



UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE
ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE
POLITEHNICA BUCUREȘTI

ȘCOALA DOCTORALĂ DE INGINERIE
ELECTRICĂ



TEZĂ DE DOCTORAT

-REZUMAT-

ÎMBĂTRÂNIREA ULEIULUI MINERAL DE TRANSFORMATOR SUB ACȚIUNEA CÂMPULUI ELECTRIC INTENS ȘI A DESCĂRCĂRILOR PARȚIALE

Coordonator Științific,

Prof. Dr. Ing. Laurențiu Marius DUMITRAN

Autor,

Ing. Andrei MANEA

BUCUREȘTI

2024

Cuprins

LISTĂ DE ABREVIERI	10
CAPITOLUL 1	13
INTRODUCERE	13
1.1 Context	13
1.2 Obiectivele tezei	15
1.3 Structura tezei	15
Bibliografie	17
CAPITOLUL 2	18
COMPONENTELE TRANSFORMATOARELOR DE PUTERE ȘI SOLUȚII CONSTRUCTIVE	18
2.1 Soluții constructive și componente pentru transformatoare de putere	19
2.1.1 Circuitul magnetic	19
2.1.2 Înfășurările transformatorului	19
2.1.2.1 Componentele înfășurărilor transformatorului de putere	20
2.2 Sistemul de izolație al transformatoarelor de putere	21
2.2.1 Hârtie celulozică	22
2.2.1.1 Structura și proprietățile celulozei	23
2.2.1.2 Hârtia celulozică și cartoane	26
2.2.1.3 Hârtia Nomex	26
2.2.1.4 Hârtie îmbunătățită termic	26
2.2.1.5 Hârtie Kraft	27
2.2.2 Uleiuri de transformer	27
2.2.2.1 Ulei mineral	27
2.2.2.2 Ulei vegetal	29
2.2.2.3 Ulei Sintetic	29
2.3 Concluzii	30
Bibliografie	31
CAPITOLUL 3	33
FACTORI DE ÎMBĂTRÂNIRE ȘI PROCESE DE DEGRADARE ÎN SISTEMUL DE IZOLAȚIE HÂRTIE-ULEI	33
3.1 Introducere	33
3.2 Solicitări electrice	34
3.2.1 Descărcări parțiale	35

3.2.2	Arcul electric	41
3.2.3	Solicitări electrice în regim normal.....	41
3.2.4	Suprasarcinile de avarie.....	41
3.2.5	Solicitări în regim de scurtcircuit.....	42
3.2.6	Supratensiuni atmosferice.....	42
3.3	Solicitări termice	42
3.3.1	Solicitări în regim normal.....	43
3.3.2	Solicitări termice în regim de suprasarcină	44
3.3.3	Solicitări termice în regim de suprasarcină prelungită (pe termen lung)	44
3.3.4	Șocuri termice	44
3.3.5	Temperatura de „hot-spot”	45
3.3.6	Îmbătrânirea termică a izolației.....	45
3.4	Solicitări mecanice	47
3.4.1	Eforturi în condiții normale de funcționare.....	48
3.4.2	Eforturi pe termen scurt	48
3.4.3	Vibrațiile înfășurărilor transformatorului.....	48
3.5	Solicitări de mediu	49
3.6	Mecanisme de îmbătrânire a uleiului de transformator	49
3.6.1	Îmbătrânirea uleiului mineral sub acțiunea câmpului electric intens	50
3.6.2	Îmbătrânirea uleiului mineral sub acțiunea solicitărilor termice.....	53
3.7	Concluzii.....	56
	Bibliografie	57
CAPITOLUL 4.....		59
METODE DE DIAGNOSTICARE A SISTEMULUI DE IZOLAȚIE		59
4.1	Considerații generale.....	59
4.2	Metode electrice de diagnosticare	59
4.2.1	Analiza răspunsului dielectric în domeniul timp și frecvență	59
4.2.1.1	Analiza răspunsului dielectric în domeniul timp	60
4.2.1.2	Analiza răspunsului dielectric în domeniul frecvență	63
4.3	Metode de diagnosticare chimică a sistemului de izolație.....	67
4.3.1	Analiza gazelor dizolvate (AGD).....	67
4.3.1.1	Metode de analiză a gazelor dizolvate	67
4.3.1.2	Metode de interpretare a datelor AGD	70
4.3.2	Conținutul de apă din ulei.....	71
4.4	Metode termice și acustice de diagnosticare a stărilor izolației transformatoarelor	71

4.4.1	Termografie în infraroșu	71
4.4.2	Detectarea defectelor prin ultrasunete	72
4.5	Concluzii	72
	Bibliografie	73
CAPITOLUL 5.....		75
CELULA DE ÎMBĂTRÂNIRE ACCELERATĂ ȘI METODA EXPERIMENTALĂ		75
5.1	Considerații generale.....	75
5.2	Dimensionarea și proiectarea celulei de îmbătrânire	76
5.2.1	Modelul geometric	76
5.2.2	Calculul numeric al repartiției câmpului electric în celula de îmbătrânire	78
5.2.2.1	Modelul fizic	78
5.2.2.2	Domeniul de calcul.....	78
5.2.2.3	Modelul matematic	79
5.2.2.4	Condiții pe frontieră	81
5.2.2.5	Rezultatele simulării - electrod metalic cu șase discuri.....	83
5.2.2.5.1	Distribuția câmpului electric pentru electrodul cu șase discuri.....	85
5.2.2.6	Rezultatele simulării - electrod metalic cu trei discuri.....	91
5.2.2.6.1	Distribuția câmpului electric pentru electrodul cu trei discuri.....	92
5.3	Validare experimentală	98
5.4	Metoda experimentală	100
5.4.1	Celula de îmbătrânire.....	100
5.4.2	Instalația experimentală.....	102
5.4.3	Constatări experimentale	104
5.5	Analiza numerică a câmpului electric în prezența pungilor de gaz în celuală.....	106
5.6	Concluzii	109
	Bibliografie	110
CAPITOLUL 6.....		111
INFLUENȚA ÎMBĂTRÂNIRII ACCELERATE ASUPRA PROPRIETĂȚILOR ULEIULUI MINERAL		111
6.1	Introducere	111
6.2	Metoda spectroscopiei dielectrice.....	111
6.3	Rezultate experimentale și discuții.....	117
6.3.1	Permitivitatea relativă complexă și factorul de pierderi dielectrice	117
6.3.2	Modulul electric complex	123
6.3.3	Componentele conductivității complexe a uleiului mineral (MOL).....	127

6.3.4	Mobilitate ionilor de conducție	132
6.3.5	Energia de activare a ionilor de conducție	136
6.4	Influența DP asupra rezistivității în curent continuu a uleiului mineral	139
6.5	Concluzii	143
	Bibliografie	144
	CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI PERSPECTIVE	145
	Concluzii generale	145
	Contribuții originale	146
	Perspectivă	148
	BIBLIOGRAFIE GENERALĂ	149

Cuvinte cheie: ulei mineral, transformator de putere, câmp electric intens, descărcări parțiale, îmbătrânire accelerată, conductivitate electrică, energie de activare, mobilitatea purtătorilor de sarcină, energie de activare.

