuează gradual, în trepte de câte 5 kV până la tensiunea finală de probă, cu menținerea pe fiecare treaptă a tensiunii timp de 1 minut, și măsurarea curenților de fugă.

Prin intermediul acestui test se determină dacă au loc modificări ale constantei dielectrice a izolației barelor din interiorul creștăturii, aceasta având o mare importanță în aprecierea gradului de deteriorare a izolației.

Pentru diagnosticare se determină următorii parametri:

$$\Delta I = \frac{I - I_0}{I_0} \times 100\%$$

U_{p1} , U_{p2} – primul și al doilea prag de tensiune care indică abaterea curenților de fugă de la variația liniară.

unde: ΔI – abaterea curenților de fugă de la variația liniară.

Dacă variația curenților de fugă cu tensiunea, pe cele trei faze, este liniară atunci se poate spune că nu au loc modificări ale constantei dielectrice [63], a izolației.

8.3.5. Proba profilactică în current continuu

Proba profilactica în curent continuu este o probă standard [75], care nu se folosește la aprecierea duratei de viață a unui bobinaj ci pentru determinarea posibilelor defecte locale, care pot apărea în izolația unui bobinaj. Proba furnizează informații utile privitoare la o posibilă avarie locală, fiind folosită în mentenanță predictivă a bobinajelor stator.

Există mai multe metodologii de efectuare a probei [68], [75], [76], [77], utilizându-se procedura și metodologia prezentată în [77].

În funcție de metodologiile aplicate există criterii de apreciere, bazate pe experiență pentru a diagnostica starea momentană a izolației.

Proba de înalta tensiune în c.c. are rolul:

- De a stabili dacă există puncte slabe locale în izolația bobinajului, posibil ca în viitor acestea să provoace o avarie.
- De a determina gradul de contaminare cu impurități a bobinajului
- De a determina gradul de deteriorare a lacurilor de acoperire și protecție a bobinajului.
- De a stabili gradul de umiditate al bobinajului.

În general, se recomandă ca această probă să se facă cu un bobinaj uscat pentru a nu fi influențate corectitudinea măsurărilor.

Proba se efectuează gradual în trepte de câte 2 kV c.c., începând de la tensiunea de 2 kV c.c. (dacă $U_n \geq 6.3$ kV) până la tensiunea maximă de proba de $U_p = 0.6 \times 1.6(2 \times U_n + 1)$.

În timpul probei profilactice în c.c., apare un curent variabil în timp, format din trei componente diferite:

$$I(t) = I_c(t) + I_a(t) + I_f(t) \quad (8.5)$$

unde:

$$I_c(t) = \frac{U}{R_i} x e^{-\frac{t}{R_i \times C}} \quad (8.6)$$

cu: I_c - componenta capacitivă a curentului
 U - tensiunea aplicată;
 R_i - rezistența de izolație;
 C - capacitatea înfășurării
 t - timpul

$$I_a(t) = KxUxt^{-n} \quad (8.7)$$

cu: I_a - componenta de absorbție a curentului de fugă.
 K - constantă care depinde de caracteristicile sistemului de izolație utilizat și forma geometrică a bobinajului
 U - tensiunea aplicată
 n - coeficient de absorbție

$$I_f(t) = \frac{U}{R_i} \quad (8.8)$$

I_f - componenta de fugă a curentului.

Timpii de stabilizare a curentului, pe fiecare treaptă au fost selectați în conformitate cu [77].

Deoarece proba durează excesiv de mult pe fiecare fază, cca. 2.5 ore, izolația bobinajul se încarcă cu sarcină electrică, iar creșterile de curent între treptele de tensiuni aplicate vor fi mai mari. Valorile curenților măsurați sunt apropiate de valorile curenților de fugă deoarece componentele capacitive și de absorbție se diminuează mult ducând la apariția unui curent suplimentar de sarcină.

Criteriul de apreciere al stării de izolație unui bobinaj îl constituie creșterea:

$$\frac{\Delta I_{\max}}{\Delta U_{\max}} = \frac{I(14kV) - I(2kV)}{(14kV) - (2kV)} \quad (8.9)$$

Pentru un bobinaj în stare foarte bună:

$$\frac{\Delta I_{\max}}{\Delta U_{\max}} < 5 \quad (8.10)$$

iar variația curentului pe trepte intermediare nu prezintă creșteri bruște.

Valorile măsurate ale curenților de fugă cu tensiunea de probă sunt prezentate în tabelul 8.4.

Tabel 8.4

Tensiune proba U_{proba} [kV]	Curenti masurati pe fiecare faza		
	I_R [μ A]	I_S [μ A]	I_T [μ A]
2	0.3	0.3	0.3
4	0.5	0.5	0.5
6	0.7	0.8	0.8
8	1	1	1
10	1.2	1.3	1.2
12	1.5	1.5	1.5
14	1.8	1.8	1.8
16	2	2	2.1

Tensiune proba U_{proba} [kV]	Curenti masurati pe fiecare faza		
	I_R [μA]	I_S [μA]	I_T [μA]
18	2.3	2.3	2.3
20	2.6	2.6	2.6
22	2.7	2.8	2.7

În tabelul 8.5 se prezintă valoarea calculată a raportului:

$$\frac{\Delta I_{\text{max}}}{\Delta U_{\text{max}}} \quad (8.11)$$

care stă la baza aprecierii stării izolației.

Tabel 8.5

Parametru	Faza R	Faza S	Faza T
$\frac{\Delta I_{\text{max}}}{\Delta U_{\text{max}}} = \frac{I(21kV) - I(2kV)}{(21kV) - (2kV)}$	0.126	0.131	0.126

8.3.6. Măsurarea factorului de pierderi dielectrice $\text{tg}\delta$ și ale capacității fiecărei faze statorice

Determinarea capacității, permitivității și a factorului de pierderi se face, de regulă, cu prilejul aceleiași încercări.

Capacitatea și factorul de pierderi dielectrice se determină direct prin măsurători.

Măsurarea factorului de pierderi dielectrice se face utilizând puntea Schering [66], [72]. În figura 8.4 este prezentat ștandul utilizat.

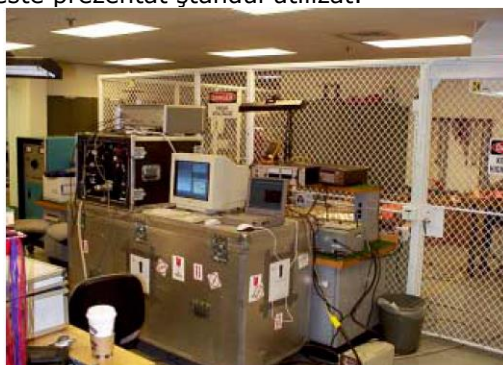


Figura 8.4. Stand pentru măsurare descărcări parțiale (stânga) și tangenta unghiului de pierderi (dreapta)

Metoda de măsurare a capacității izolației bobinelor [34] este prezentată în figura 8.5.



Figura 8.5. Măsurarea capacității bobinelor stator

În urma măsurătorilor se determină raportul:

$$\frac{C_{70}}{C_{20}} \quad (8.12)$$

unde C_{70} și C_{20} reprezintă capacitatea electrică măsurată la 70°C și respectiv la 20°C.

Acest raport indică starea de umiditate a izolației.

Dacă valoarea raportului [72] este:

1 sau cel mult 1,2÷1,3 izolația este uscată;

mai mare de 1,3, izolația este umedă.

În figura 8.6. se prezintă curbele $C=f(t)$ pentru o izolație uscată și pentru o izolație umedă.

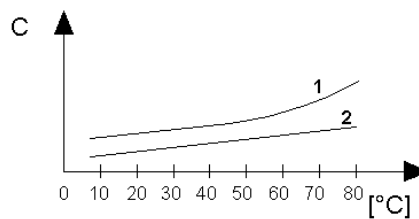


Figura 8.6. Variația capacității izolației cu temperatura

1 – la o izolație umedă

2 – la o izolație uscată

În urma măsurătorilor se trasează graficul variației factorului de pierderi dielectrice în funcție de tensiune [81].

Se determină totodată și parametrul:

$$\Delta tg\delta = tg\delta(U_n) - tg\delta(0,2xU_n) \quad (8.13)$$

Pentru forma de variație a curbei $tg\delta = f(U)$ și pentru parametrul $\Delta tg\delta$, s-au elaborat criterii practice de acceptare, a căror depășire conduce la penalizarea izolației bobinajului.

Se verifică dacă graficul de variație ale $tg\delta$ prezintă o histereză nesemnificativă și dacă se găsește situată mult sub curba permisibilă indicată de [146]. Dacă acest lucru este îndeplinit se consideră că izolația este corespunzătoare.

Rezultatele obținute în urma măsurătorilor sunt prezentate în tabelele 8.6-8.11. Factorul de pierderi dielectrice $tg\delta$, la temperatura ambiantă (tabel 8.6):

Tabel 8.6

Nr. bobină	Tens. de probă [kV]	Factorul de pierderi dielectrice $tg\delta$						
		0,2 U_n	0,4 U_n	0,6 U_n	0,8 U_n	1 U_n	1,2 U_n	1,4 U_n
7 (14)	34,8	0,91	0,95	1,01	1,1	1,16	1,26	1,41
8 (33)	34,8	0,92	1,02	1,08	1,11	1,14	1,17	1,23
9 (27)	34,8	0,95	1,05	1,08	1,15	1,27	1,48	1,69
10 (21)	34,8	1,0	1,07	1,07	1,09	1,1	1,13	1,19
11 (25)	34,8	1,04	1,1	1,12	1,13	1,14	1,16	1,23

Pierderi dielectrice pe o bobină cu variația temperaturii și a tensiunii sunt ilustrate în tabelul 8.7:

Tabel 8.7

T [°C]	Factorul de pierderi dielectrice tg δ						
	0,2 U _n	0,4 U _n	0,6 U _n	0,8 U _n	1 U _n	1,2 U _n	1,4 U _n
20	0,8	1,0	1,02	1,04	1,05	1,09	1,19
120	5,6	5,65	5,6	5,64	5,71	5,84	6,11
110	4,41	4,46	4,4	4,43	4,47	4,61	4,83
100	3,56	3,56	3,56	3,6	3,6	3,7	3,9
90	2,98	2,98	2,98	2,98	3,01	3,2	3,4
80	2,39	2,39	2,39	2,39	2,4	2,5	2,64
70	1,86	1,94	2,08	2,11	2,13	2,23	2,4
60	1,64	1,7	1,8	1,9	2,0	2,09	2,16
50	1,42	1,5	1,6	1,7	1,75	1,8	1,91
40	1,29	1,29	1,29	1,3	1,34	1,41	1,54
30	1,13	1,13	1,15	1,15	1,18	1,21	1,31
20	1,06	1,13	1,1	1,1	1,1	1,14	1,2

Pierderi dielectrice pe numărul de bobine la diferite tensiuni și la rezistență constantă R=20 Ω sunt redată în tabelul 8.8:

Tabel 8.8

Nr. bobină	Factorul de pierderi dielectrice tg δ								
	0,2 U _n	0,4 U _n	0,6 U _n	0,8 U _n	1,0 U _n	1,1 U _n	1,2 U _n	1,3 U _n	1,4 U _n
1	1,05	1,07	1,09	1,16	1,23	0,2	0,7	0,7	1,1
5	0,8	0,92	0,94	1,12	1,33	0,7	1,8	2,3	3,2
10	1	1,07	1,07	1,09	1,1	0,35	0,2	0,1	0,9
15	0,74	0,83	0,9	1,08	1,28	0,8	1,8	2	3,4
20	0,86	0,91	0,94	1,02	1,12	0,4	0,8	1	1,6
25	0,81	0,93	1,02	1,02	1,12	0,4	0,8	1,0	1,6
30	0,76	0,86	0,96	1,18	1,37	1,0	2,2	1,9	4,2
35	0,73	0,8	0,85	0,9	0,94	0,6	0,5	0,4	1,7
40	0,74	0,82	0,86	0,89	0,91	0,6	0,3	0,2	1,5
45	0,94	0,98	1,0	1,01	1,04	0,3	0,1	0,3	0,7
50	0,77	0,87	0,94	1,09	1,23	0,85	1,5	1,4	3,2
55	0,82	0,88	0,94	1,02	1,08	0,6	0,8	0,6	2
59	0,75	0,83	0,93	1,12	1,26	0,9	1,9	1,4	3,7
60	0,73	0,84	0,87	0,91	0,98	0,7	0,4	0,7	1,8
65	0,97	1,0	1,01	1,03	1,09	0,2	0,2	0,6	0,6
70	1,07	1,14	1,16	1,18	1,2	0,45	0,2	0,2	1,1
75	0,99	1,03	1,09	1,1	1,11	0,5	0,1	0,1	1,1
80	1,06	1,13	1,14	1,16	1,2	0,4	0,2	0,4	1,0
85	0,1	1,03	1,05	1,07	1,1	0,25	0,2	0,3	0,7
90	0,91	0,99	1,03	1,08	1,16	0,6	0,5	0,8	1,7
95	0,87	0,99	1,04	1,09	1,15	0,85	0,5	0,6	2,2
100	0,92	0,99	1,03	1,09	1,16	0,55	0,6	0,7	1,7
105	1,01	1,09	1,1	1,12	1,16	0,45	0,2	0,4	1,1
107	1,12	1,18	1,25	1,51	1,78	0,65	2,6	2,7	3,9
110	0,9	0,95	1,0	1,07	1,19	0,5	0,7	1,2	1,7
112	0,88	0,99	1,14	1,37	1,55	1,3	2,3	1,8	4,9

Nr. bobină	Factorul de pierderi dielectrice $\text{tg } \delta$								
	0,2 U_n	0,4 U_n	0,6 U_n	0,8 U_n	1,0 U_n	1,1 U_n	1,2 U_n	1,3 U_n	1,4 U_n
115	1,15	1,17	1,19	1,22	1,28	0,2	0,3	0,6	0,7
120	1,12	1,13	1,14	1,15	1,16	0,1	0,1	0,1	0,3
125	1,04	1,18	1,2	1,2	1,22	0,8	0,1	0,1	1,7
130	1,0	1,07	1,11	1,13	1,15	0,55	0,2	0,2	1,3
133	1,01	1,05	1,15	1,1	1,18	0,53	0,3	0,3	1,1
135	1,03	1,09	1,04	1,09	1,19	0,5	0,5	1,0	0,6
140	0,99	1,04	1,09	1,11	1,12	0,5	0,2	0,1	1,2
145	0,8	0,9	0,96	1,05	1,13	0,8	0,9	0,8	2,5
150	0,74	0,84	0,91	1,07	1,24	0,85	1,6	1,7	3,3
155	0,9	0,97	1,01	1,1	1,19	0,55	0,9	0,9	2
160	0,94	0,99	0,99	1,05	1,14	0,25	0,6	0,9	1,1
165	0,87	0,97	1,0	1,03	1,06	0,65	0,3	0,3	1,6
170	1,09	1,16	1,19	1,26	1,33	0,5	0,7	0,7	1,7
175	1,05	1,14	1,18	1,23	1,29	0,8	0,5	0,6	2,1
180	0,78	0,85	0,89	0,99	1,12	0,55	1,0	1,3	2,1
185	0,85	0,94	0,98	1,06	1,16	0,65	0,8	1,0	2,1
190	0,8	0,84	0,9	0,94	0,98	0,5	0,4	0,4	1,4
195	0,82	0,91	0,92	0,95	0,99	0,5	0,3	0,4	1,3
200	0,88	0,96	1,04	1,25	1,45	0,8	2,1	2,0	3,7
205	0,82	0,93	0,99	1,05	1,12	0,85	0,6	0,7	2,3
210	1,0	1,03	1,07	1,27	1,45	0,35	2,0	1,8	2,7
215	1,06	1,09	1,11	1,14	1,19	0,25	0,3	0,5	0,8

Variația factorului de pierderi dielectrice $\Delta \text{tg } \delta$, la temperatura ambiantă este redată în tabelul 8.9:

Variația factorului de pierderi dielectrice s-a realizat în conformitate cu relația:

$$\Delta \text{tg } \delta = \text{tg } \delta_{(0,6 \times U_n)} - \text{tg } \delta_{(0,2 \times U_n)} \quad (8.14)$$

Tabel 8.9

Nr. bobină	Tens. de probă [kV]	Variația factorului de pierderi dielectrice $\Delta \text{tg } \delta$						
		0,6 ÷ 0,2 U_n	0,8 ÷ 0,6 U_n	1,0 ÷ 0,8 U_n	1,2 ÷ 1,0 U_n	1,4 ÷ 1,2 U_n	0,8 ÷ 0,2 U_n	1,4 ÷ 0,2 U_n
7 (14)	34,8	0,5	0,9	0,6	1,0	1,5	0,9	5
8 (33)	34,8	0,8	0,3	0,3	0,3	0,6	1,9	3,1
9 (27)	34,8	0,65	0,7	1,2	2,1	2,1	2	7,4
10 (21)	34,8	0,35	0,2	0,1	0,3	0,6	0,9	1,9
11 (25)	34,8	0,4	0,1	0,1	0,2	0,7	0,9	1,9