CAPITOLUL 1

INTRODUCERE

Această teză de doctorat abordează fenomenele și procesele care au loc în sistemul de izolație hârtie-ulei utilizat în cadrul transformatoarelor de putere, concentrându-se pe dezvoltarea unei metode de îmbătrânire accelerată a uleiului mineral sub acțiunea câmpului electric intens și a descărcărilor parțiale. Majoritatea transformatoarelor de putere de înaltă și foarte înaltă tensiune au în componență sistemul de izolație realizat din ulei mineral și hârtie celulozică, în ciuda evoluțiilor recente care promovează tehnici de izolare inovatoare [1.1, 1.2]. În condiții tipice de funcționare, caracteristicile principale ale transformatoarelor de putere (TP) se modifică, iar componentele sistemului de izolație se degradează treptat.

Fenomenele și procesele care au loc în sistemele de izolație al transformatoarelor de putere reprezintă subiectul unor cercetări ample, acoperind o gamă largă de aspecte specifice. Majoritatea acestora se concentrează pe analiza mecanismelor care stau la baza deteriorării elementelor constitutive ale izolației (uleiuri și hârtie), precum și pe instrumente și tehnici de diagnosticare eficiente pentru evaluarea stărilor sistemului de izolație. Tehnicile convenționale de diagnosticare pot oferi informații generale despre starea sistemului de izolație hârtie-ulei prin măsurarea rezistenței electrice de izolație, a curenților de absorbție și de resorbție, a tensiunii de revenire etc. [1.3-1.5]. Alte tehnici se bazează pe examinarea fizico-chimică a probelor de ulei prelevate din cuva transformatorului, acestea fiind mai accesibile decât probele de hârtie. Dintre acestea, cele mai utilizate tehnici sunt spectroscopia dielectrică, conținutul de apă, conținutul de furani și studiul gazelor dizolvate [1.6, 1.7]. În general, se consideră că proprietățile fizico-chimice ale uleiului și cele ale hârtiei suferă modificări semnificative din cauza solicitărilor termice [1.8]. Totuși, există încă întrebări cu privire la modul în care câmpul electric intens afectează componentele sistemului de izolație, în ciuda faptului că procesele de îmbătrânire termică a izolației ulei-hârtie sunt bine înțelese. Aceste ambiguități sunt accentuate în transformatoarele de înaltă și foarte înaltă tensiune din cauza existenței unor zone în care intensitatea locală a câmpului electric atinge valori foarte ridicate (cauzate de micro defecte sau impurități), care determină apariția descărcărilor parțiale (DP) și a degradării accelerate a uleiului și hârtiei. Subiectul determinării și măsurării nivelului DP în echipamentele electrice de înaltă tensiune este abordat într-o mare parte a literaturii de specialitate. Efectele acestui fenomen asupra stării sistemului de izolație sunt examinate însă în relativ puține cazuri. Astfel, nu au fost realizate multe studii detaliate privind modul în care câmpul electric intens și DP afectează caracteristicile dielectrice ale sistemului de izolație ulei-hârtie din transformatoarele de putere.

Prin urmare, obiectivul principal al acestei teze de doctorat este acela de a dezvolta o metodă experimentală de laborator pentru îmbătrânirea accelerată a uleiului mineral de

transformator supus acțiunii câmpului electric intens și descărcărilor parțiale și evaluarea influenței acestora asupra proprietăților electrice ale uleiului.

Încercările standardizate conform ASTM D 6180-05 [1.9] pentru evaluarea rezistenței uleiurilor electroizolante minerale la acțiunea descărcărilor electrice oferă doar anumite detalii specifice cu privire la comportamentul uleiului atunci când descărcările se produc la suprafața acestuia și nu în volum lui. Astfel, în scopul îndeplinirii obiectivului propus, a fost proiectată și executată o celulă de îmbătrânire de concepție originală care permite îmbătrânirea accelerată a probelor de ulei de transformator.

Referitor la studiul influenței descărcărilor parțiale și a câmpurilor electrice intense asupra proprietăților dielectrice ale uleiului, pentru evaluarea factorilor de diagnostic s-a utilizat metoda spectroscopiei dielectrice. Spectroscopia dielectrică este un instrument de analiza preferat în domeniul materialelor electroizolante, fiind extrem de eficientă pentru studierea structurii și dinamicii sistemelor de izolație, permițându-ne evaluarea fenomenelor intrinseci din acestea. Rezultatele obținute evidențiază cât de rapidă și semnificativă este influența îmbătrânirii electrice asupra proprietăților dielectrice ale uleiului mineral, oferindu-ne unele informații cu privire la procesele de conducție și polarizare din acest material. Este demn de remarcat și de evidențiat faptul că uleiul mineral îmbătrânit poate suferi modificări notabile ale proprietăților sale dielectrice în intervale de timp de doar câteva ore.

Capitolul 1 se referă la rolul și importanța transformatorului în rețeaua electrică, precum și la condițiile specifice și regimurile de funcționare care contribuie la degradarea rapidă a sistemului lui de izolație. Acest capitol prezintă, de asemenea, scopul și organizarea tezei, împreună cu justificarea și obiectivul propus.

Capitolul 2 prezintă o scurtă descriere a componentelor transformatorului de putere, precum și a soluțiilor constructive. Sunt trecute în revistă materialele utilizate pentru executarea sistemului de izolație al transformatorului, cu accent pe avantajele și dezavantajele acestora determinate de compoziția și caracteristicile lor. De asemenea, se relevă rațiunea pentru care studiul se axează în principal pe uleiul mineral, dat fiind faptul că izolația din hârtie și uleiul mineral este încă utilizată pe scară largă.

Capitolul 3 prezintă solicitările la care sunt supuse sistemele de izolație ale transformatoarelor de putere aflate în funcționare și oferă o imagine asupra reacțiilor chimice generale de îmbătrânire. În ceea ce privesc strategiile de exploatare și întreținere, acestea pot fi dezvoltate și îmbunătățite pentru a asigura și a prelungi durata de viață a transformatorului. Acest lucru poate fi realizat prin identificarea celor mai nocivi factori de stres și a reacțiilor chimice cauzate de temperatura înaltă și câmpul electric intens.

Capitolul 4 descrie tehnicile de diagnosticare (electrice, chimice, termice și acustice) utilizate pe scară largă, cu un accent deosebit pe cele electrice utilizate intens în această cercetare. Prin urmare, sunt discutate aspectele particulare ale acestor tehnici, evidențiind avantajele metodelor electrice care utilizează analiza răspunsurilor dielectrice în domeniul timp și frecvență.

Capitolul 5 prezintă caracteristicile celulei de îmbătrânire, precum și geometria electrozului metalic al acesteia. În plus, sunt expuse modelul matematic de calcul, proprietățile specifice de material, precum și modelele numerice asociate pentru electrozii metalici cu trei și șase discuri. De asemenea, sunt prezentate ansamblul și designul final al celulei de îmbătrânire, împreună cu etapele procesului de îmbătrânire, ca parte a pregătirii metodei.

Pe baza rezultatelor numerice și a observațiilor experimentale, electrozului cu șase discuri a fost selectat pentru a fi utilizat în cadrul celulei de îmbătrânire. În plus, sunt prezentate determinări experimentale, care evidențiază producerea descărcărilor parțiale și procesul de formare a bulelor și pungilor de gaz. Rezultatele obținute au validat metoda experimentală propusă și condițiile impuse pentru desfășurarea experimentărilor, permițând generarea bulelor de gaz și a descărcărilor parțiale vizibile în volumul de ulei.

Capitolul 6 este dedicat prezentării rezultatelor experimentale și a metodelor utilizate pentru evaluarea acestora. Astfel, în prima parte este prezentată metoda spectroscopiei dielectrice (în domeniul timp și frecvență), împreună cu o examinare mai atentă a principalilor factori de diagnosticare (precum și a celor complementari) utilizați în evaluarea proprietăților uleiului. S-a pus accentul pe o examinare din perspectiva componentelor conductivității relative complexe pentru a identifica procesele de conducție care au loc în diferite stadii de degradare a uleiului. De asemenea, am explorat ipoteza generării de purtători de sarcină din specii diferite care pot fi mai mobile și mai ușor de activat în procesul de conducție pentru a explica creșterea semnificativă a conductivității, atribuită, pe de altă parte, creșterii concentrației purtătorilor liberi de sarcină. Rezultatul obținut a demonstrat validitatea acestei ipoteze. Prin urmare, având în vedere existența acestor purtători de sarcină, putem afirma că majoritatea speciilor chimice din ulei sunt afectate de procesul continuu de fragmentare a moleculelor de hidrocarburi, proces provocat de descărcările electrice parțiale și de câmpul electric intens.

CAPITOLUL 2

COMPONENTELE TRANSFORMATOARELOR DE PUTERE ȘI SOLUȚII CONSTRUCTIVE

În acest capitol sunt prezentate principalele componente ale transformatoarelor de putere (TP), precum și soluțiile constructive ale acestora. Sunt trecute în revistă materialele utilizate pentru construcția sistemului de izolație, cu accent pe avantajele și dezavantajele care decurg din compoziția și caracteristicile acestora. De asemenea, este argumentată alegerea temei abordate prin prisma utilizării pe scară largă a sistemului de izolației de tip hârtie celulozică – ulei mineral în TP.

2.1 Soluții constructive și componente pentru transformatoare de putere

Producătorii de echipamente electrice produc transformatoare de putere în moduri diferite, dar structura de bază a acestora a rămas neschimbată de-a lungul timpului. [2.1]

În general, există două tipuri de transformatoare:

- **TP uscate** - frecvent izolate cu rășină și răcite cu aer natural și, eventual, cu ventilatoare de răcire;
- **TP în ulei** – sisteme de izolație hârtie-ulei.

2.1.1 Circuitul magnetic

Circuitul magnetic (suportul material al fluxului magnetic), este construit din tole subțiri de oțel - siliciu cu permeabilitate ridicată (lamine) care sunt izolate electric de un strat subțire electroizolant. Ca design, există două tipuri de construcție a miezului magnetic utilizat în transformatoarele de putere: în coloana și, respectiv, în manta. Atunci când înfășurările înconjoară miezul, transformatorul este cunoscut ca fiind de tip coloana; atunci când înfășurările sunt încadrate de miez, construcția TP este tip manta [2.2].

2.1.2 Înfășurările transformatorului

Înfășurările unui transformator sunt alcătuite din conductoare izolate (cupru sau aluminiu), care sunt organizate sub forma unor bobine preformate. Solicitățile mecanice și termice produse de curenții electrici obligă ca înfășurările să fie puternic consolidate și răcite corespunzător pentru a suporta condițiile de lucru. Deși aluminiul este mai ușor și mai puțin costisitor financiar, în general, este necesară o secțiune transversală mai mare a conductorilor din aluminiu față de cele de cupru la aceeași putere nominală a transformatorului. În general, în majoritatea situațiilor cuprul este materialul ales și preferat pentru realizarea înfășurărilor.

În practică, pentru transformatoarele de mare putere se utilizează cupru extrudat cu secțiune dreptunghiulară, în timp ce pentru transformatoarele de mică putere se folosesc conductoare rotunde. [2.1]

2.1.2.1 Componentele înfășurărilor transformatorului de putere

Un transformator de putere are două înfășurări, una numită înfășurare primară și cealaltă cunoscută sub numele de înfășurare secundară. Cum cele două înfășurări sunt separate galvanic, cuplajul electromagnetic permite transmiterea energiei electrice între înfășurarea primară și cea secundară. [2.3]

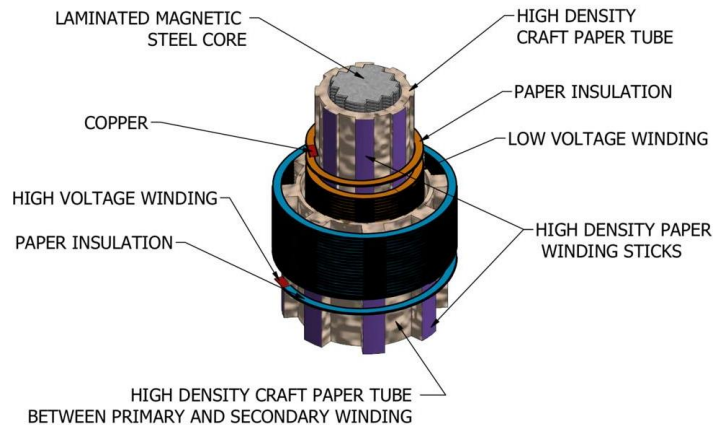


Fig. 2.1. Secțiune transversală prin coloana și bobinele unui TP.