Variația factorului de pierderi dielectrice $\Delta \text{tg } \delta$ pe o bobină cu variația temperaturii și a tensiunii este ilustrată în tabelul 8.10:

Tabel 8.10

T [°C]	Variația factorului de pierderi dielectrice $\Delta \text{tg } \delta$			
	0,4 ÷ 0,2 U_n	0,6 ÷ 0,4 U_n	0,8 ÷ 0,6 U_n	1,0 ÷ 0,8 U_n
20	2	0,2	0,1	0,4
120	0,5	-0,5	0,4	0,7
110	0,5	-0,6	0,3	0,4

T [°C]	Variația factorului de pierderi dielectrice $\Delta \text{tg } \delta$			
	0,4 ÷ 0,2 U_n	0,6 ÷ 0,4 U_n	0,8 ÷ 0,6 U_n	1,0 ÷ 0,8 U_n
100	0	0	0,4	0
90	0	0	0	0,3
80	0	0	0	0,1
70	0,8	1,4	0,3	0,2
60	0,6	1	1	1
50	0,8	1	1	0,5
40	0	0	0,1	0,4
30	0	0	0,2	0,3
20	0,7	-0,3	0	0

Curba de ionizare între 0,2 și $2U_n$ la temperatura ambiantă este redată în tabelul 8.11:

Tabel 8.11

Nr. bob	1kV	2kV	3kV	4kV	5kV	6kV	7kV	8kV	9kV	10 kV	11 kV
tg δ 7 (14)	0,73	0,85	0,88	0,96	0,98	1,01	1,05	1,1	1,13	1,16	1,2 0
$\Delta \text{tg} \delta$ 7 (14)	1,2	0,3	0,8	0,2	0,3	0,4	0,5	0,3	0,3	0,4	0,4
Nr. bob	12 kV	13 kV	14 kV	15 kV	16 kV	17 kV	18 kV	19 kV	20 kV	21 kV	22 kV
tg δ 7 (14)	1,24	1,3	1,36	1,43	1,5	1,55	1,62	1,68	1,81	1,86	1,93
$\Delta \text{tg} \delta$ 7 (14)	0,6	0,6	0,7	0,5	0,5	0,7	0,6	1,3	0,5	0,7	0,5

8.3.7. Măsurarea descărcărilor parțiale

Descărcările parțiale sunt mici scânteieri electrice care apar adesea în izolațiile deteriorate ale bobinajelor stator. Începând cu 1980, [57], multe firme au adoptat testarea descărcărilor parțiale ca mijloc de determinare a stării izolației față de masă în hidrogenatoare. Testul de descărcări parțiale [149] s-a dovedit a fi un indicator sensibil al următoarelor cauze de deteriorare [28] a bobinajului stator:

- Bobine și bare care nu au fost impregnate suficient cu epoxy.
- Izolație față de masă, care s-a exfoliat (separarea straturilor de benzi de mică) datorită supraîncălzirilor și/sau ciclurilor termice excesive.
- Deteriorarea acoperirii semiconductoare (în creștătură) și/sau a acoperirii de nivelare a potențialului chiar la ieșirea din creștătură.
- Slăbirea penelor și umpluturii creștăturii datorită instalării proaste sau încrețirii graduale, care duc la descărcări în creștătură.
- Contaminări conductive la capetele frontale (regiunea din afara creștăturii), care duc la conturnări fază-masă sau fază-fază.

Testul PD se efectuează la tensiunea de fază [67]:

$$U_f = 0.6xU_n \quad (8.15)$$

104 Testarea stării izolației bobinajului stator al hidrogenatoarelor - 8

Pentru a analiza starea izolației întregii faze folosind tehnologia PDA [53], se alimentează fiecare fază separat de la o sursă externă la tensiunea de $0.6xU_n$.

În izolația înfășurării stator, pe toate cele trei faze se va constata o activitate PD intensă sau redusă atât ca extindere în bobinaj cât și ca valori ale sarcinilor descărcărilor parțiale [142], [143].

Utilizând standul din figura 8.4 s-au determinat valorile ilustrate în tabelele 8.12-8.14.

Descărcări parțiale sunt ilustrate în tabelul 8.12 și tabelul 8.13:

Tabel 8.12

Nr. bobină	Tens. de probă [kV]	NQN (amplitudinea)		Peak (amplitudinea)	
		+	-	+	-
7 (14)	6,6	41	27	18	16
8 (33)	6,6	1	3	0	0
9 (27)	6,6	52	55	29	28
10 (21)	6,6	1	7	0	0
11 (25)	6,6	8	6	7	7

Tabel 8.13

Nr. bobină	Tens. de probă [kV]	NQN		Peak	
		+	-	+	-
7 (14)	11	112	102	65	56
8 (33)	11	11	11	8	8
9 (27)	11	37	60	36	38
10 (21)	11	40	35	22	19
11 (25)	11	19	15	10	9

Descărcări parțiale pe numărul de bobine sunt redată în tabelul 8.14:

Tabel 8.14

Nr. bobină	Tens. de probă [kV]	NQN		Peak	
		+	-	+	-
1	6,6	18	17	11	11
5	6,6	102	91	51	45
10	6,6	1	7	0	0
15	6,6	5	14	4	8
20	6,6	27	20	16	12
25	6,6	27	27	16	13
30	6,6	64	57	36	31
35	6,6	1	5	0	5
40	6,6	2	3	0	8
45	6,6	10	22	27	10
50	6,6	12	11	8	8
55	6,3	30	28	16	15
59	6,3	119	129	79	85
60	6,3	14	11	12	8
65	6,3	20	14	13	9
70	6,3	0	4	0	0
75	6,3	5	3	0	6
80	6,3	1	0	0	0

Nr. bobină	Tens. de probă [kV]	NQN		Peak	
		+	-	+	-
85	6,6	18	19	13	13
90	6,6	33	31	19	19
95	6,6	9	9	11	0
100	6,6	55	29	26	22
105	6,6	7	7	7	7
107	6,6	105	72	63	49
110	6,6	29	31	15	8
112	6,6	132	114	79	59
115	6,6	14	13	8	8
120	6,6	20	22	12	14
125	6,6	4	3	0	0
130	6,6	4	2	0	0
133	6,6	88	107	58	73
135	6,6	23	6	13	4
140	6,6	26	22	17	16
145	6,6	6	6	6	6
150	6,6	40	39	22	18
155	6,6	30	25	16	15
160	6,6	17	5	13	0
165	6,6	13	14	7	8
170	6,6	19	22	11	12
175	6,6	33	33	18	18
180	6,6	51	47	29	24
185	6,6	111	116	31	36
190	6,6	41	27	30	24
195	6,6	17	15	12	11
200	6,6	68	62	35	31
205	6,6	11	7	8	7
210	6,6	123	130	96	95
215	6,6	91	86	47	51

8.3.8. Rigiditatea dielectrică

Încercarea propriu-zisă constă în aplicarea tensiunii de încercare până în momentul în care se produce străpungerea [146].

Creșterea tensiunii se poate face în două moduri: fie o creștere rapidă, uniformă, de la zero până la valoarea la care se produce străpungerea, în circa $10 \div 20$ s, fie o creștere în trepte, începând de la o valoare de circa 40 % din valoarea tensiunii estimată de străpungere, fiecare treaptă menținându-se aproximativ 20 s; valorile treptelor trebuie să fie de circa 10 % din valoarea inițială, iar trecerea de la o treaptă la alta se va face cât mai rapid posibil, timpul necesar pentru ridicarea tensiunii incluzându-se în cele 20 s de verificare.

Valoarea tensiunii de încercare este stabilită prin standarde de produs sau norme interne [25] , [146].

Prin măsurători la eșantioane aleatoare din grupul de bobine, la probele de străpungere a izolației s-au obținut următoarele rezultate:

- pe partea de ancoșă $U_{str}=63,5$ kV - contornează

- pe partea frontală:
 - opusă legăturilor: $U_{str}=47,5$ kV - contornează
 - cu legături: $U_{str}=40,5$ kV - contornează
 - pe partea buclei: $U_{str}=38$ kV - contornează
- Probele de străpungere a izolației între spire cu bobina secționată:

Spire:

1÷2 $U_{str}=20$ kV - contornează

2÷3 $U_{str}=13$ kV - contornează

3÷4 $U_{str}=17$ kV - contornează

4÷5 $U_{str}=16$ kV - contornează

În urma testării practice a bobinelor stator s-a constatat că 93% din acestea au avut o izolație corespunzătoare iar pentru 7% din ele izolația a prezentat diferite defecte, defecte ilustrate în figura 8.7 și figura 8.8:



Figura 8.7. Ardere izolație ca urmare a aplicării tensiunii de străpungere

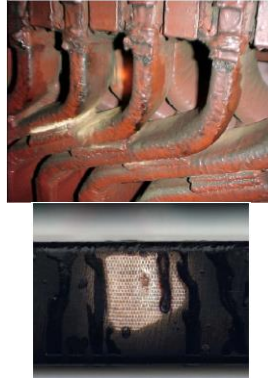


Figura 8.8. Defecte ale izolației bobinajului stator ca urmare a descărcărilor parțiale

8.4. Interpretarea rezultatelor

Ca urmare a rezultatelor experimentale obținute în urma testărilor s-au constatat următoarele:

- rezistența de izolație a bobinajului este peste valoarea limită admisă.
- valorile obținute pentru coeficientul de absorbție K_{abs} indică faptul că bobinajul stator este suficient de uscat.
- valorile obținute pentru indicele de polarizare I_p , indică faptul că bobinajul stator este suficient de uscat.
- se constată că pentru fazele R, S și T valoarea raportului exprimat prin relația (8.10) este în limite admisibile deci nu apar creșteri bruște a curentului pe trepte intermediare, deci nu apar avarii locale în izolație.
- pentru interpretarea corectă a factorului de pierderi dielectrice în funcție de tensiune, în figurile 8.9 ÷ 8.17 autorul a trasat curbele de variație ale factorul de pierderi dielectrice $\text{tg } \delta$ în funcție de numărul de bobine (de la 1 la 215), fiecare grafic trasându-se în trepte de 0.2 din tensiunea nominală U_n de la $U=(0.2 \div 1.4)U_n$.

Datorită volumului mare al rezultatelor obținute, autorul a redat variația curbelor în Anexa 1, iar în conținutul tezei este ilustrată variația factorul de pierderi dielectrice $\text{tg } \delta$ la tensiunea nominală, considerată ca fiind cea mai reprezentativă (figura 8.13).

Factorul de pierderi dielectrice $\text{tg } \delta$ la U_n

$\text{tg } \delta$

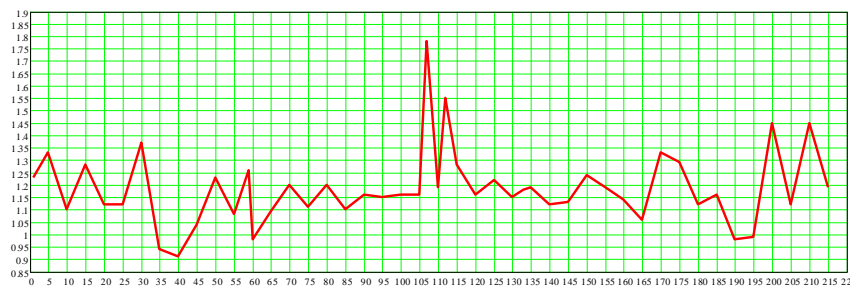


Figura 8.13. Variația factorului de pierderi dielectrice $\text{tg } \delta$ la U_n în funcție de numărul de bobine

În urma analizei curbei de variație a factorului de pierderi dielectrice $\text{tg } \delta$ în funcție de numărul de bobine (figura 8.13) s-a observat că:

- izolația bobinelor nr. 107 și nr. 112 testate a străpuns din cauza golurilor de aer existente în masa izolației.

- pentru bobinele nr. 35, nr.40, nr.190, nr.195, din cauza golurilor de aer neglijabile variația este aproape liniară, ceea ce conduce la concluzia că izolația a fost realizată optim.

- pentru restul de bobine, din cauza golurilor de aer neglijabile, se constată că izolația a fost realizată corespunzător.

Totodată pentru factorul de pierderi dielectrice $\text{tg } \delta$, având ca bază rezultatele obținute în urma simulării, curba de variație indicată de [146] precum și rezultatele obținute în urma testărilor, s-au trasat grafice în care s-au evidențiat:

- curba tangentei unghiului de pierderi dielectrice dată de norma VDE (curba trasată cu negru);

- curba rezultată în urma modelării și simulării (curba trasată cu roșu);

- curba rezultată în urma testării sistemului pe stand (curba trasată cu albastru).

Curbele indicate în figurile 8.18 ÷ 8.65 s-au trasat pentru bobinele 1 până la bobina 215, din 5 în 5 bobine, la variația tensiunii de alimentare a bobinei $U=(0.2 \div 1,4)U_n$.

Aceste curbe, datorită evoluției lor, au fost împărțite pe patru grupe calitative, în funcție de variația acestora cu tensiunea.

Datorită volumului mare al rezultatelor obținute, autorul a redat variația curbilor în Anexa 2, iar în conținutul tezei sunt ilustrate cele considerate mai reprezentative (figura 8.18, figura 8.19, figura 8.41, figura 8.43), câte una din fiecare grupă.

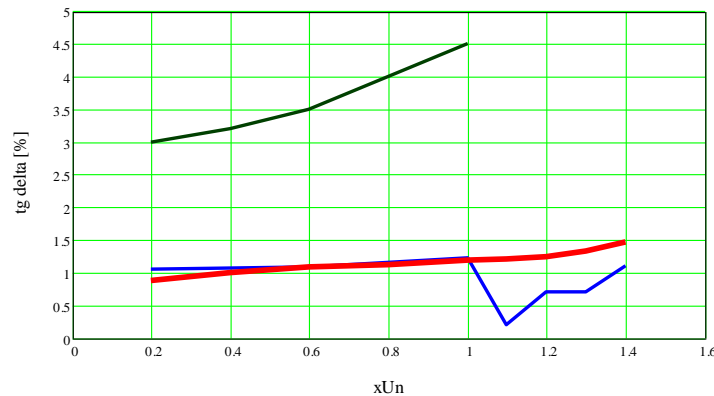


Figura 8.18. Variația $\text{tg } \delta = f(U)$ pentru bobina 1

La bobinele din prima grupă variația factorului de pierderi dielectrice, $\text{tg } \delta$, cu tensiunea din figura 8.18 arată că izolația este corespunzătoare, deoarece $\text{tg } \delta$ crește lent cu tensiunea. Cotul curbei practice indică valoarea tensiunii de prag, care poate fi citită direct de pe grafic. Faptul că valoarea $\text{tg } \delta$ scade cu tensiunea la cotul curbei se datorează creșterii preponderente, în funcție de tensiune, a curentului capacitiv față de componenta activă a curentului.

Se observă, de asemenea că, curba practică se găsește sub curba rezultată în urma simulării fapt ce se datorează fenomenului de uscare a izolației în condițiile exploatarei.

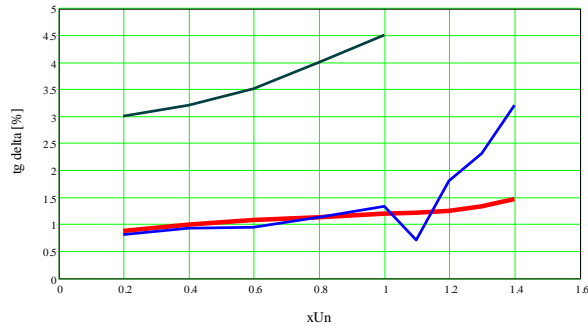


Figura 8.19. Variația $\text{tg } \delta = f(U)$ pentru bobina 5

La bobinele din grupa a doua Variația factorului de pierderi dielectrice, $\text{tg } \delta$, cu tensiunea din figura 8.19 arată că, curba practică urmărește curba rezultată în urma simulării aproximativ pe intervalul $0.2U_n - U_n$ iar de la valoarea tensiunii de prag aceasta crește brusc.

Totuși, în aceste condiții izolația este corespunzătoare deoarece curba practică nu depășește curba teoretică indicată în literatura de specialitate [146].