Sistemul de izolație al unui transformator de putere depinde de tipul constructiv (uscăt sau în ulei) și de valorile tensiunilor nominale ale celor două înfășurări. Fig. 2.1 prezintă o secțiune a unei coloane dintr-un transformator de putere.



Fig. 2.2. a) Conductor de cupru rectangular izolat cu hârtie (simplu și multifilar); (b)- kit de izolație a transformatorului de putere. [2.4, 2.5]

Componentele de bază ale izolației transformatorului de putere sunt: izolația conductorului de cupru (hârtie) Fig.2.2a, tuburile izolante, izolația între înfășurarea primară și secundară Fig.2.2b, pasajele izolatoare, pene de fixare etc. [2.6]

2.2 Sistemul de izolație al transformatoarelor de putere

Materialele izolatoare ale sistemelor de izolație ale TP includ hârtia, uleiul mineral, pertinaxul și benzile textile. În cazul transformatoarelor de mare putere au fost întreprinse încercări semnificative de îmbunătățire a performanțelor sistemelor de izolație prin înlocuirea hârtiei celulozice cu diferite alte tipuri de hârtie (ex: hârtie poliamidă sau Nomex) și a uleiului mineral cu uleiuri sintetice sau, mai nou, vegetale. [2.6] Cu toate acestea, sistemul tradițional hârtie-ulei mineral rămâne cea mai rentabilă, fiabilă și sigură alegere pentru transformatoarele de putere.

2.2.1 Hârtia celulozică

Încă din perioada de început a echipamentelor electrice, produsele celulozice au servit ca materie primă pentru sistemul de izolație al TP. Posibilitatea de a fabrica componente cu o varietate de dimensiuni și forme, calități dielectrice bune și prețuri accesibile au dus la utilizarea pe scară largă a produselor celulozice în industria electrotehnică. [2.7]

Izolația solidă pe baza de celuloză are următoarele roluri: 1) asigură suportul mecanic pentru înfășurări, 2) acționează ca un izolator pentru componentele care lucrează la valori diferite de tensiune și 3) creează canale de circulație pentru ulei. [2.8] Celuloza este un material macromolecular natural cu o moleculă liniară $(C_6H_{10}O_5)_n$. Lanțurile moleculare sunt organizate în micle, sau tuburi subțiri, structurate în mod similar, care formează ulterior fibrile și fibre de celuloză. Această structură explică absorbția mare de apă și porozitatea ridicată (40-50%) a materialelor celulozice [2.7]. Caracteristicile dielectrice ale celulozei depind foarte mult de densitate, de nivelul de umiditate, de temperatură și de frecvența câmpului electric, acestea fiind de obicei mai mici decât cele ale materialelor cu structură compactă. Deoarece celuloza conține molecule polare, permitivitatea și pierderile sale dielectrice au valori (relativ) ridicate.

Principala sursă a modificărilor proprietăților celulozei constă în reacțiile chimice care se produc sub acțiunea temperaturii ridicate, câmpului electric și oxigenului. Astfel, oxigenul depolimerizează macromoleculele de celuloză, ceea ce îi înrăutățește calitățile mecanice. În plus, oxigenul favorizează interacțiunile chimice ale celulozei cu apa, ceea ce crește numărul de grupe polare și, în cele din urmă, îi înrăutățește proprietățile dielectrice [2.7]. Celuloza este impregnată cu lichide hidrofobe pentru a-i crește proprietățile dielectrice și pentru a-i minimiza higroscopicitatea. Ca urmare, proprietățile substanței impregnante determină caracteristicile celulozei în sine. În funcție de densitatea hârtiei, permitivitatea relativă variază între 2,2 și 6,3, iar atunci când temperatura și densitatea hârtiei cresc, crește și factorul de pierderi dielectrice.

2.2.2 Uleiul de transformator

Pe lângă faptul că are proprietăți electrice foarte bune, uleiul trebuie să permită și să asigure procesului de răcire a ansamblului înfășurare-miez la o temperatură optimă pentru o funcționare sigură. De asemenea, trebuie să reducă la minimum cantitatea de oxigen care intră în contact cu celuloza și alte componente prin umplerea golurilor și a spațiilor libere din materialul izolator. [2.8] Uleiul de transformator poate fi clasificat în linii mari în patru categorii: ulei mineral, ulei vegetal, ulei siliconic și esteri sintetici. Deși uleiurile sintetice, vegetale și siliconice au proprietăți termice mai bune decât uleiul mineral, acestea prezintă încă un cost ridicat.

2.2.2.1 Uleiul mineral

Uleiul mineral este un amestec de hidrocarburi aromatice, parafinice și naftenice și este obținut prin rafinarea petrolului. Uleiul mineral are o gamă largă de aplicații în domeniul

electrotehnic, astfel pe lângă sistemele de izolație ale TP se mai folosește și în alte echipamente electrice, cum ar fi întrerupătoarele și condensatoarele de putere etc.

În ceea ce privește TP, se cunoaște faptul că starea sistemului de izolație este influențată de caracteristicile uleiului [2.9]. Pe lângă importanța rigidității dielectrice și a vâscozității scăzute care favorizează transmiterea căldurii și curgerea uleiului, din punct de vedere termodinamic, proprietățile lui permit să funcționeze într-o gamă largă de temperaturi. Uleiul mineral are o permitivitate relativă relativ scăzută (2,2-2,4). În general, odată cu creșterea temperaturii, rigiditatea dielectrică a uleiului se modifică semnificativ, iar factorul de pierderi crește. [2.7]

CAPITOLUL 3

FACTORI DE ÎMBĂTRÂNIRE ȘI PROCESE DE DEGRADARE ÎN SISTEMUL DE IZOLAȚIE HÂRTIE- ULEI

Acest capitol prezintă solicitările și reacțiile de degradare în sistemele de izolație ale transformatoarelor de putere, evidențiind factorii de îmbătrânire și reacțiile chimice provocate de câmpurile electrice intense și de căldură. Astfel, metodele mai performante de monitorizare, exploatare și întreținere pot prelungi durata de viață a TP prin detectarea reacțiilor chimice de degradare.

3.1 Introducere

Configurația sistemului de izolație al transformatorului de putere trebuie să ia în considerare solicitările electrice, termice și mecanice, care sunt dependente de sarcina, valoarea puterii și construcția acestuia. Pentru a suporta eforturile electromagnetice, izolația trebuie să mențină mecanic elementele conductoare și să suporte căldura produsă în conductoare și în miezul magnetic. Aceste solicitări, care afectează sistemele de izolație atunci când echipamentul electric este în funcțiune, sunt, de asemenea, cunoscute ca **factori de influență** și pot cauza o defecționare prematură a sistemelor de izolație a TP. Factorii de influență ar putea duce la îmbătrânirea izolației, caz în care sunt adesea numiți **factori de îmbătrânire**, sau pot permite evaluarea stărilor izolației (fără a modifica starea de degradare a acesteia), caz în care sunt considerați **factori de diagnosticare** [3.1]. În plus față de categoriile majore de solicitări (electrice, mecanice și termice), se iau întotdeauna în considerare o serie de solicitări suplimentare specifice mediului în care funcționează TP : umiditatea, oxigenul din atmosferă, radiațiile ultraviolete (UV) și alți factori.

3.2 Solicitări electrice

În timpul funcționării transformatoarelor de putere apar tensiuni variabile de diferite mărimi, forme și durate. Tensiunile din sistemul de izolație al transformatorului vor fi, fără îndoială, distribuite diferit în funcție de materialele componente, soluția constructivă și de structura izolației. [3.1]

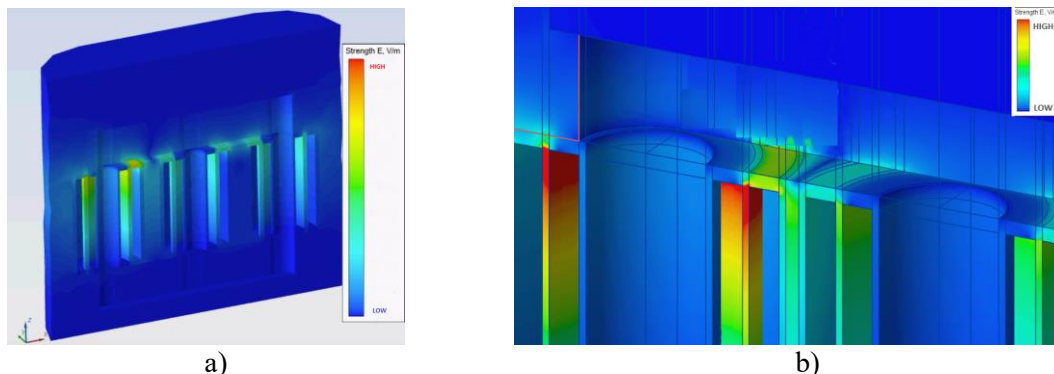


Fig. 3.1. (a) Intensitatea câmpului electric în ulei și în izolația transformatorului de putere; (b) Repartiția câmpului electric pe o coloana a transformatorului (bobinele, miezul sunt ascunse). [3.2]

Existența acestor anomalii în ceea ce privește distribuția inegală a solicitărilor electrice (fig. 3.1) motivează această cercetare, punându-se accent pe efectul degradării uleiului mineral sub influența combinată a unui câmp electric intens și a descărcărilor parțiale.

3.2.1 Descărcări parțiale

Descărcările parțiale (DP) sunt descărcări electrice locale și nedisruptive care se produc în golurile izolației, cauzând deteriorarea lentă a izolației și, în consecință, limitarea duratei de viață a TP. [3.3]. O deteriorare parțială a mediului învecinat are ca rezultat DP atunci când câmpul electric este mai mare decât o valoare de prag. DP prezintă un comportament tranzitoriu caracterizat de curenți pulsatorii cu durate cuprinse între nanosecunde și microsecunde [3.4]. DP conduc în timp la apariția arborescențelor electrice, fenomen ce favorizează străpungerea totală a izolației și scoaterea din funcțiune a TP [3.5].

Comportamentul haotic al DP este caracteristic naturii imprevizibile a acestora; în anumite etape de dezvoltare acestea pot fi analizate statistic. Amplitudinea, forma și sincronizarea impulsurilor corespunzătoare DP sunt utilizate pentru identificarea tipului și regiunii în care descărcările au loc. Apariția descărcărilor parțiale în sistemul de izolație al TP este determinată cel mai frecvent de prezența bulelor de gaz (din ulei) sau a porilor de aer rămași în urma procesului de impregnare a hârtiei.

3.3 Solicitări termice

În cazul creșterii nivelului de încărcate al TP, se produce creșterea temperaturii de funcționare a acestuia (Fig. 3.2). Astfel, temperaturile ridicate determină accelerarea reacțiilor chimice în sistemul de izolație al transformatorului, ceea ce duce la deteriorarea importantă a proprietăților hârtiei și a uleiului mineral.