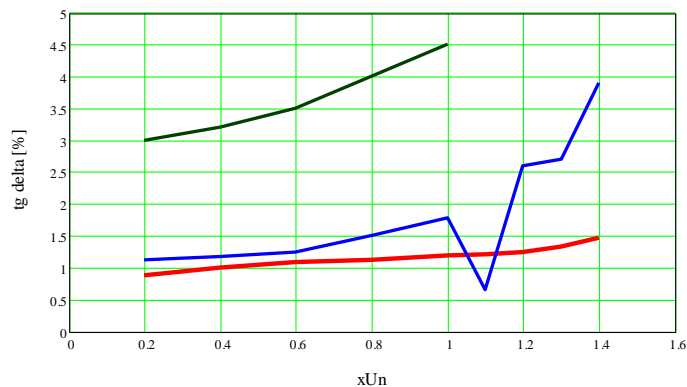
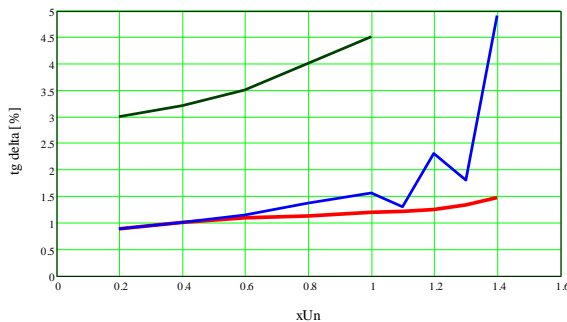


Figura 8.41. Variația $\text{tg } \delta = f(U)$ pentru bobina 107

La bobinele din grupa a treia se observă că factorul de pierderi dielectrice, $\text{tg } \delta$, cu tensiunea are o variație bruscă, curba practică apropiindu-se foarte mult de curba teoretică indicată în literatura de specialitate (figura 8.41)

Această variație a dus la străpungerea izolației din cauza golurilor de aer existente în masa izolației, amorsându-se descărcări (ionizări) puternice în aceasta.

Figura 8.43. Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 112

La bobinele din grupa a patra se constată că izolația a strâpuns, situație evidențiată prin faptul că, curba practică depășește curba teoretică indicată în literatura de specialitate.

Valoarea factorului de pierderi dielectrice mare indică existența în masa izolației a unui număr mare de incluziuni de aer și deci o calitate slabă a izolației.

f) În urma experimentărilor în stand s-a determinat că rigiditatea dielectrică, respectiv tensiunea minimă de străpungere a izolației unei bobine din eșantionul de 10 bobine testat din cele 215 bobine este de $U_{\text{str}}=40,5$ kV.

Prin simulare rezultatul obținut pentru tensiunea de străpungere a izolației este de $U_{\text{str}}=40$ kV (capitol 4, figura 4.28), ușor sub tensiunea reală.

8.5. Concluzii

Izolația este parte importantă a statorului, și deteriorarea ei în condițiile de exploatare duce la avarii grave ale generatorului, de aceea testarea izolației presupune un program complex de testare.

În urma testării s-au determinat valoric mărimile specifice prin care se apreciază starea izolației.

În baza valorilor mărimilor specifice s-au elaborat criteriile de apreciere a stării izolației.

Astfel:

Coeficientul de absorbție, k_{abs} , permite să se aprecieze starea de umiditate a dielectricului:

- $k_{\text{abs}} < 1,3$ indică o izolație umedă;
- $k_{\text{abs}} > 1,3$ indică o izolație uscată.

Indicele de polarizare, k_p , permite, de asemenea, să se aprecieze starea de umiditate a dielectricului, astfel:

- $k_p < 1,5$ indică o izolație umedă;
- $k_p > 1,5$ indică o izolație uscată.

Capacitatea electrică, C , a izolației indică, de asemenea, starea de umiditate a izolației. Dacă C_{70} / C_{20} este:

- $1 < C_{70} / C_{20} < 1,2 \div 1,3$ izolația este uscată;
- $C_{70} / C_{20} > 1,3$ izolația este umedă.

Prin intermediul măsurării permitivității relative, ϵ_r , s-au obținut informații privind higroscopicitatea materialelor izolante; creșterea permitivității relative indică creșterea gradului de umiditate al izolației.

Măsurarea descărcărilor parțiale permite sesizarea din timp a creșterii nivelului lor și deci evidențierea apariției unor defecte evolutive în masa izolației sau a îmbătrânirii generale a izolației.

Măsurarea descărcărilor parțiale se recomandă să fie efectuate periodic la echipamentele aflate în exploatare deoarece permit urmărirea procesului de îmbătrânire în timp a izolației.

Experimentările studiului s-au concretizat prin măsurători și încercări asupra unui număr de 215 bare ale hidrogeneratorului destinat pentru centrala Middle Kolab din India.

La fiecare bară în parte au fost măsurați principalii parametri pe baza cărora se estimează starea izolației, trasându-se curbele de variație a factorului de pierderi dielectrice $\tan \delta$ în funcție de numărul de bobine.

Rezultatele obținute, în urma măsurătorilor, grupate calitativ, au servit ca bază pentru compararea acestora cu rezultatele din urma simulărilor.

S-a constatat că rezultatele obținute prin simulare concordă cu cele experimentale, adică în izolația bobinei nu au apărut defecte.

Se constată deci că, prin simulare s-a obținut o valoare corectă a tensiunii de străpungere a izolației, ușor sub tensiunea reală, ceea ce permite ca simularea să poată înlocui în viitor, cel puțin parțial, o serie de experimentări.

În urma ridicării variația celor trei curbe ale tangentei unghiului de pierderi dielectrice pentru bobinele testate se constată că:

- curba rezultată în urma simulării se află sub curba dată de VDE 0530;
- curba rezultată în urma simulării urmărește curba obținută în urma măsurătorilor, în unele cazuri chiar suprapunându-se peste aceasta;
- în 98% dintre măsurători rezultatele obținute pentru variația tangentei unghiului de pierderi cu tensiunea s-au încadrat în limitele admisibile;
- în 2% dintre măsurători rezultatele obținute pentru variația tangentei unghiului de pierderi cu tensiunea nu s-au încadrat în limitele admisibile, producând deteriorarea izolației. Aceste cazuri au apărut atunci când curba practică a depășit curba dată prin VDE 0530.

9. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE. PERSPECTIVE

9.1. Concluzii finale

În urma studiului și experienței în domeniul izolațiilor s-a realizat o sinteză cu mărimile specifice izolației bobinajului stator al hidrogenatoarelor.

Pe baza acestor mărimi se stabilește calitatea izolației.

Mărimile specifice au servit ca bază pentru elaborarea anumitor criterii de acceptare a izolațiilor bobinajului stator.

Studiul termic al sistemului bobină – izolație - aer urmărește determinarea evoluției în timp a temperaturii din punctele izolației, având în vedere că de această evoluție depinde calitatea izolației.

Ecuatiile modelului matematic continuu al câmpului termic se exprimă prin ecuații cu derivate parțiale. Rezolvarea acestor ecuații impune integrarea lor în timp și spațiu. Constantele de integrare necesare pentru obținerea unor soluții unice, se determină impunând condiții inițiale și de frontieră. Condițiile inițiale stabilesc distribuția de temperatură la începutul procesului. Condițiile de frontieră stabilesc parametrii schimbului de căldură pe frontiera sistemului bobină – izolație – aer.

Pentru simularea câmpului termic cu mediul specializat ANSYS, având ca bază modelul matematic continuu s-a determinat modelul matematic cu elemente finite al câmpului termic.

Expresiile matricelor de rigiditate (conductivitate) și a vectorului încărcărilor termice, din modelul matematic cu elemente finite, se determină pe baza tipului de element finit ales.

În urma analizei câmpului termic din izolație se constată următoarele:

- distribuția spațială a temperaturii în sistem nu este uniformă, constându-se că în masa izolației temperatura crește brusc de la temperatura pe care o are izolația la exterior, adică temperatura mediului ambiant de 30°C la temperatura de 75°C în jurul bobinei;

- temperatura în masa izolației nu este uniformă, iar gradientul de temperatură nu este constant de-a lungul izolației. Gradientul de temperatură atinge valori maxime acolo unde distanța dintre suprafețele izoterme este mai mică.

Valorile de temperatură obținute cu modelul matematic cu elemente finite implementat în ANSYS furnizează valori ale temperaturii în izolație, valori care nu poate fi determinate în straturile izolației prin măsurători.

Elaborarea modelului matematic continuu al câmpului electric a avut la bază forma locală a legii inducției electromagnetice.

Condițiile de interfață (de trecere) s-au impus deoarece în sistemul bobină – izolație – aer intervin medii cu proprietăți diferite.

Condițiile inițiale și de frontieră pentru câmpul electric al sistemului bobină – izolație – aer a condus la scrierea condensată a modelului matematic continuu.

Obținerea modelului matematic cu elemente finite al câmpului electric are la bază modelul matematic continuu.

Deoarece modelul matematic continuu al câmpului electric este exprimat printr-o ecuație vectorială, în care intervine ca necunoscută o mărime vectorială, pentru rezolvarea acestuia se folosește metoda descompunerii pe componente, după axele sistemului de coordonate, obținându-se astfel trei ecuații scalare.

Pentru fiecare ecuație scalară s-a obținut câte un model matematic cu elemente finite, model denumit și model elemental.

Implementarea pe calculator implică ca ecuațiile modelului matematic cu elemente finite să fie scrise sub formă matricială.

În urma analizei potențialului electric și a câmpului electric din izolație se constată următoarele:

- distribuția acestora în sistemul bobină – izolație - aer nu este uniformă. Se constată că în masa izolației potențialul electric, respectiv câmpul electric ating valori maxime în colțurile izolației;

- la tensiunea de străpungere de $U_{str}=40kV$, se constată că în sistem, câmpul electric atinge valoarea maximă în colțurile izolației, unde aceasta străpunge; pe direcție longitudinală câmpul electric are o valoare constantă iar pe direcție transversală, variația acestuia este minimă;

- deoarece câmpul electric la tensiunea de străpungere nu are o variație uniformă în masa izolației, fluxul electric nu este constant de-a lungul izolației, atingând valori maxime în zonele în care izolația străpunge, adică în colțurile izolației.

Prin simularea și determinarea câmpului termic și a câmpului electric cu metoda elementelor finite apare posibilitatea unei optimizări a izolației. Astfel, se poate stabili grosimea izolației astfel încât să se obțină o grosime optimă a acesteia încă din faza de proiectare a statorului.

Validarea metodei cu elemente finite presupune o comparație între valorile obținute prin rezolvarea modelelor cu elemente finite ale câmpurilor termic și electric și valorile determinate experimental.

Simularea cu elemente finite s-a dovedit o alternativă viabilă în studiul câmpului termic și electric. Modelul matematic cu elemente finite se dovedește a fi cel mai în măsură să simuleze fenomenele reale care apar în sistemele de izolații.

Modelele matematice elaborate pentru studiul câmpului termic și al câmpului electric prezentate pot fi utilizate și în studiul altor sisteme de izolație cu geometrii mai complexe.

S-a realizat algoritmul de calcul pentru optimizarea dimensiunilor geometrice ale generatorului, după curentul nominal stator.

Având un grad de complexitate ridicat, algoritmul de calcul elaborat s-a realizat pe patru etape corelate între ele, datele rezultate dintr-o etapă de programare servind ca bază de intrare pentru următoarea etapă.

În elaborarea algoritmului, o importanță deosebită prezintă dimensionarea creștăturii stator respectiv dimensionarea izolației bobinei stator, deoarece acestea condiționează esențial diametrul statorului.

Implementarea algoritmului s-a realizat în limbajul de programare Visual Basic.

S-a optimizat operarea programului nominalizat mai sus prin crearea unei interfețe prietenoase cu utilizatorul.

S-a creat o bază de date puternică care permite realizarea, în funcție de puterea aparentă, tensiunea de alimentare a bobinajului stator și în funcție de turația hidrogenatoarelor, a unui studiu comparativ între diverse hidrogenatoare.

Rezultatele obținute utilizând algoritmul prezentat sunt folosite în cel de-al doilea program, cu care se verifică generatorul din punct de vedere electromagnetic.

Realizarea algoritmului de calcul pentru determinarea dimensiunilor geometrice ale generatorului reduce timpul destinat proiectării acestuia.

Prin elaborarea algoritmului se obține o dimensionare optimă a generatorului, respectiv a înfășurării bobinajului stator, ceea ce implică un consum minim de material, manoperă și totodată un preț de cost redus.

Sistemul de monitorizare pentru determinarea stării izolației a dus la posibilitatea de a preveni distrugerea hidrogenatorului ca urmare a distrugerii izolației în timpul funcționării acestuia.

Sistemul de monitorizare are în componența sa două subsisteme și anume: sistemul de achiziție date și sistemul fuzzy.

Sistemul de achiziție de date permite achiziționarea mărimilor de interes din proces și totodată, prin intermediul acestuia, s-a creat o bază puternică de date pentru starea curentă a izolației hidrogenatorului.

Prin sistemul fuzzy prezentat nu se realizează conducerea generatorului, ci el este conceput ca un sistem suplimentar util în funcționarea generatorului.

În urma implementării în MATLAB/SIMULINK a sistemelor de reglare, se constată, pe baza analizei formelor de undă că:

- pentru sistemul de reglare cu perturbație treaptă se constată că mărimea de la ieșire are o ușoară variație în jurul valorii de echilibru.

- calitatea reglării este mai slabă în cazul în care perturbația acționează atât asupra procesului cât și asupra regulatorului fuzzy, decât în cazul în care perturbația acționează doar asupra procesului.

- controlerul fuzzy realizat este unul superior unuia clasic, asigurând o evoluție mai rapidă a mărimii reglate către valoarea staționară, cu amplitudinea oscilațiilor amortizate mai mici.

Determinarea timpului de viață al izolației bobinajelor este foarte importantă, deoarece prin acesta se poate estima în orice moment durata de viață rămasă a izolației, evitând în acest fel apariția defectelor de izolație în timpul funcționării generatorului.

Pentru aceasta s-a conceput o metodă de estimare on-line a timpului de viață a izolației hidrogenatorului.

Utilitatea modelului este aceea că, pe baza estimării stabilite se poate evita avarierea hidrogenatorului ca urmare a defectelor de izolație, prin aceea că se poate decide, pe baza informațiilor culese, remedierea sistemului de izolație atunci când parametrii acestuia tind spre valorile limită inferioare admisibile.

Pentru elaborarea modelului au fost definiți atât lingvistic cât și matematic mai mulți termeni, fiind introdusă noțiunea de „matricea timpului de viață estimat”, cu diverse subcategorii: „inițial”, „curent”, „revizie programată”, „revizie neprogramată”, asociate la situații ce intervin în exploatare și pe baza cărora se determină „timpul de viață estimat normat”.

Modelul a fost conceput într-o formă matricială, fiind astfel ușor de implementat pe calculator.

Având în vedere că timpul de viață este estimat în valori raportate, modelul are un mare grad de generalitate putându-se aplica, practic, la toate mașinile electrice.

Izolația este parte importantă a statorului, și deteriorarea ei în condițiile de exploatare duce la avarii grave ale generatorului, de aceea testarea izolației presupune un program complex de testare.

Experimentările studiului s-au concretizat prin măsurători și încercări asupra unui număr de 215 bare ale hidrogenatorului destinat pentru centrala Middle Kolab din India.

În urma testării se determină valoric mărimile specifice prin care se apreciază starea izolației.

În baza valorilor mărimilor specifice s-au elaborat criteriile de apreciere a stării izolației.

La fiecare bară în parte au fost măsurați principalii parametri pe baza cărora se estimează starea izolației, trasându-se curbele de variație a factorului de pierderi dielectrice $tg \delta$ în funcție de numărul de bobine.

Rezultatele obținute, în urma măsurătorilor, grupate calitativ, au servit ca bază pentru compararea acestora cu rezultatele din urma simulărilor.

S-a constatat că rezultatele obținute prin simulare concordă cu cele experimentale.

Se constată deci că, prin simulare s-a obținut o valoare corectă a tensiunii de străpungere a izolației, ușor sub tensiunea reală, ceea ce permite ca simularea să poată înlocui în viitor, cel puțin parțial, o serie de experimentări.

9.2. Contribuții personale

- Realizarea de cercetări pentru determinarea stării izolației bobinajului stator a hidrogenatoarelor.

- Realizarea unei analize sintetice privind mărimile specifice care stau la baza izolațiilor bobinajului stator ale hidrogenatoarelor.

- Modelarea izolației și a bobinei stator și, pe baza modelelor matematice continue și discretizarea acestora în modele matematice continue cu elemente finite pentru determinarea câmpului termic și a câmpului electric în sistemul bobină – izolație -aer.

- Justificarea metodelor de asamblare a modelelor matematice continue cu elemente finite elementale în modelul matematic continuu cu elemente finite global.

- Stabilirea relațiilor matematice pentru calculul elementelor matricei de rigiditate și a vectorului termenilor liberi ce intervin în modelul matematic continuu cu elemente finite elemental.

- Introducerea unui operator Lagrange ce permite scrierea condensată a modelului matematic continuu cu elemente finite elemental.

- Stabilirea relațiilor de transformare de la un tip de element finit la altul pentru obținerea elementelor finite parametrice.

- Deducerea modelului matematic continuu al sistemului bobină – izolație – mediu (aer) necesar pentru realizarea unei analize cuplate (transfer termic la aplicarea tensiunii).

- Stabilirea etapelor de lucru ale sistemului bobină – izolație – mediu (aer) cu metoda elementelor finite.

- Stabilirea tipurilor de elemente finite care sunt utilizate pentru discretizarea domeniului de analiză.

- Definirea valorilor constantelor reale pentru bobina stator, izolație și pentru aer.