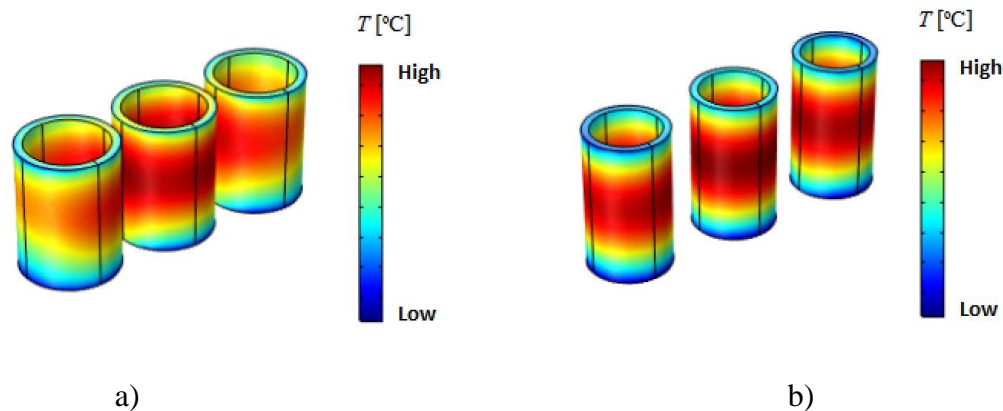


Fig. 3.2. Distribuția temperaturii în condiții de suprasarcină: (a) înfășurarea de înaltă tensiune și (b) înfășurarea de joasă tensiune. [3.6]

Tabel 3.1. Limita maximă de temperatură pentru fiecare regim de funcționare. [3.7]

	Încălzire în funcționare normală	Încălzire planificată peste limita nominală	Încărcare de urgență pe termen lung	Șocuri termice
θ_{hs} la nivelul înfășurărilor (°C)	120	130	140	180
θ_{hs} pentru alte componente metalice (în contact sau nu cu înfășurările) (°C)	140	150	160	200
θ_{hs} ulei (°C)	105	110	110	110

Trebuie subliniat faptul că solicitările termice sunt considerate cele mai periculoase (și cele mai frecvente) pentru funcționarea transformatorului. Regimurile de încărcare ale transformatorului determină intensitatea și durata solicitărilor termice, existând în literatura de specialitate o limită maximă a temperaturii punctului cald θ_{hs} (la nivelul înfășurărilor, părților metalice și a temperaturii uleiului), așa cum se poate observa în Tabelul 3.1. [3.7]

3.4 Solicitări mecanice

Forțele mecanice produse de câmpul electromagnetic asupra componentelor conductoare sunt în primul rând responsabile de solicitările mecanice din echipamentele electrice de mare putere. În plus, vibrațiile care rezultă, de asemenea, din aceste forțe electromagnetice determină deteriorarea continuă și semnificativă a izolației din înfășurările TP. De asemenea, izolația de pe componentele conductoare se dezlipește ca urmare a schimbărilor de temperatură care alternează dilatățile și contractiile corespunzătoare diferitelor regimuri de lucru, iar frecarea uzează în mod repetat suprafețele. Din aceste puncte de vedere, la proiectarea și selectarea izolației solide trebuie să se țină seama de eforturile mecanice între spirele înfășurărilor, între bobine sau între penele distanțoare. Prin urmare, izolația solidă a TP trebuie să preia și să reziste la toate tensiunile și forțele create de câmpul electromagnetic în timpul funcționării normale, precum și la solicitările pe termen scurt cauzate în principal de scurtcircuiturile accidentale. [3.1]

3.5 Solicitări de mediului

În cazul TP, cei mai importanți factori de mediu sunt:

Oxigenul care se evidențiază drept cel mai important factor de degradare, determinând alterarea tuturor proprietăților sistemelor de izolație, fie ele solide sau lichide;

Umiditatea atmosferică care modifică proprietățile dielectrice ale izolației, pătrunzând în compoziția acesteia [3.1];

Poluarea și radiațiile - pe lângă poluarea industrială a aerului, radiațiile solare determină creșterea temperaturii TP [3.8].

3.6 Mecanisme de îmbătrânire a uleiului de transformator

Indiferent de sursă, compoziția chimică a uleiului de transformator este un amestec de peste 3000 de elemente organice. Îmbătrânirea uleiului, generează o gamă largă de reactanți și reacții chimice ca o consecință asociată temperaturii și fenomenelor electrice care au loc în timpul funcționării echipamentelor electrice [3.9]. Este aproape imposibil să se stabilească o metodă de estimare a variabilelor cinetice ale mecanismelor chimice care conduc la degradarea calităților fizico-chimice ale uleiului, deoarece toate aceste reacții generează produse care modifică considerabil proprietățile uleiului. Cu toate acestea, trebuie remarcat faptul că o serie de componente interne ale transformatorului de putere (în care își au originea și se intensifică pierderile de energie) ar putea influența apariția acestor reacții chimice. Temperaturile ridicate și câmpurile electrice, care pot avea intensități ridicate în anumite zone ca urmare a existenței unor micro defecte sau impurități, sunt cele mai semnificative dintre acestea.

Pentru sistemul de izolație ulei-hârtie, solicitările termice sunt frecvent considerate ca fiind cel generatoare de modificări ale caracteristicilor fizico-chimice [3.10].

Deși procesul de îmbătrânire termică a izolației ulei-hârtie este bine înțeles, există încă întrebări legate de impactul câmpurilor electrice intense asupra părților componente ale sistemului de izolație. În plus, în anumite circumstanțe, aceste solicitări termice și electrice combinate determină apariția bulelor de gaz în ulei, ceea ce, la rândul lor, provoacă apariția descărcărilor parțiale [3.11]. Cercetările recente au arătat că ruperea lanțurilor de hidrocarburi din ulei produce suspensii coloidale și gaze solubile. Aceste subproduse accelerează oxidarea uleiului de transformator și sunt foarte dăunătoare pentru funcționarea în siguranță a transformatoarelor de putere (TP). De asemenea, formarea de produse de oxidare solubile și insolubile (de nămoluri care blochează disiparea căldurii datorită aderenței la izolația solidă) este favorizată ca urmare a agresiunii chimice a oxigenului. Prin urmare, crearea acestor produși este evitată dacă legăturile chimice ale lanțurilor moleculare sunt stabile. Menționăm energia termică (produsă de componentele active ale transformatorului), câmpul electric puternic (care declanșează injecția de electroni în ulei) și oxigenul dizolvat ca surse potențiale de energie care ar putea perturba legăturile covalente [3.12]. În plus, descărcările parțiale reprezintă ele însele o sursă locală de radiație și căldură (la scară mică, desigur) emisă de moleculele de gaz ionizat (din bule), împreună cu stresul termic continuu provocat de căldura radiată din componentele active ale transformatorului de putere. Deoarece toate aceste condiții coexistă atunci când au loc descărcări parțiale, rezultă în mod evident că efectele solicitărilor termice nu pot fi delimitate în mod direct de cele provocate de câmpurile electrice intense și de radiațiile electromagnetice.

CAPITOLUL 4

METODE DE DIAGNOSTICARE A SISTEMULUI DE IZOLAȚIE

Acest capitol descrie metodele de diagnosticare utilizate pe scară largă, incluzând metodele electrice, chimice, termice și acustice, cu accent special pe metodele electrice. Sunt evidențiate avantajele metodelor electrice, cu accent pe analiza răspunsului dielectric în domeniul timp și frecvența.