- Stabilirea proprietăților de material pentru bobină stator și izolația acesteia și aer.
- Determinarea modelului geometric al sistemului bobină – izolație – mediu (aer).
- Atribuirea tipului de element și a materialului, pentru fiecare mediu de lucru din domeniului sistemului.
- Stabilirea parametrilor rețelei de discretizare și tipul de rețea ce se va utiliza pentru sistemul bobină – izolație – mediu (aer).
- Stabilirea regimul analizei care este staționar (static).
- Aplicarea metodelor numerice cu elemente finite pentru rezolvarea sistemului de ecuații liniare și a celei pentru rezolvarea sistemului de ecuații neliniare, care formează modelul matematic al problemei și a criteriului de convergență
- Determinarea ecuațiilor matematice ale modelului matematic continuu și ale modelului matematic continuu cu elemente finite pentru câmpul termic și a matricei de rigiditate pentru modelarea și simularea temperaturii izolației a bobinajului stator, pentru obținerea unei temperaturi optime.
- Determinarea ecuațiilor matematice ale modelului matematic continuu pentru câmpul electric din sistem.
- Determinarea ecuațiilor matematice ale modelului matematic continuu cu elemente finite pentru câmpul electric din sistem.
- Deducerea condițiilor de frontieră ce trebuie impuse pentru rezolvarea modelului matematic continuu al câmpului electric.
- Stabilirea condițiilor de frontieră ce trebuie impuse pentru a asigura univocitatea soluției modelului matematic continuu al câmpului electric pentru sistemul bobină – izolație – mediu (aer).
- Determinarea ecuațiilor matematice ale câmpului electric, creat de bobină, cu metoda elementelor finite.
- Determinarea ecuațiilor matematice ale tensiunii de străpungere a izolației cu metoda elementelor finite.
- Determinarea ecuațiilor matematice ale densității fluxului electric în izolație, cu metoda elementelor finite.
- Determinarea temperaturii izolației, la diverse temperaturi ale bobinajului stator, cu metoda elementelor finite.
- Determinarea prin simulare a gradientului termic al izolației, în diferite puncte, față de mediul ambiant.
- Determinarea prin simulare a fluxului termic al izolației, în punctele critice ale izolației, la variația temperaturii bobinajului.
- Determinarea prin simulare a potențialului electric al izolației la tensiunea nominală $U_n = 11$ kV, a bobinajului stator.
- Determinarea prin simulare a câmpului electric în izolație la tensiunea nominală de alimentare, respectiv determinarea valorilor acestuia în punctele critice și compararea acestor valori cu cele obținute din practică.
- Determinarea prin simulare a tensiunii de străpungere a izolației, când bobinajul stator este alimentat la tensiunea de 40 kV, respectiv determinarea prin

- simulare a câmpului electric, a densității fluxului electric și distribuția tensiunii de străpungere în izolație.
- Determinarea prin simulare a tangentei unghiului de pierderi dielectrice, $\tan\delta$, la diferite valori ale tensiunii de alimentare, tensiunea de alimentare variind de la $U=(0,2 \div 1,4)U_n$.
- Elaborarea algoritmului și a programului de calcul al dimensiunilor geometrice al unui generator sincron.
- Realizarea unei interfețe prietenoase pentru programul de calcul.
- Compatibilizarea programului de calcul al dimensiunilor geometrice al unui generator sincron cu programul pentru calculul electromagnetic al generatorului sincron existent în cadrul firmei SC UCM Reșița.
- Conceperea și realizarea unui sistem de monitorizare pentru determinarea stării izolației.
- Acest sistem de monitorizare a dus la posibilitatea de a preveni distrugerea hidrogenatorului ca urmare a distrugerii izolației în timpul funcționării acestuia.
- Conceperea unui sistem pentru achiziționarea datelor pentru izolația bobinelor hidrogenatorului.
- S-a realizat în limbajul grafic LabView un program pentru monitorizarea stării curenți a izolației hidrogenatorului.
- S-a conceput și realizat un sistem de transmitere date între sistemul de achiziție și cel de monitorizare.
- S-a conceput un sistem fuzzy pentru reglarea debitului de aer având ca scop menținerea unei temperaturi constante în bobinajul stator.
- Conceperea unui algoritm pentru estimarea continuă a timpului de viață al izolației bobinajului hidrogenatorului.
- Elaborarea unui model matematic on-line pentru estimarea continuă a timpului de viață al izolației bobinajului hidrogenatorului.
- Testarea pe stand a bobinelor stator și determinarea valorilor mărimilor specifice izolațiilor.
- Interpretarea valorilor mărimilor specifice izolațiilor.
- Trasarea graficelor variației factorului de pierderi dielectrice în funcție de numărul de bobine
- Trasarea graficelor variației factorului de pierderi dielectrice în funcție de tensiunea de alimentare în trepte de $0,2 U_n$ până la tensiunea de $1,4 U_n$.
- Compararea valorilor mărimilor simulate cu mărimile rezultate în urma testării bobinelor stator.

9.3. Perspective

Se constată că noile metode de testare ale izolației prin modelare și simulare sunt foarte puțin abordate în literatura de specialitate.

Modelarea și simularea izolațiilor a permis determinarea cu exactitate a diverselor fenomene ce apar în izolații.

De aceea cercetările se vor axa în continuare pe modelarea și simularea izolațiilor bobinelor stator și pentru alte hidrogenatoare.

Un alt domeniu de interes îl constituie sistemul de monitorizare a stării izolației bazat pe logica fuzzy.

Se vor face cercetări în acest domeniu prin implementarea acestuia la alte hidrogeneratoare.

Pe baza estimării on-line a timpului de viață al izolației, se vor cerceta diverse hidrogeneratoare pentru în vederea combaterii regimurilor de avarie.

Prin extensie se poate determina un model de estimare a timpului de viață și pentru izolația sistemului rotor.

BIBLIOGRAFIE

1. Arkkio A., Hyötyniemi H., Jover P., Kokko V., Lindh T., Negrea M. - **Fault Diagnostic for Electrical Machines** - Helsinki University of Technology, Laboratory of Electromechanics, Lecture Series 15, 137 p., Espoo 2005
2. **ANSYS Commands Reference** Book, ANSYS Inc. 2005
3. **ANSYS Elements Reference**, ANSYS Inc. 2005
4. **ANSYS Operations Guide**, ANSYS Inc. 2005
5. **ANSYS Basic Analysis Guide**, ANSYS Inc. 2005
6. **ANSYS Advanced Analysis Techniques Guide**, ANSYS Inc. 2005
7. **ANSYS Modeling and Meshing Guide**, ANSYS Inc. 2005
8. **Distributed ANSYS Guide**, ANSYS Inc. 2005
9. **ANSYS Contact Technology Guide**, ANSYS Inc. 2005
10. **ANSYS Thermal Analysis Guide**, ANSYS Inc. 2005
11. **ANSYS Low-Frequency Electromagnetic Analysis Guide**, ANSYS Inc. 2005
12. **ANSYS Coupled-Field Analysis Guide**, ANSYS Inc. 2005
13. ASTM D1868 – Test method for detection and measurement of partial discharge (Corona) pulses in evaluation of insulation system
14. Babescu Marius – **Mașina sincronă. Modelare. Identificare. Simulare** – Editura Politehnică, Timișoara, 2003
15. Baker A.E., Gully A.M., Wheeler J.C.G. - **Finite element modeling of nonlinear stress grading materials for machine end windings** - International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (Conf. Publ. No. 487), pages 265–268, 2002.
16. Besbes M., Ren Z., Razek A. - **A Generalized Finite Element Model of Magnetostriction Phenomena** - IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 37, No. 5, pp. 3324–3328, September 2001
17. Boulter E.A., Stone G.C. - **Historical development of rotor and stator winding insulation materials and systems** - IEEE Electrical Insulation Magazine, 20(31), pp. 25–39, 2004
18. Boggs S., Yingneng Zhou J. - **Dielectric property measurement of nonlinear grading materials** - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2000, volume 2, pages 764–767, 2000
19. Biriescu Marius – **Mașini electrice rotative. Parametrii, caracteristici, încercări** – Editura de Vest, Timișoara, 1997
20. Belahcen, A. - **Magnetoelastic Coupling in Rotating Electrical Machines** - IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41, No.5, pp. 1624 – 1627, 2005
21. Burakov A., Arkkio A. - **Electrical Machines with Parallel Stator Windings** - Proceedings of XVII International Conference on Electrical Machines, 4 pages, Chania, Crete Island, Greece, September 2006.
22. Burlacu Gabriel, ș.a. – **Fiabilitatea, mentenabilitatea și disponibilitatea sistemelor tehnice** - Editura Matrix ROM, București, 2005
23. Covrig Mircea, Leonard Melcescu, Nicolae Vasile – **Mașini electrice. Probleme specifice. Mașini de tip sincron** – Editura Printech, 2004

24. Covrig Mircea, Pârlog Cristian, Cepișcă C., Ochiană L., Vasile N. – **Lecții de electrotehnică** - Editura ICPE, București, 2001
25. C.E.I 270 – **Electrical machines. Tests**
26. Cioc I., Nica C. - **Proiectarea mașinilor electrice** - Editura Didactică și Pedagogică, București, 1994
27. Damjanic F., Owen D.R.J. - **Mapped Infinite Elements in Transit Thermal Analysis** - Computers and Structures, vol. 18, no.4, 8 pages, 1984
28. Danikas M.G., Karlis A.D. - **Diagnostic Techniques in Rotating Machine Insulation: A Diagnostic Technique for Model Stator Bars Based on the Maximum Partial Discharge Magnitude** - Taylor & Francis, Volume 34, pp. 905 – 916, Number 8 / August 2006
29. Diemendash N.A. - **Three Dimensional Finite Element Vector Potential Formulation of Magnetic Fields in Electrical Apparatus** - IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS – 10, no. 8, 6 pages, 1981
30. Dissado L.A., Dodd S.J., Champion J.V., Williams P.I., Alison J.M. - **Propagation of electrical tree structures in solid polymeric insulation** - IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4, No. 3, pp. 259–279, June 1997
31. Downing S., Reunanen A., Saari J., Arkkio A. - **Losses, Cooling, and Thermal Analysis of Electrical Machines** - Helsinki University of Technology, Lecture Series 16, Espoo 2005
32. Dreher T., Meunier G. - **3D line current model of coils and external circuits** - IEEE Trans. on Magn., Vol. 31, No. 3, pp. 1853-1856, May 1995.
33. Dragomir Toma-Leonida – **Elemente de teoria sistemelor** – vol.1, Editura Politehnică, Timișoara, 2004
34. Dragomir Toma-Leonida – **Teoria sistemelor. Aplicații** – vol.2, Editura Politehnică, Timișoara, 2005
35. Duraisamy V., D.Somasundareswari, S.N.Sivnandam - **An approach for condition monitoring system** - Proceedings of National Conference of Energy Monitoring, Erode, January 24-25 2002, pp 73-76.
36. Duraisamy V., D.Somasundareswari, S.N.Sivnandam - **A scheme for designing fuzzy logic fault detector for certain dynamic system** - Proceedings of National Conference on Advanced Computing, Coimbatore, Feb 2002, pp 276 – 281.
37. Duraisamy V., D.Somasundareswari, S.N.Sivnandam - **Design of fuzzy system fault detector for certain engineering application** - proceeding of the first National conference on Modern Trends in Electrical and Instrumentation Systems, Coimbatore, March 2002, pp 315 – 319.
38. Duraisamy V., N. Devarajan, D.Somasundareswari, S.N.Sivanandam - **Designing of fuzzy logic fault detector with hybrid membership function** - Proceedings of the national Conference on Power Conversion and Industrial Control, Palakkad, January 2003, pp 4.73 – 4.76
39. Emery F.T. - **Partial discharge, dissipation factor, and corona aspects for high voltage electric generator stator bars and windings** - IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 12(2): pp.347–361, 2005
40. Fișă material – **Calmicaglass 2005** – Isovolta, 2005, 2 pg.
41. Fișă material – **Cu-P2S-155** – Isovolta, 2005, 1 pg.
42. Filip Ioan, Proștean Octavian, Szeidert Iosif, Vașar Cristian – **Design and simulation of an adaptive control system with application to excitation**

- control of a synchronous generator** - IASTED International Conference Applied Simulation and Modeling, ASM 2002 - CRETE, GREECE
43. Filip Ioan - **Structuri și algoritmi de conducere adaptivă** - Editura "Orizonturi Universitare", Timișoara, 2003
 44. Farahani M., Gockenbach E., Borsi H. - A method for evaluation of insulation systems for high voltage rotating machines - ICPADM, pp.1108-1111, 2003
 45. Fu W. N., Zhou P., Lin D., Stanton S., Cendes Z. J. - **Modeling of Solid Conductors in Two-Dimensional Transient Finite-Element Analysis and Its Application to Electric Machines** - IEEE Transactions on Magnetics, VOL. 40, NO. 2, pp.426-434, March 2004
 46. Gheorghiu M - **Verificarea izolației echipamentelor electrice** - Editura Tehnică, București, 1984
 47. Gafvert U. - **Dielectric response analysis of real insulation systems** - IEEE International Conference on Solid Dielectrics. ICSD 2004, pages 1-10 Vol.1, 2004
 48. Gârlașu Ștefan, Răduca Eugen - **Bazele teoretice ale logicii fuzzy** - Editura "Eftimie Murgu", Reșița, 2000
 49. Gârlașu Ștefan - **Inteligență artificială. Sisteme logice fuzzy** - Analele Universității "Eftimie Murgu", Reșița, pp. 189-192, 1997
 50. Gârlașu Ștefan - **Sisteme logice fuzzy cu mulțimi nuanțate utilizate în analiza proceselor tehnice** - Simpozion TET-FIH, Hunedoara, pp. 1-13, 1997
 51. Gârlașu Ștefan - **Generalizarea procesului de inferență** - Analele Universității "Eftimie Murgu", Reșița, pp. 31-42, 1998
 52. Goffaux R., Comte B., Cottet M., Fruth B. - **Quality assurance of generator and motor insulation system** - IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pages 512-515, 2000
 53. Gulski E., Kreuger F. H. - **Computer-aided recognition of discharge sources** - IEEE Trans. Of Electrical Insulation, vol. 27, No. 1, pp. 82-92, 1992
 54. H. J. van Breen, Gulski E., Smit J. J. - **Several aspects of stator insulation condition based maintenance** - IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, IN, USA, pages 446-449, 2004
 55. Heyman Steven Mark, - **Bazele Visual Basic 4** - Editura Teora, 1996
 56. Horvath T., ș.a. - **Încercarea izolației electrice** - Editura Tehnică, București, 1982
 57. Hudon C., Belec M. - **Partial discharge signal interpretation for generator diagnostics** - IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 12(2), pp. 297-319, 2005
 58. IEC 34, - Rotative electrical machines
 59. IEC 85, - Thermal classification of the electrical insulation
 60. IEC 72, - Exit sixes and values of the rotative machines
 61. IEC 93, - Method for testing the transversal and superficial resistance of the electrical insulation
 62. IEC 167, - Methods for testing the insulation resistance of the materials
 63. IEC 234, - Methods for testing the dielectric rigidity of the insulation materials
 64. IEC 279, - Resistance measurement for alternative machines
 65. IEC 529, - Protection degree classifying
 66. IEC 894, - Methods for calculation losses tgδ
 67. IEC 270, - Measurement methods for partial discharges

68. IEEE 4, - Techniques for high-voltage testing
69. IEEE 43, - Recommended practice for testing the insulation resistance of rotating machinery
70. IEEE 67, - Guide for operation and maintenance of turbine generator
71. IEEE 115, - Test procedures for synchronous machines
72. IEEE 286, - Recommended practice for measurement of loss factor of rotating machinery stator coil insulation
73. IEEE 433, - Recommended practice for insulation testing of large AC rotating machinery with high voltage and very low frequency
74. IEEE 492, - Guide for operation and maintenance of hydrogenerators
75. IEEE 1043, - Recommended practice for voltage endurance testing of from-wound bars and coils
76. IEEE 95 - Recommended practice for insulation testing of large AC rotating machinery with high direct voltage
77. IEEE 1553 -Voltage Endurance Testing of Form-Wound Coils and Bars for Hydrogenerators
78. Islam, M. J., Arkkio, A. - ***Circulating Currents in the Parallel Stator Conductors of Electrical Machines*** - Proceedings of XVII International Conference on Electrical Machines, 10 pages, Chania, Crete Island, Greece, September 2006
79. Jin I. - ***The Finite Element Method in Electromagnetics*** - John Wiley and Sons.Inc, New York, 1993
80. Kaljević I. - ***An Infinite Boundary Element Formulation for Three Dimensional Potential Problems*** - International Journal for Numerical Method in Engineering, vol. 35, no. 10, 1992
81. Kaufhold M, s.a - Interface phenomena in stator winding insulation - challenges in design, diagnostics and service experience - IEEE EIMag., vol.18, nr.2, pp.27-36, Mar.2002
82. Kheirmand A., Leijon M., Gubanski S. M. - ***Advances in online monitoring and localization of partial discharges in large rotating machines*** - IEEE Transactions on Energy Conversion, 19(1), pp. 53-59, March 2004
83. Kilyeni, Șt. - ***Metode numerice - Vol .I și Vol. II*** - Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 1997
84. Kuo-Peng P., Sadowski N., Batistela N.J., Bastos J.P.A. - ***Coupled Field and Circuit Analysis Considering the Electromagnetic device Motion*** - IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 36, No. 4, pp. 1458-1461, July 2000
85. Kouadria D., Watt G. - ***Partial discharge patterns and the identification of defects in high voltage stator windings insulation*** - Dielectric Materials, Measurements and Applications Conf. Publ. No. 473, pp. 236-240, IEE 2000
86. Lazăr I., - ***Metoda elementelor de frontieră în inginerie*** - Presa Universitară Clujeană, Cluj - Napoca, 1997
87. Leonard P.J., Rogerd D. - ***Modelling voltage forced coils using reduced scalar potential method*** - IEEE Trans. on Magn., Vol. 28, No.2, pp. 1615-1617, March 1992
88. Leung Y.C., Mac Alpine J.M.K. - ***Condition Monitoring of High-Voltage Motors*** - Proc. of the 1st Int. Conference on Insulation Condition Monitoring of Electrical Plant, Wuhan University, China, pp.117-122, , Sep. 24-26, 2000

89. Li H., Saigal S. - **Mapped Infinite Elements for 3D Vector Potential Magnetic Problems** - International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 37, 12 pages, 1994
90. Liuba Gheorghe - Testarea mașinilor electrice de curent alternativ - Editura „Universitatea Eftimie Murgu”, Reșița, 2003
91. Liuba Gheorghe - Metode moderne de determinare experimentală a parametrilor electrici ai mașinilor electrice de curent alternativ - Editura „Universitatea Eftimie Murgu”, Reșița, 2003.
92. Liuba Gh., M. Biriescu, Voicu Groza - Asupra încercării mașinilor electrice folosind un sistem de achiziție și prelucrare a datelor - Analele Universității “Eftimie Murgu”, 1996
93. Liuba Gheorghe - Introducere în teoria mașinilor și acționărilor electrice - Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 2005
94. Mayergoyz I.D. - **A New Scalar Potential Formulation for Three Dimensional Magnetostatic Problems** - IEEE Transactions on Magnetics, vol. MAG - 23, no.6, 8 pages, 1985
95. Mitsui, H., Yoshida, K., Inoue, Y., Kenjo, S. - **Thermal Cyclic Degradation of Coil Insulation for Rotating Machines** - IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS- 102, No. 1, pgs. 67-73, January 1983
96. McDermott T.E., Zhou P., Gilmore J., Cendes Z. - **Electromechanical system simulation with models generated from finite element solutions** - IEEE Trans. on Magn., Vol. 33, No. 2, pp. 1682-1685, March 1997
97. National Instruments - **User Manual** - Dallas, 1999
98. National Instruments - Reference Guide - Dallas, 1999
99. Negrea, M., Jover, P., Arkkio, A. - **A comparative investigation of electrical parameters for fault detection and condition monitoring in induction motors - stator winding current and electromagnetic flux** - Proceedings of XVII International Conference on Electrical Machines, 12 pages, Chania, Crete Island, Greece, September 2006
100. Precup Radu-Emil, Preitl Ștefan - **Fuzzy controllers** - Editura “Orizonturi Universitare”, Timișoara, 1999
101. Proștean Octavian, Filip Ioan, Vașar Cristian, Szeidert Iosif - **Modelare și simulare** - Editura “Orizonturi Universitare”, Timișoara, 2006
102. Proștean Octavian - **Automatica** - Editura “Politehnica”, Timișoara, 2003
103. Preitl Ștefan, Precup Radu - Emil - **Introducere în controlerul fuzzy** - Editura Tehnică, București, 1997
104. Răduca E., Răduca M. - **Miniștand pentru măsurători complexe** - Sesiunea de Com. Univ. Oradea, 30-31 mai 1997, Analele Universității Oradea, pg. 72 - 75
105. Răduca E., Răduca M. - **Analizor de semnături în LabVIEW** - Sesiunea de Com. Univ. Oradea, 30-31 mai 1997, Analele Universității Oradea, pg. 76 - 81
106. Răduca M. - **Abordări moderne în conducerea adaptivă a proceselor complexe** - Referat nr.1, Universitatea Politehnică Timișoara, 2000, 57 pg.
107. Răduca M. - **Utilizarea sistemelor fuzzy în conducerea proceselor cu aplicații în procesele energetice** - Referat nr.2, Universitatea Politehnică Timișoara 2002, 120 pg.
108. Răduca M. - **Preliminary electromagnetic dimensioning importance in hydrogenerators design** - Al VI-lea Simpozion Internațional „Tinerii și cercetarea multidisciplinară” Timișoara 23-24 sept 2004, , pag. 221-228, 2004
109. Răduca E. , Răduca M. - **Technical state analyze of medium power bulb hydrogenerators for the re-technology** - PROCEEDINGS 3rd Conference

- about Construction, Shapin & Design, Novi Sad, Serbia & Montenegro, pag. 145-148, May 2004
110. Răduca M., ș.a. - **Re-technology of medium power bulb hydrogenerators** - PROCEEDINGS 3rd Conference about Construction, Shapin & Design, Novi Sad, Serbia & Montenegro, pag. 151 - 156, May 2004
111. Răduca M., ș.a. - **Hydrogenerators CAD for technical Offers** - MET 04, Fourth International Congress, Varna, Bulgaria, Proceedings, vol.5, pag. 172 - 174, 2004
112. Răduca M., ș.a. - **Data acquisition system through Intranet Network** - MET 04, Fourth International Congress, Varna, Bulgaria, Proceedings, vol.5, pag. 179 - 181, 2004
113. Răduca M., ș.a. - **Hydrogenerators CAD for technical Offers** - Machine-building & Elektrotehnika magazine, No.9/2004 - special edition, pag. 93 - 95, 2004
114. Răduca M., ș.a. - **Hydrogenerator stator rehabilitation methods** - Al VII-lea Simpozion International "Tinerii și Cercetarea Multidisciplinară", Analele Universității "Eftimie Murgu" Reșița, Fascicola I, pag. 255-260, 2005
115. Răduca M., ș.a. - **Influence of rotor geometrical dimensioning regarding hydro generators performances** - DEMI 2005 - 7th International Conference on Accomplishments of electrical and mechanical industries, Zbornik Radova Proceedings, Banja Luka, Bosnia - Herțegovina, pag. 483 - 489, 2005
116. Răduca M., ș.a. - **Hydrogenerator rotor rehabilitation methods** - Al VII-lea Simpozion International "Tinerii și Cercetarea Multidisciplinară", Analele Universității "Eftimie Murgu" Reșița, Fascicola I, pag. 261-266, 2005
117. Răduca M., ș.a. - **The optimization of electrical insulation testing at high power hydrogenerators** - Al VIII-lea Simpozion Internațional "Tinerii și cercetarea multidisciplinară", Timișoara, pag. 223-228, 2006
118. Răduca M., ș.a. - **The checking at vibrations of hydro generator steel parts** - Konstruisanje, Oblikovanje i Dizajn - KOD 2006 - Zbornik Radova Proceedings, Palic, Novi Sad, pag. 225 - 228, 2006
119. Răduca M. - **The modeling and simulation of braking-off voltage at hydro generator stator winding insulation** - Analele Universității "Eftimie Murgu" Reșița, Fascicola I, Facultatea de Inginerie, No.1 - 2006 ISSN 1453 - 7394, Editura "Eftimie Murgu" Reșița
120. Răduca M. - **The modeling and simulation of temperature transfer at hydro generator stator winding insulation** - Analele Universității "Eftimie Murgu" Reșița, Fascicola I, Facultatea de Inginerie, No.1 - 2006 ISSN 1453 - 7394, Editura "Eftimie Murgu" Reșița
121. Răduca M., ș.a. - **Investigation of Detection Circuits for Fast Level Detection within a SDARS Diversity System** - Analele Universității "Eftimie Murgu" Reșița, Fascicola I, Facultatea de Inginerie, No.1 - 2006 ISSN 1453 - 7394, Editura "Eftimie Murgu" Reșița
122. Răduca M., ș.a. - **Synchronizing multiple DACs and ADCs for future use in a 4x4 MIMO demonstrator** - Analele Universității "Eftimie Murgu" Reșița, Fascicola I, Facultatea de Inginerie, No.1 - 2006 ISSN 1453 - 7394, Editura "Eftimie Murgu" Reșița
123. Rațiu, S. s.a. - **Rezolvarea ecuației conducției termice prin metoda elementului finit**, Sesiunea de comunicări științifice cu participare Internațională, Hunedoara, pag. 136-143, oct. 2000
124. Schmidt E. - **Representation of Laminated and Slotted Configurations in the Finite Element Analysis of Electrical Machines and**

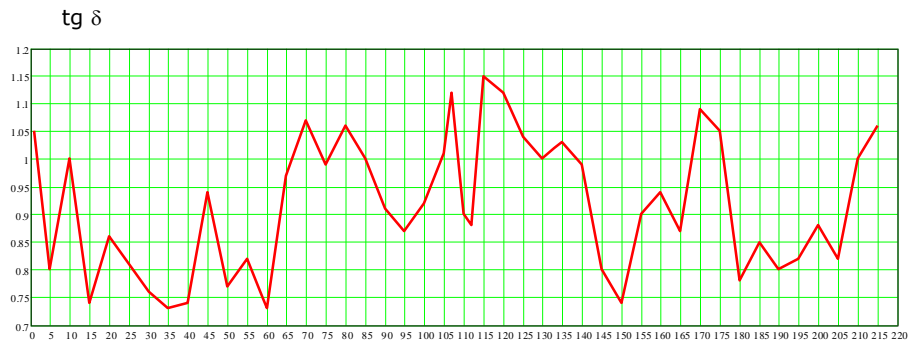
- Transformers** - Digests of the 14th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, COMPUMAG, Saratoga Springs (NY, USA), 2003.
125. Soran Ioan Felician, ș.a. - **Modelarea sistemelor de conversie a energiei** - Editura ICPE, București, 1998
 126. Stănciulescu Florin - **Modelarea sistemelor de mare complexitate** - Editura Tehnică, București, 2003
 127. Standard Român SR EN 60034-3, - **Mașini electrice rotative. Partea 3: Cerințe specifice pentru mașini sincrone tip turbo** - Martie 1999
 128. Standard Român SR EN 60034-18-31+A1, - **Mașini electrice rotative. Partea 18: Evaluarea funcțională a sistemelor de izolație. Secțiunea 31: Proceduri de încercare pentru înfășurări performante - Evaluarea termică și clasificarea sistemelor de izolație utilizate în mașinile electrice până la 50 MVA și 15 kV, inclusiv** - Decembrie 1999
 129. Standard Român SR EN 60034-15, - **Mașini electrice rotative. Partea 15: Niveluri de ținere la impuls de tensiune ale mașinilor rotative de curent alternativ cu bobine stator performante** - Noiembrie 2001
 130. Standard Român SR EN 60034-18-1/A1, - **Mașini electrice rotative. Partea 18: Evaluarea funcțională ale sistemelor de izolație. Secțiunea 1: Principii directe generale** - Noiembrie 2001
 131. Stone G. C., Boulter A., Culbert I., Dhirani H. - **Electrical insulation for rotating machines** - IEEE Press series on Power Engineering. IEEE Press, 2004.
 132. Stone G. C. - **Recent important changes in IEEE motor and generator winding insulation diagnostic testing standards** - IEEE Transactions on Industry Applications, 41(1): pp.91-100, January-February 2005.
 133. Stone G.C. - **Partial discharge diagnostics in electrical equipment insulation condition assessment** - IEEE Trans. DEI 12, pp.891-904, 2005
 134. Sullivan C.R. - **Computationally efficient winding loss calculation with multiple windings, arbitrary waveforms, and two- or three-dimensional field geometry** - IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 16, no. 1, 2001.
 135. Szűcs A., - **Advanced Utilization of Macro Elements that Replace the Multi-Conductor Windings in the Finite Element Analysis of Rotating Electrical Machines** - Laboratory Report, No. 66, 12 pages, Helsinki University of Technology, Laboratory of Electromechanics, 2001
 136. Tătucu I, - **Modelarea câmpului electromagnetic și a câmpului termic** - Editura Eftimie Murgu Reșița 2002
 137. Tătucu, I., Gruescu, L. - **The computer aided analysis of the electromagnetic field** - Analele Universității Eftimie Murgu, Reșița, an VII, nr.2, Tom I, 2000
 138. Tătucu, I., Gruescu, L. - **Contribuții la sistematizarea modelelor matematice ale câmpului electromagnetic folosite în metoda elementelor finite** - Analele Universității Eftimie Murgu, Reșița, an V, nr.2, 1998
 139. Vașar Cristian, Szeidert Iosif - **Automatizări. Modelare și simulare** - Editura „Politehnica”, Timișoara, 2001
 140. Vogelsang, R.; Weiers, T.; Frohlich, K.; Brutsh, R. - **Electrical breakdown in high-voltage winding insulations of different manufacturing qualities** - Electrical Insulation Magazine, IEEE Volume 22, Issue 3, Page(s): 5 - 12, May-June 2006
 141. Vogelsang R., - **Time to breakdown of high voltage winding insulation with respect to their microscopic properties and manufacturing qualities** - Proceedings of the 7th International Conference on

- Properties and Application of Dielectric Materials, Nagoya, Japan, pp. 286 – 292, ICPADM 2003
142. Vogelsang R., Fruth B., Fröhlich K. - **Detection of Electrical Tree Propagation in Generator Bar Insulations by Partial Discharge Measurements** - Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Application of Dielectric Materials, Nagoya, Japan, pp. 281 – 285, ICPADM 2003
143. Vogelsang R., Fruth B., Farr T., Fröhlich K. - **Detection of electrical tree propagation by partial discharge measurements** - 15th International Conference on Electrical Machines, ICEM 2002, Brügge, August 2002
144. Vogelsang R., Brütsch R., Farr T., Fröhlich K. - **Electrical tree propagation along barrier-interfaces in epoxy resin** - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP, Cancun, pp. 946 – 950, 2002
145. Vogelsang R., Brütsch R., Fröhlich K. - **Effect of electrical tree propagation on breakdown in mica insulations** - 13th Int. Symp. on High Voltage Engineering, ISH, Delft, The Netherlands, Conference Proceedings, pp. 1–4, Aug. 2003
146. VDE 0530 – **Rotating electrical machines**
147. Weiss, J. - **Efficient Finite Element Solution of Multipole Eddy Current Problems** - IEEE Transactions on Magnetics, vol. MAG – 12, no.6, 1988
148. Wu W., Dunlop J.B., Collocott S.J., Kalan B.A. - **Design Optimization of a Switched Reluctance Motor by Electromagnetic and Thermal Finite Element Analysis** - IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 39, No. 5, September 2003.
149. Yue B., Chen X., Cheng Y., Song J., Xie H. - **Diagnosis of stator winding insulation of large generator based on partial discharge measurement** - Energy Conversion, IEEE Transactions on Volume 21, Issue 2, Page(s): 387 – 395, June 2006
150. Zienkiewicz O.C. - **The Finite Element Method** - McGraw-Hill Company, London, 1997
151. Zhou P., Fu W. N., Lin D., Stanton S., Cendes Z. J., Xu L. - **Numerical modeling of electrical machines and its application** - IEEE Industry Applications Soc. 37th Annu. Meeting, Pittsburgh, PA, 10 pages, Oct. 13–18, 2002

Anexa 1

Variația factorului de pierderi dielectrice ($\text{tg } \delta$) cu tensiunea pentru cele 215 bobine testate

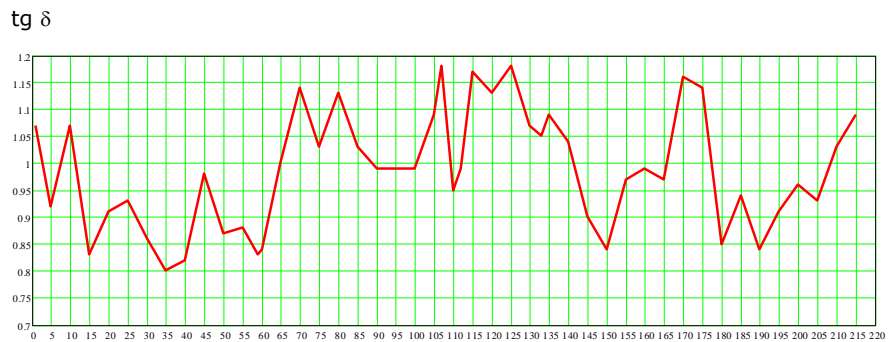
Factorul de pierderi dielectrice $\text{tg } \delta$ la $0,2 U_n$



Nr. bobină

Figura 8.9. Variația factorului de pierderi dielectrice $\text{tg } \delta$ la $0,2 U_n$ în funcție de numărul de bobine