4.1 Considerații generale

Sistemul de izolație este în mare măsură responsabil pentru majoritatea defectelor TP [4.1], accentuându-se astfel importanța monitorizării și diagnosticării acestor echipamente. Pornind de la necesitatea evaluării importanței factorilor de îmbătrânire, în cadrul acestei teze se propune o metodă de îmbătrânire accelerată a uleiului mineral de transformator (o componentă cheie a sistemului de izolație al TP) prin evaluarea principalelor modificări fizico-chimice rezultate în urma acțiunii câmpului electric intens și a descărcărilor parțiale.

4.2 Metodele electrice de diagnosticare

4.2.1 Analiza răspunsului dielectric în domeniul timp și frecvență

În structura microscopică a materialelor izolante sunt prezente particule încărcate cu sarcini pozitive și negative, care se neutralizează reciproc la nivel macroscopic. Pe de altă parte, sub acțiunea câmpului electric, într-un material electroizolant se produce o deplasare ordonată a sarcinilor electrice libere, ceea ce reprezintă fenomenul de conducție electrică. În același timp, au loc și deplasări reduse ale sarcinilor electrice legate aferente fenomenului de polarizare electrică.

În acest caz, materialul dobândește un moment electric diferit de zero și, de asemenea, o polarizare electrică diferită de zero. După cum se va arăta în continuare, toate aceste fenomene sunt strâns legate de structura fizico-chimică a izolației și de gradul de îmbătrânire a acesteia, reflectat de existența purtătorilor de sarcină liberi și a radicalilor liberi polari rezultați în urma unor fenomene electrochimice.

4.2.1.1 Analiza răspunsului dielectric în domeniul timp

Un curent $i_a(t)$ trece prin dielectricul unui condensator atunci când între armăturile acestuia este aplicată o treaptă de tensiune continuă $U_0(t) = U_0\delta(t)$ pentru o perioadă de timp T_c (Fig. 4.1).

$$i_a(t) = i_{ch}(t) + i_p(t) + i_{s_{ch}}(t) + i_c(t) \quad (4.1)$$

$\delta(t)$ reprezintă variabila delta de pas. [4.1]:

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & \text{if } t_0 > t > T_c \\ 1, & \text{if } t_0 \leq t \leq T_c \end{cases} \quad (4.2)$$

unde $i_a(t)$ este curentul de absorbție, $i_c(t)$ este curentul de conducție care caracterizează conductivitatea dielectricului condensatorului în curent continuu σ_{DC} , $i_p(t)$ este curentul de polarizare, $i_{s_{ch}}(t)$ este curentul de sarcină spațială și $i_{ch}(t)$ este curent de încărcare cu sarcină a condensatorului cu dielectric vidul [4.2]. Curentul $i_{ch}(t)$ scade rapid la zero, de aceea nu este înregistrat în majoritatea experimentelor. Curentul de polarizare $i_p(t)$ caracterizează fenomenul de polarizare electrică și scade treptat la zero. Curentul $i_{s_{ch}}(t)$ caracterizează deplasarea sarcinii electrice spațiale fixate pe defectele izolatorului, care este cauzată în principal de procesul de deteriorare și de fenomenele de injecție de sarcină. $i_{s_{ch}}(t)$ se anulează ușor în timp.

Convecția purtătorilor de sarcină liberi, cum ar fi ioni și electroni generează curentul de conducție $i_c(t)$. De asemenea, structura fizică și chimică a dielectricului condensatorului sunt principalii factori care influențează concentrația speciilor purtătorilor de sarcină [4.1]. Astfel conductivitatea sau rezistivitatea electrică a dielectricului (ulei mineral îmbătrânit în cazul nostru) poate fi estimată cu ajutorul acestei componente a curentului $i_a(t)$.

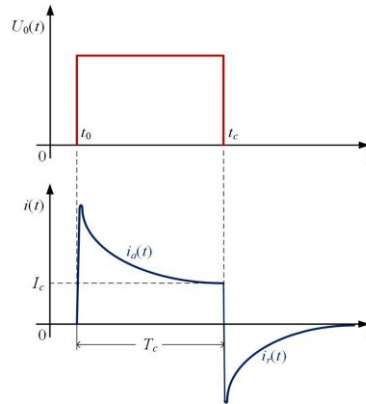


Fig. 4.1. Variația în timp a curentului de absorbție $i_a(t)$ și de resorbție $i_r(t)$. [4.1]

Curentul de resorbție $i_r(t)$ poate fi obținut prin scurtcircuitarea electrozilor condensatorului la momentul $t = T_c$ și prin întreruperea aplicării tensiunii:

$$i_r(t) = i_d(t) + i_{dp}(t) + i'_{s_ch}(t), \quad (4.3)$$

unde curentul de descărcare al condensatorului cu dielectric vidul este notat cu simbolul $i_d(t)$, curentul de depolarizare cu simbolul $i_{dp}(t)$, iar curentul aferent sarcinii spațiale cu termenul $i'_{s_ch}(t)$. Atunci când tensiunea care se utilizează este mică (de exemplu, sub 1 kV) și timpul aplicat este de ordinul câtorva minute sau ore (ceea ce implică faptul că nu există o descompunere semnificativă a substanțelor chimice și, deci, nu există nicio variație a concentrației de purtători de sarcină și de dipoli), curenții de polarizare și depolarizare și, de asemenea, curenții de sarcină spațială sunt practic egali ($i_{s_ch}(t) \cong i_{s_ch}'(t)$ and $i_p(t) \cong i_{dp}(t)$), iar curentul de conducție poate fi estimat ca [4.2]:

$$i_c(t) = i_a(t) - i_r(t). \quad (4.4)$$

4.2.1.2 Analiza răspunsului dielectric în domeniul frecvență

Spectroscopia dielectrică în domeniul frecvenței investighează interacțiunea unui câmp electromagnetic cu un material dielectric într-un spectru larg de frecvențe care variază între 10^{-6} pana la 10^{12} Hz [4.3]. Aceasta este o metodă extrem de eficientă pentru studierea structurii și dinamicii sistemelor de izolație, evaluând fenomenele de conducție și polarizare lentă (de exemplu, de orientare și interfacială - Fig. 4.2) care apar la frecvențe semnificativ mai mici în comparație cu fenomenul de polarizare rapidă (electronică și ionică) [4.1, 4.4]. În conformitate cu scopul acestei teze de doctorat, spectroscopia dielectrică a fost utilizată pentru a evalua comportamentul uleiului neîmbătrânit și îmbătrânit accelerat. Mărimile care exprimă cel mai bine mecanismele de conducție și polarizare în gama de frecvențe analizate sunt componentele permitivității relative complexe și cele ale conductivității electrice complexe. Acestea pot fi obținute prin aplicarea unui câmp electric variabil în timp unui material dielectric (ulei mineral în cazul acestui studiu).