Factorul de pierderi dielectrice $\text{tg } \delta$ la $0,4 U_n$

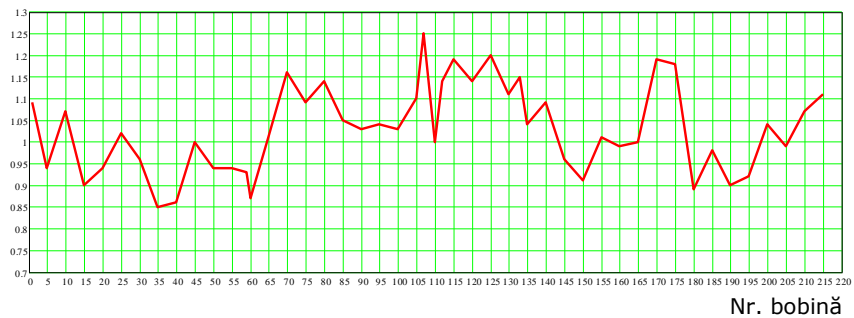


Nr. bobină

Figura 8.10. Variația factorului de pierderi dielectrice $\text{tg } \delta$ la $0,4 U_n$ în funcție de numărul de bobine

Factorul de pierderi dielectrice $\text{tg } \delta$ la $0,6 U_n$

$\text{tg } \delta$



Nr. bobină

Figura 8.11. Variația factorului de pierderi dielectrice $\text{tg } \delta$ la $0,6 U_n$ în funcție de numărul de bobine

Factorul de pierderi dielectrice $\text{tg } \delta$ la $0,8 U_n$

$\text{tg } \delta$

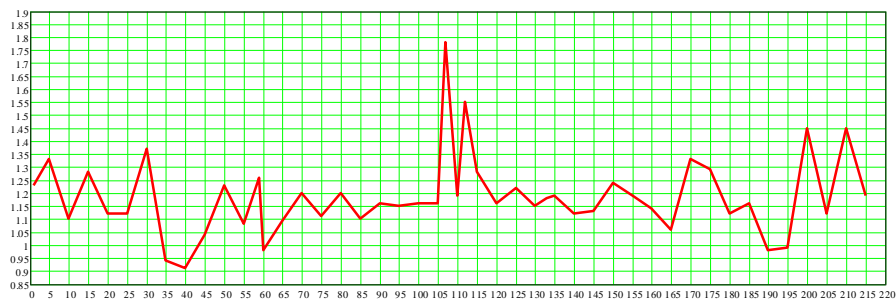


Nr. bobină

Figura 8.12. Variația factorului de pierderi dielectrice $\text{tg } \delta$ la $0,8 U_n$ în funcție de numărul de bobine

Factorul de pierderi dielectrice $\text{tg } \delta$ la U_n

$\text{tg } \delta$



Nr. bobină

Figura 8.13. Variația factorului de pierderi dielectrice $\text{tg } \delta$ la U_n în funcție de numărul de bobine

Factorul de pierderi dielectrice $\text{tg } \delta$ la $1,1 U_n$

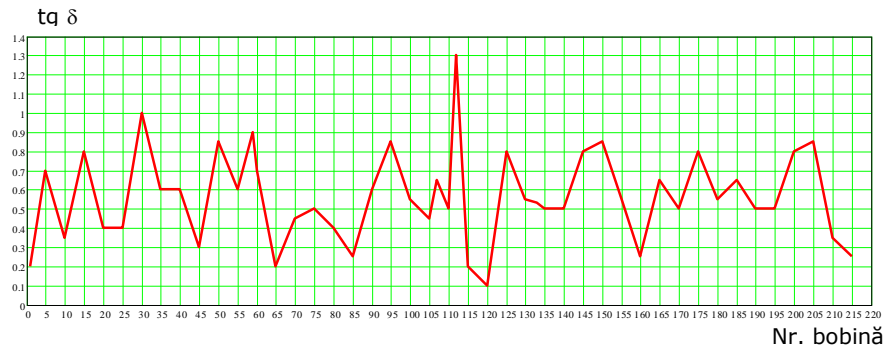


Figura 8.14. Variația factorului de pierderi dielectrice $\text{tg } \delta$ la $1,1 U_n$ în funcție de numărul de bobine

Factorul de pierderi dielectrice $\text{tg } \delta$ la $1,2 U_n$

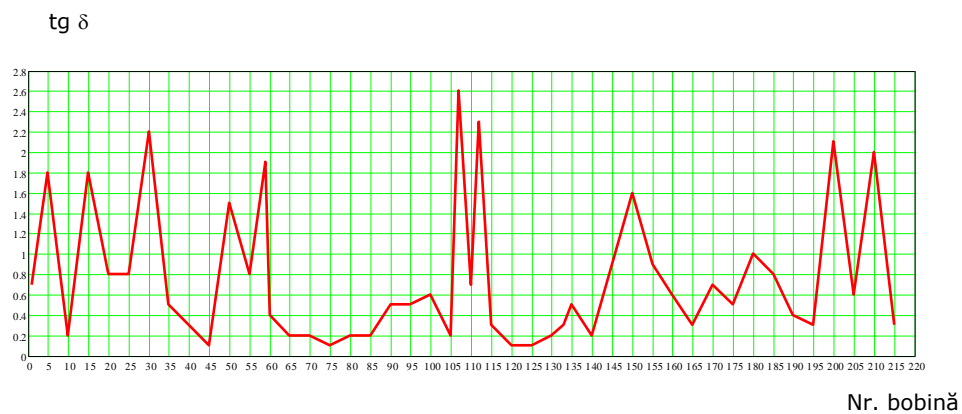


Figura 8.15. Variația factorului de pierderi dielectrice $\text{tg } \delta$ la $1,2 U_n$ în funcție de numărul de bobine

Factorul de pierderi dielectrice $\text{tg } \delta$ la $1,3 U_n$

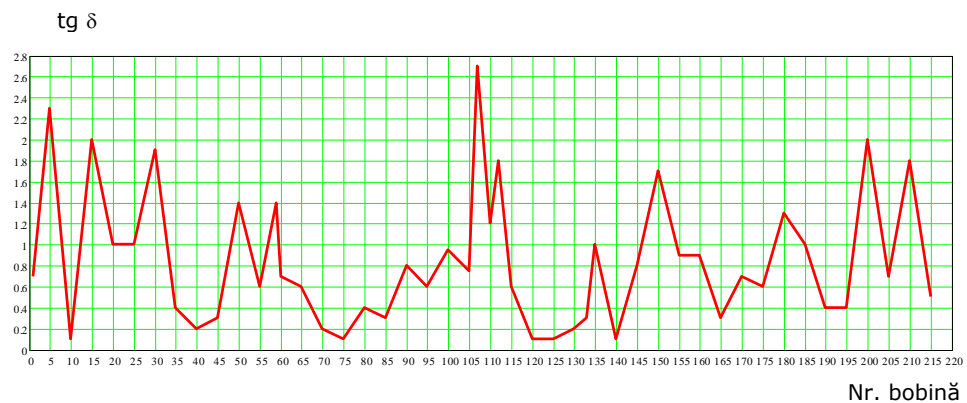


Figura 8.16. Variația factorului de pierderi dielectrice $\text{tg } \delta$ la $1,3 U_n$ în funcție de numărul de bobine

Factorul de pierderi dielectrice $\text{tg } \delta$ la $1,4 U_n$

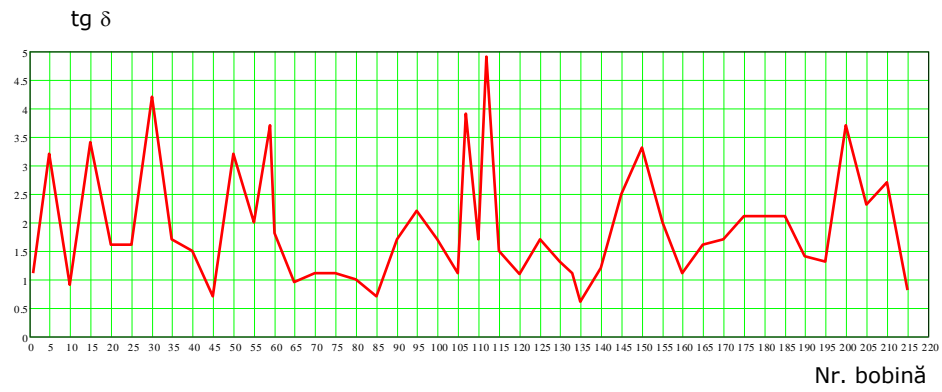


Figura 8.17. Variația factorului de pierderi dielectrice $\text{tg } \delta$ la $1,4 U_n$ în funcție de numărul de bobine

Anexa 2

Curbele variației unghiului de pierderi dielectrice ($\text{tg}\delta$) cu tensiunea

Aceste curbe (figurile 8.18÷8.65) s-au trasat pentru bobinele 1 până la bobina 215, din 5 în 5 bobine, la variația tensiunii de alimentare a bobinei $U=(0.2\div 1,4)U_n$.

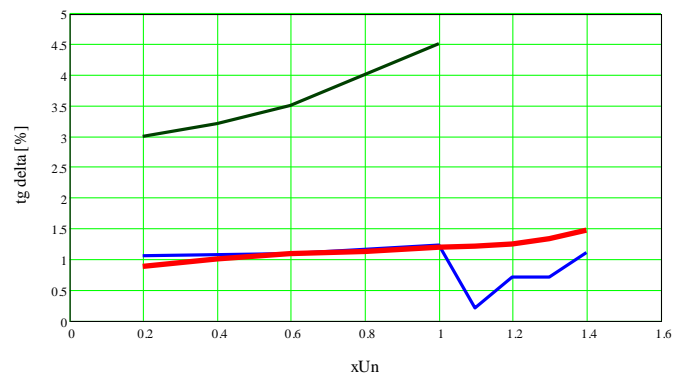


Figura 8.18. Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 1

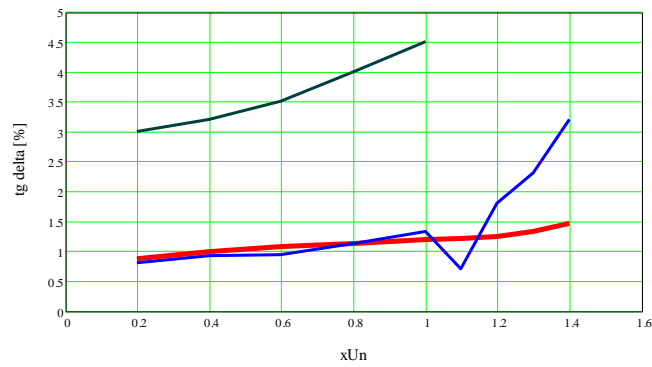


Figura 8.19. Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 5

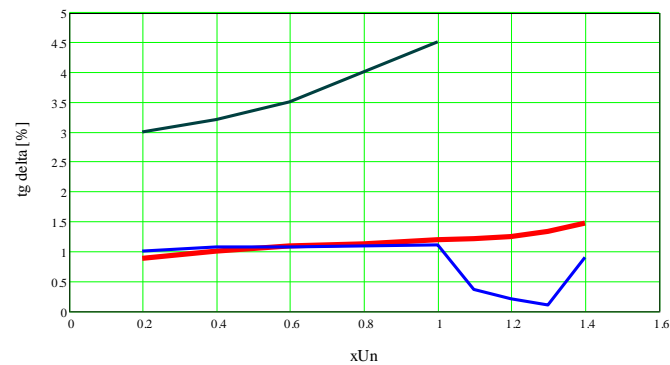
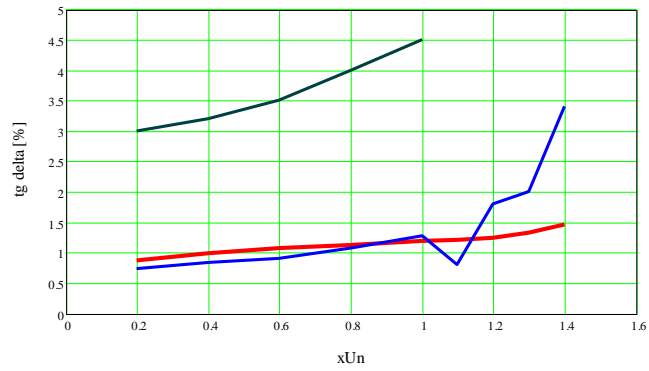
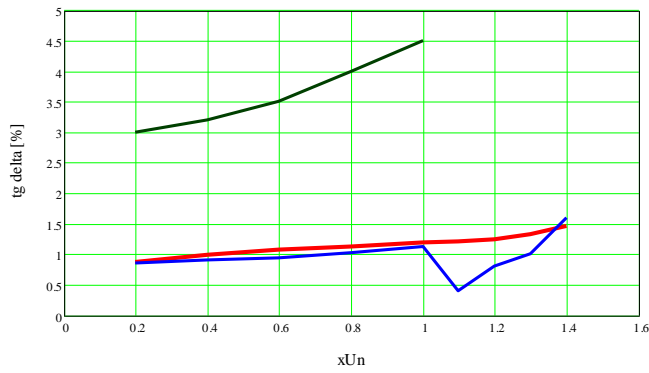
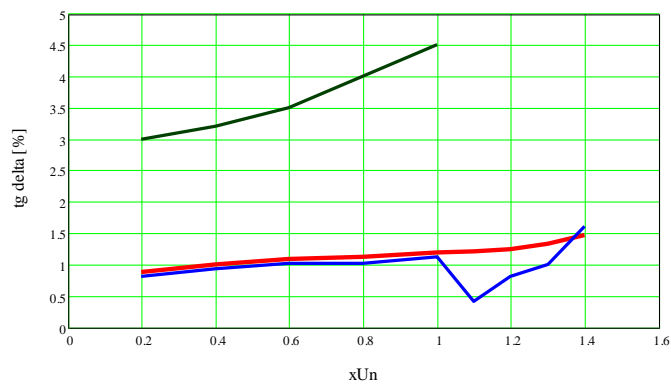
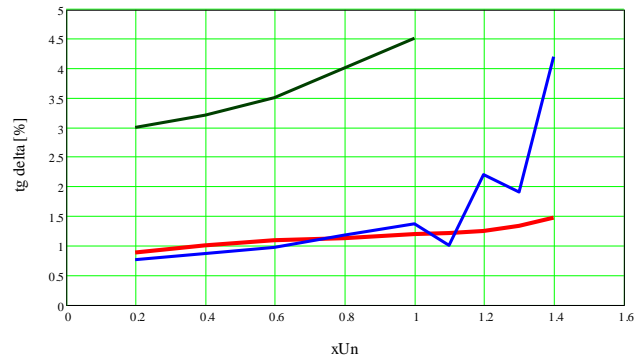
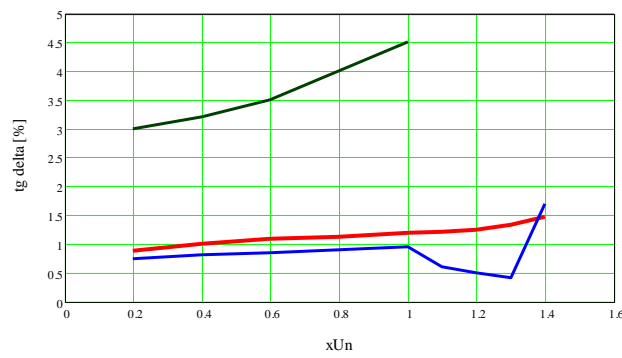
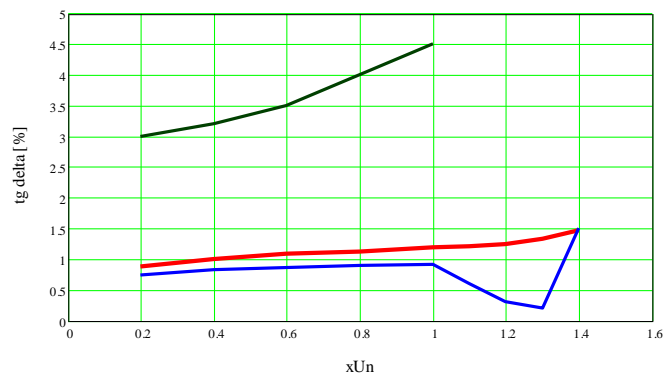
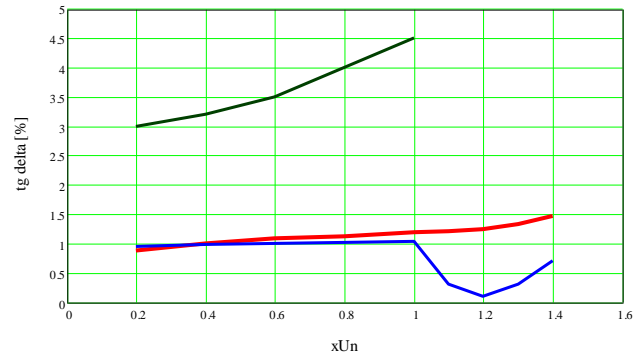
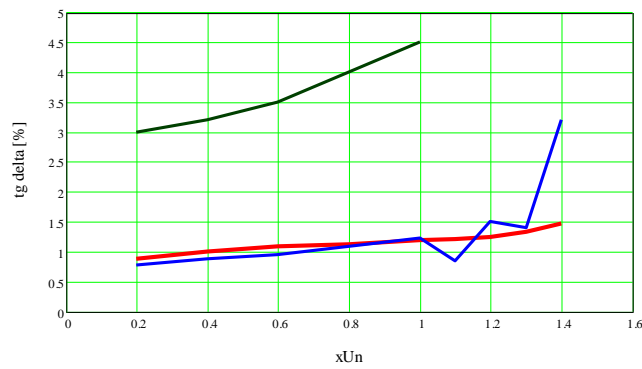
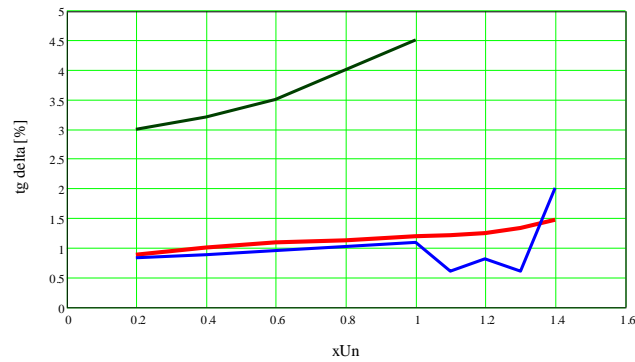
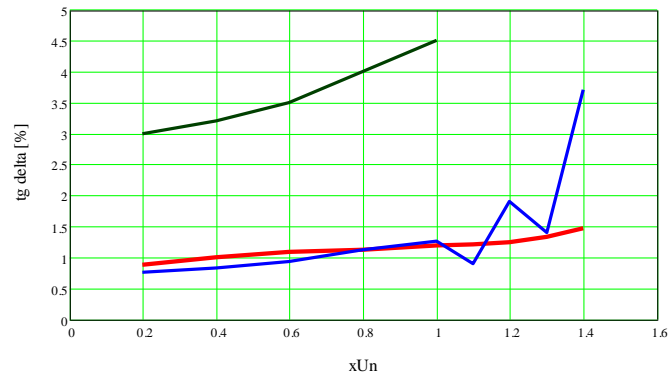
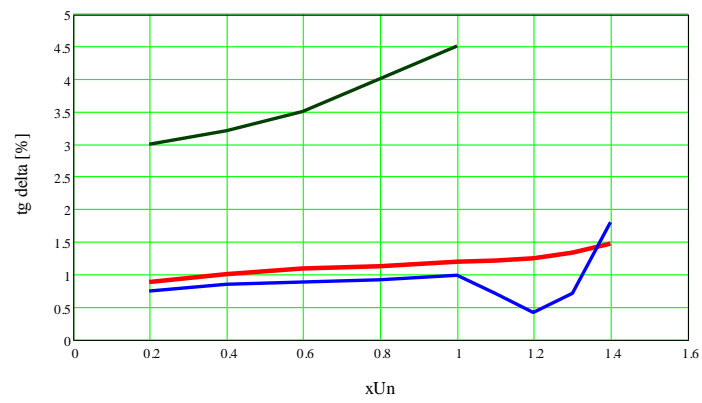
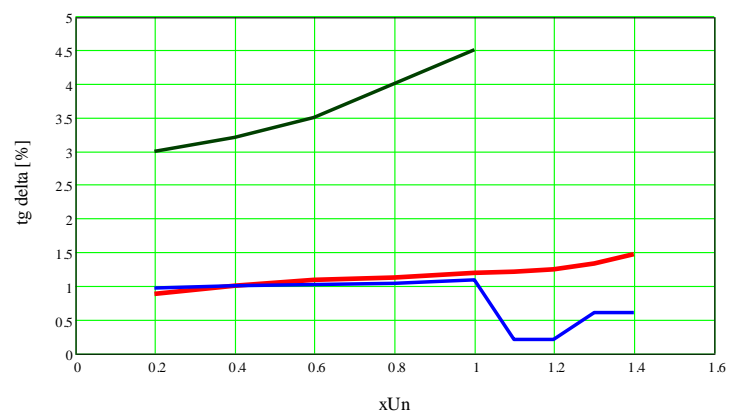


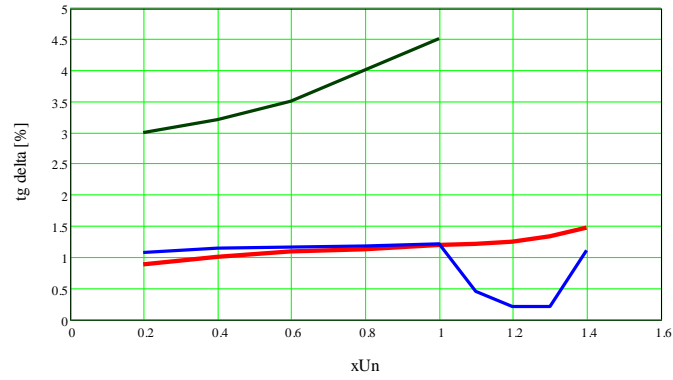
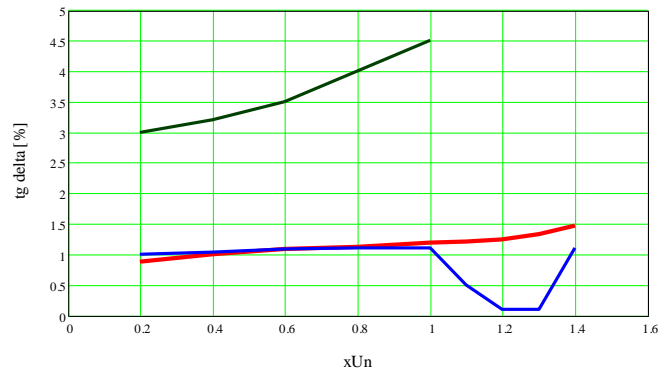
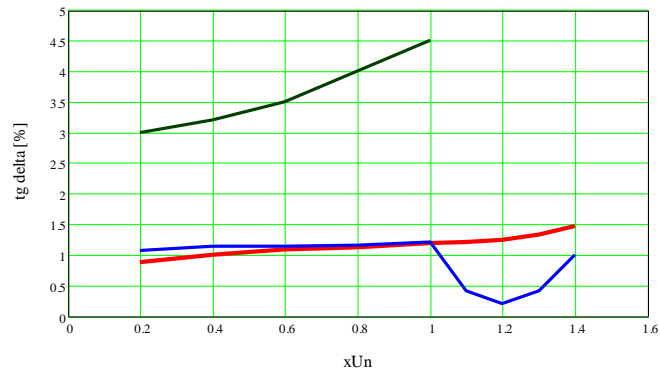
Figura 8.20. Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 10

Figura 8.21. Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 15Figura 8.22. Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 20Figura 8.23. Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 25

Figura 8.24. Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 30Figura 8.25. Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 35Figura 8.26. Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 40

Figura 8.27.Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 45Figura 8.28.Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 50Figura 8.29.Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 55

Figura 8.30. Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 59Figura 8.31. Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 60Figura 8.32. Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 65

Figura 8.33.Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 70Figura 8.34.Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 75Figura 8.35.Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 80

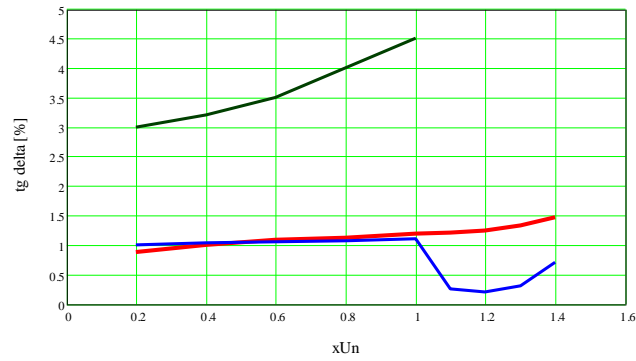


Figura 8.36. Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 85

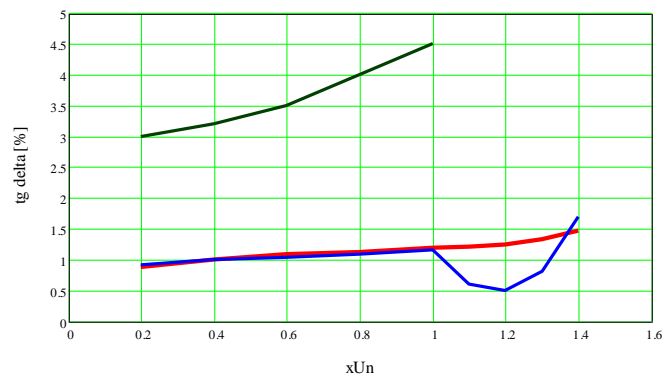


Figura 8.37. Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 90

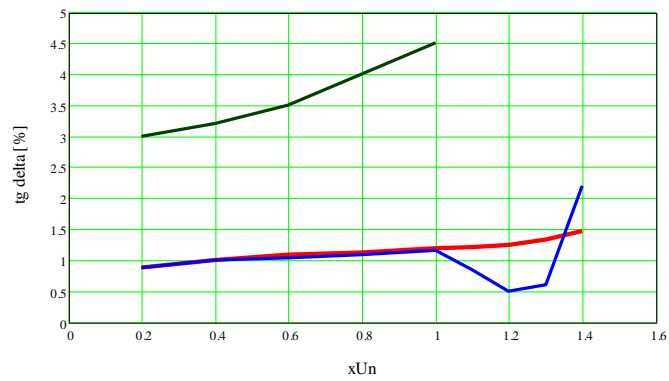
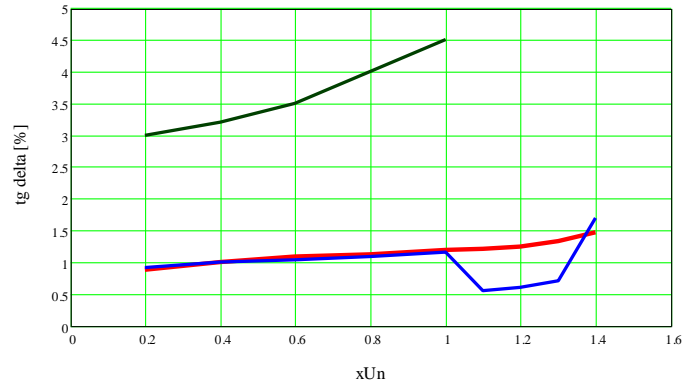
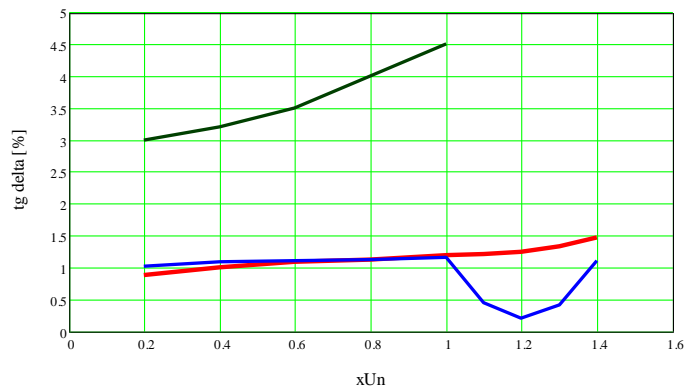
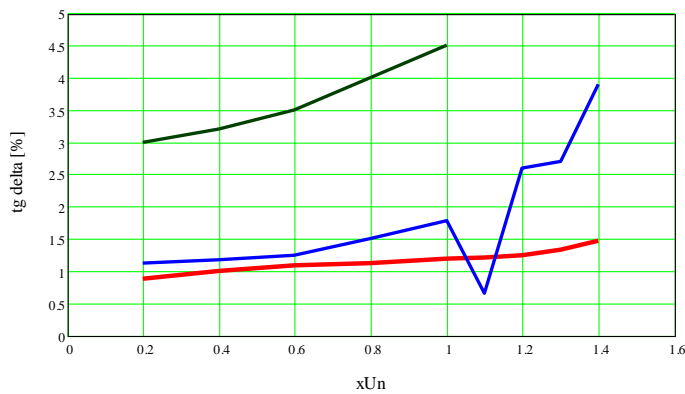
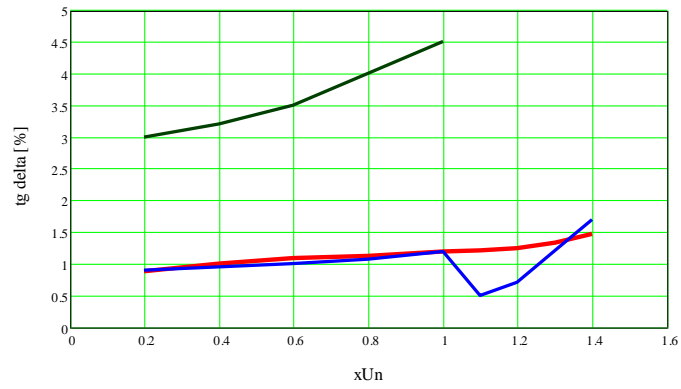
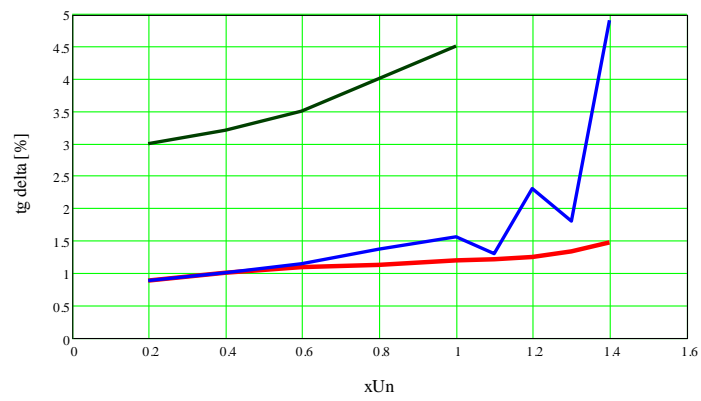
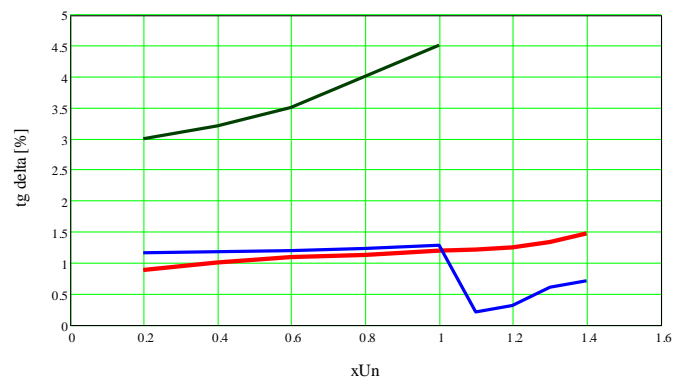
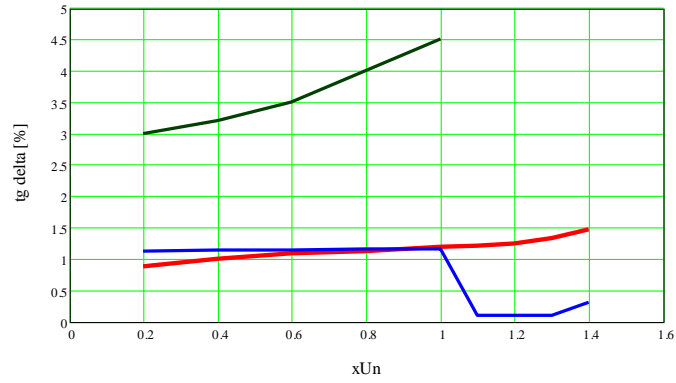
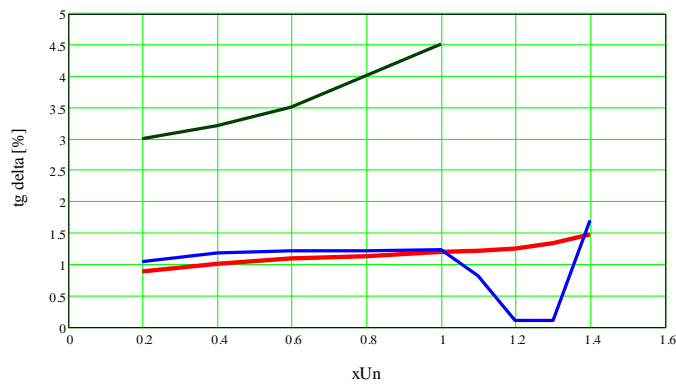
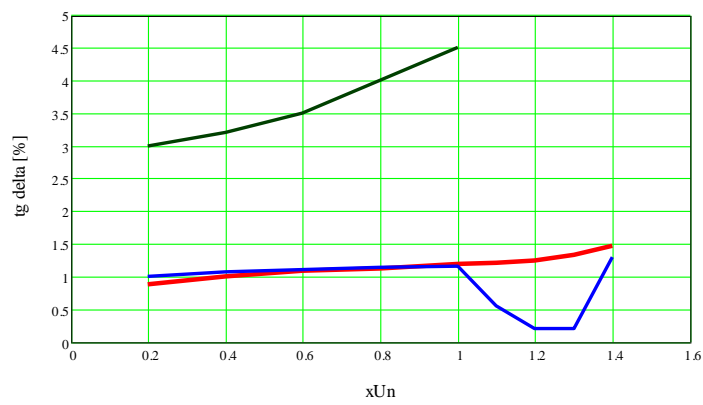
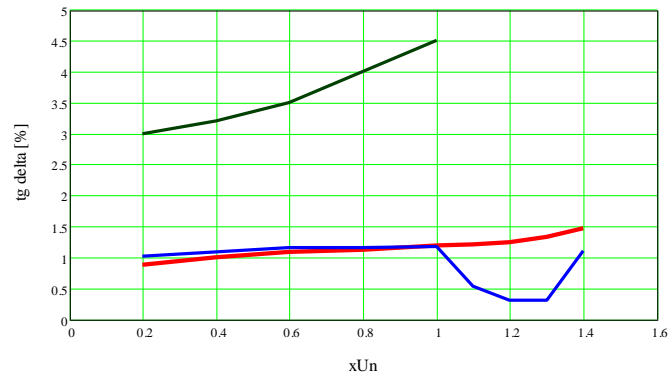
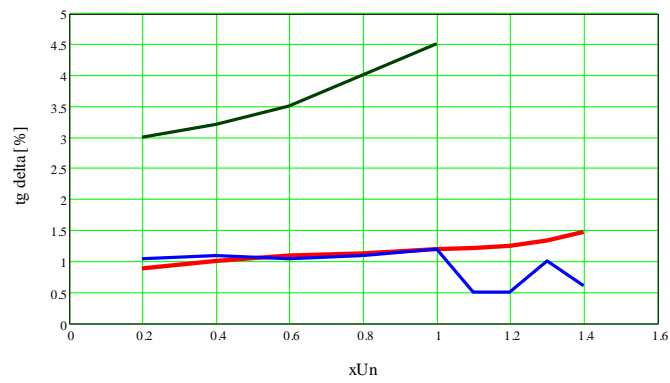
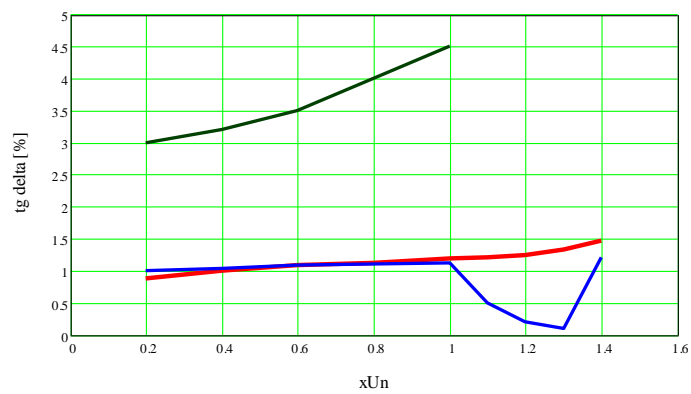


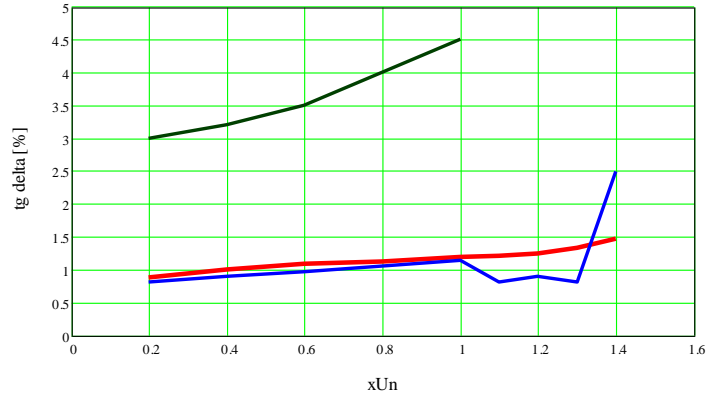
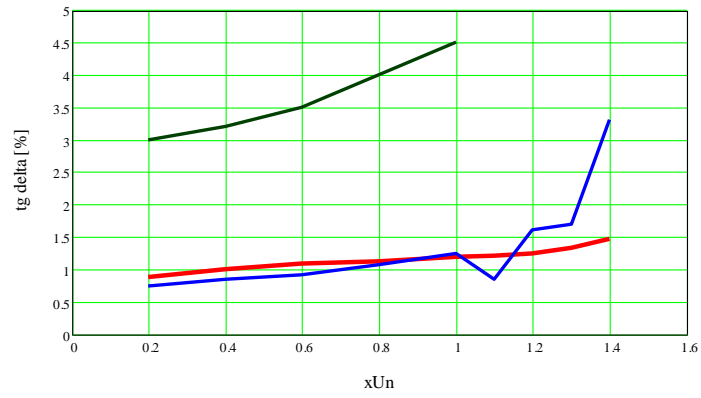
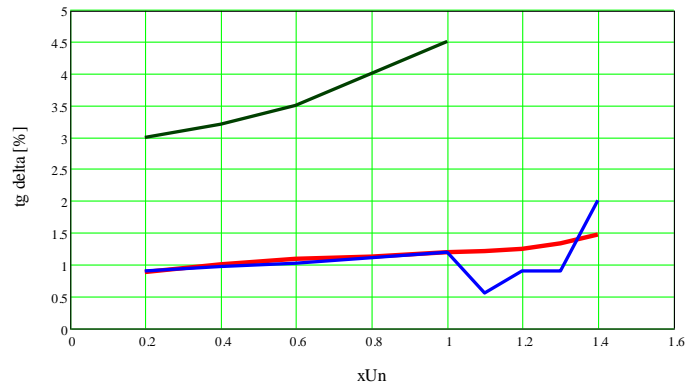
Figura 8.38. Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 95

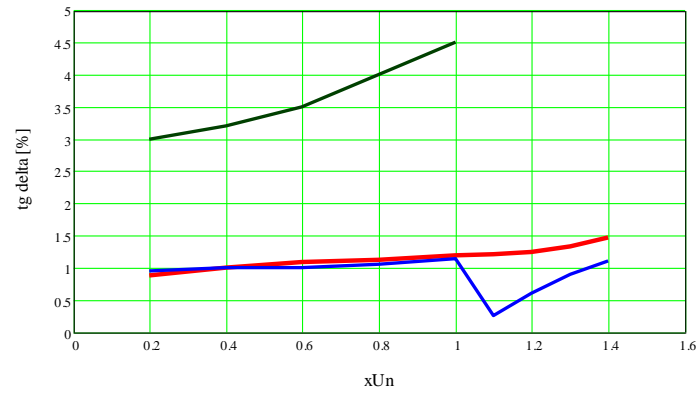
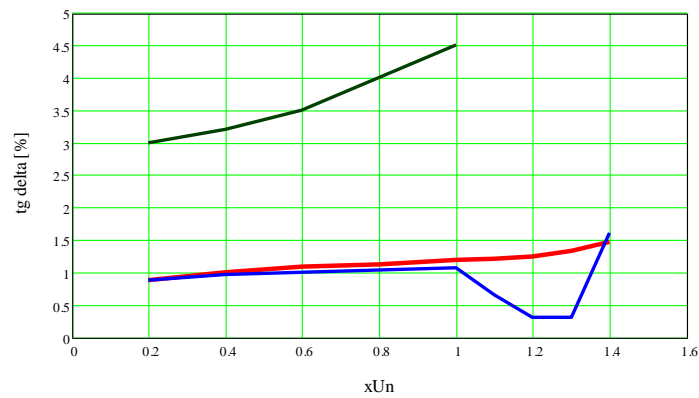
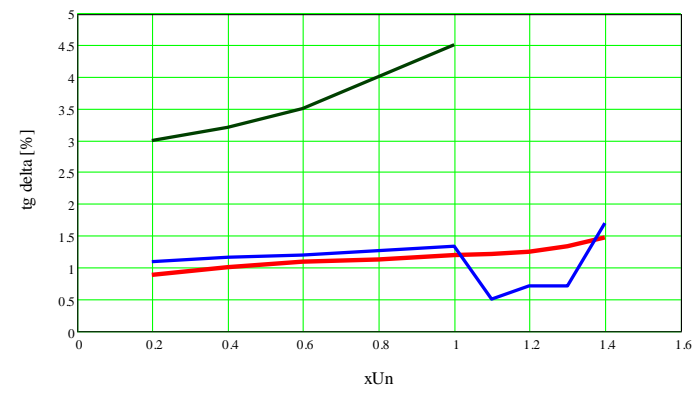
Figura 8.39.Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 100Figura 8.40.Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 105Figura 8.41.Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 107

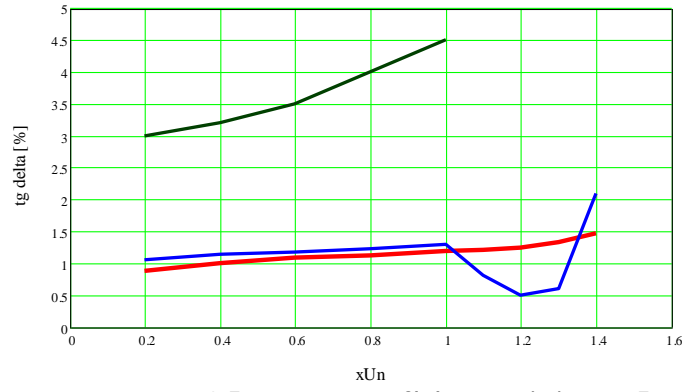
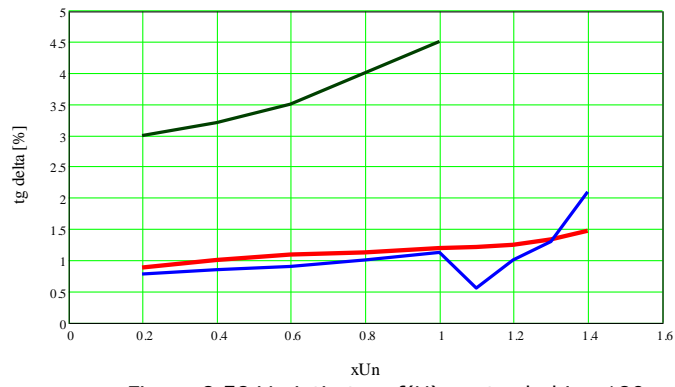
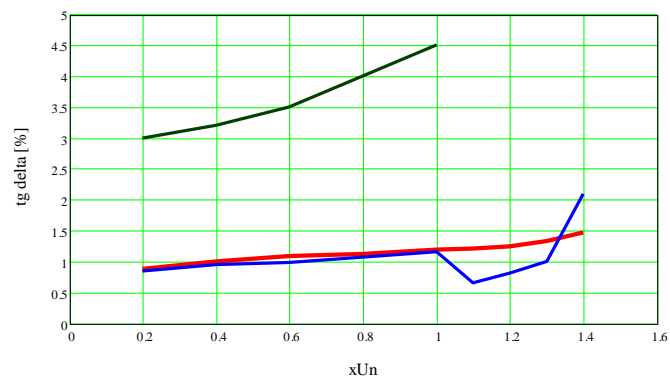
Figura 8.42.Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 110Figura 8.43.Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 112Figura 8.44.Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 115

Figura 8.45.Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 120Figura 8.46.Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 125Figura 8.47.Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 130

Figura 8.48.Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 133Figura 8.49.Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 135Figura 8.50.Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 140

Figura 8.51.Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 145Figura 8.52.Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 150Figura 8.53.Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 155

Figura 8.54.Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 160Figura 8.55.Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 165Figura 8.56.Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 170

Figura 8.57.Variația $\text{tg } \delta = f(U)$ pentru bobina 175Figura 8.58.Variația $\text{tg } \delta = f(U)$ pentru bobina 180Figura 8.59.Variația $\text{tg } \delta = f(U)$ pentru bobina 185

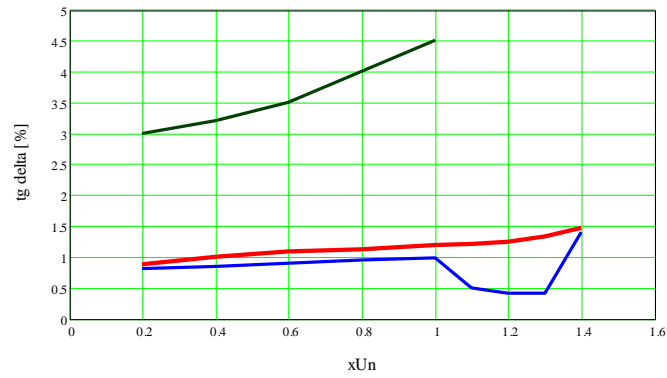


Figura 8.60. Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 190

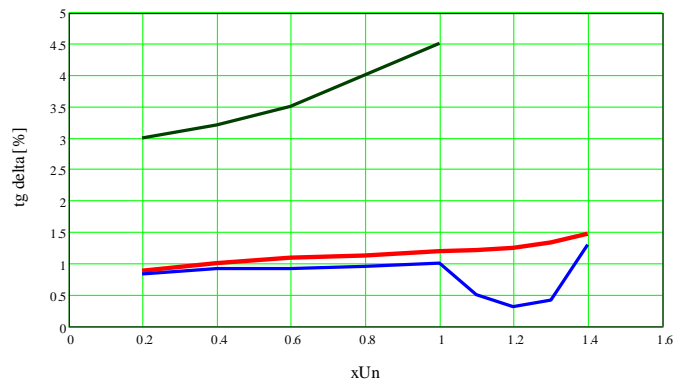


Figura 8.61. Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 195

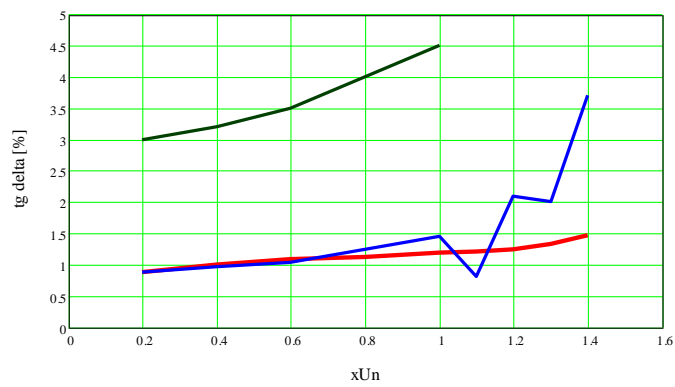
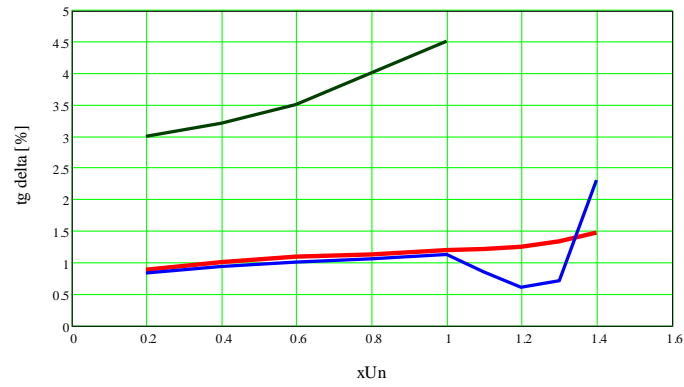
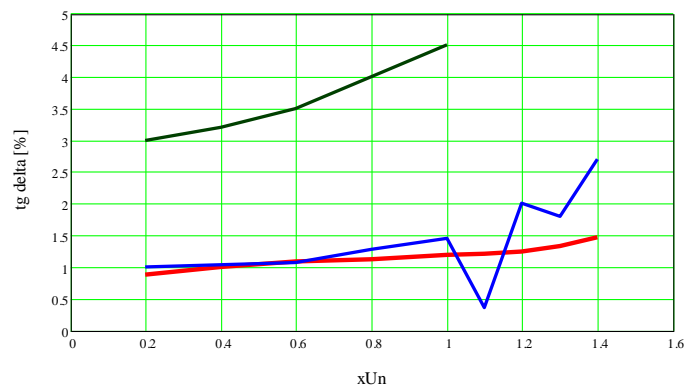
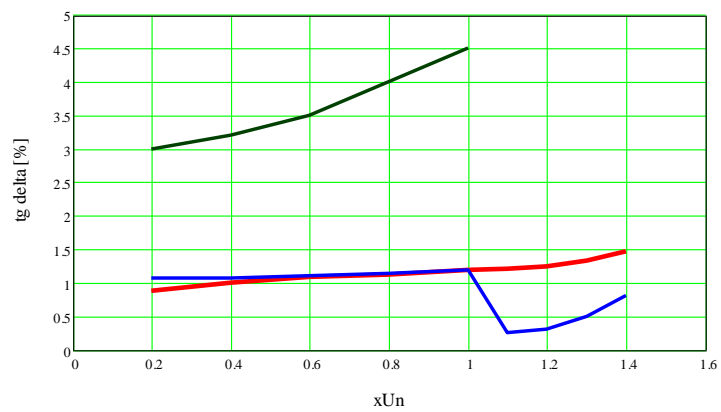


Figura 8.62. Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 200

Figura 8.63.Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 205Figura 8.64.Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 210Figura 8.65.Variația $\text{tg}\delta=f(U)$ pentru bobina 215