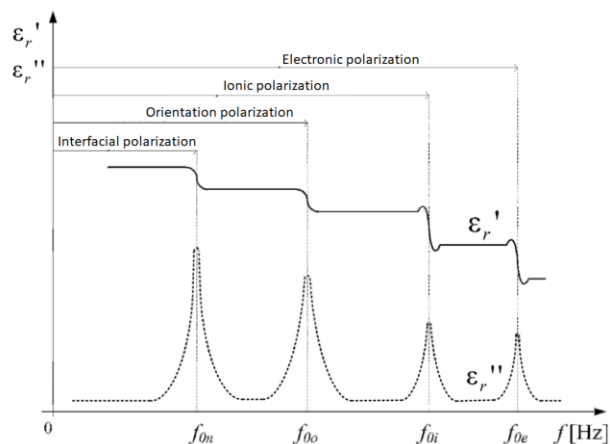


Fig. 4.2 Variația componentelor complexe ale permitivității (ϵ_r' și ϵ_r'') în funcție de frecvența câmpului electric. [4.4]

Metoda de măsurare caracteristică a spectroscopiei dielectrice constă în determinarea proprietăților dielectrice ale materialului testat în funcție de frecvența câmpului electric exercitat asupra acestuia. Astfel, în cazul mai simplu al unui dielectric plan, într-o celulă de măsură alcătuită din doi electrozi plani de arie comună A , între care este introdus eșantionul de grosime d , se formează un condensator plan. Dacă acestui condensator i se aplică o tensiune sinusoidală U_0 de frecvență $f = \frac{\omega}{2\pi}$ (unde ω este pulsația [4.5]), se generează un curent I_0 de aceeași frecvență, dar cu unghiul φ defazat înaintea tensiunii. **Conductivitatea electrică și permitivitatea relativă**, precum și forma probei (suprafața și distanța dintre electrozi sau grosimea probei), definesc relațiile dintre tensiune, intensitatea curentului și diferența de fază dintre acestea.

4.3 Metode de diagnosticare chimice a sistemului de izolație

4.3.1 Analiza gazelor dizolvate (AGD)

Analiza gazelor dizolvate (AGD) a fost identificată ca o metodă esențială pentru detectarea defectelor incipiente în izolația transformatoarelor de putere (TP). Aceasta evaluează starea TP prin măsurarea concentrației diferitelor gaze dizolvate în uleiul de transformator care apar în timpul funcționării datorită factorilor de stres termic și electric. Descompunerea hârtiei și a uleiului produce vapori care, atunci când sunt dizolvați în uleiul de transformator, îi afectează rigiditatea dielectrică. Printre gazele dizolvate în uleiul de transformator se numără gaze combustibile, cum ar fi hidrogenul, metanul, etanul, etilena și gaze necombustibile, cum ar fi dioxidul de carbon, azotul și oxigenul. Supraîncălzirea, descărcările parțiale și arcul electric continuu creează un spectru larg de gaze, iar concentrațiile acestora ne permit să determinăm gravitatea și originea defecțiunilor. Au fost dezvoltate multe tehnici pentru interpretarea datelor AGD: Doernenburg, Rogers, metoda standardizată (IEC) și metodele triunghiului Duval. [4.6]

4.4 Metode de diagnosticare termice și acustice

4.4.1 Termografia în infraroșu

Există situații în care valoarea temperaturii crește peste nivelurile nominale ca urmare a problemelor legate de răcirea transformatorului, precum și a pierderilor care se produc în miezul magnetic sau în înfășurări. Termografia în infraroșu este o metodă eficientă utilizată pentru a identifica de la distanță regimurile de funcționare anormale. Aceasta monitorizează radiația infraroșie eliberată și o convertește într-un semnal electric, ceea ce face posibilă localizarea problemelor sistemului de răcire, a zonelor fierbinți, a conexiunilor electrice imperfecte etc. [4.1]

4.4.2 Detectarea defectelor prin ultrasunete

Acest test este capabil să detecteze atât descărcările continue (arc electric), cât și descărcările parțiale (corona) provocate în funcționarea transformatorului. Deoarece descărcările parțiale indică deteriorarea locală a izolației, acestea provoacă redistribuirea sarcinilor în cadrul sistemului de izolație, ceea ce produce "zgomot". Testele sonice examinează creșterea zgomotului și a vibrațiilor provocate de diverse componente (cum ar fi miezul magnetic, bobinele și așa mai departe). [4.1]

CAPITOLUL 5 CELULA DE ÎMBĂTRÂNIRE ACCELERATĂ ȘI METODA EXPERIMENTALĂ

Acest capitol detaliază caracteristicile celulei de îmbătrânire accelerate. De asemenea, se prezintă dimensionarea acesteia pe baza unui model numeric de calcul și proprietățile materialelor utilizate. Astfel, sunt prezentate configurația finală a celulei de îmbătrânire, împreună cu etapele metodei experimentale utilizate. În urma studiului efectuat a fost ales electrodul metalic cu șase discuri pentru îmbătrânirea accelerată a uleiului mineral. Rezultatele evidențiază formarea bulelor de gaz, a descărcărilor parțiale și a modificării de culoare a uleiului, asigurând astfel unul din obiectivele studiului.

5.1 Considerații generale

Descărcările parțiale provocate de câmpurile electrice intense reprezintă surse locale de căldură. Deși solicitările termice exercitate asupra uleiului de transformator sunt recunoscute ca fiind cele mai importante solicitări care afectează caracteristicile fizico-chimice ale acesteia [5.1], există încă neclarități în ceea ce privește impactul câmpului electric intens asupra componentelor uleiului. Un număr limitat de cercetări tratează modificările caracteristicilor dielectrice ale uleiului în condițiile acțiunii câmpurilor electrice intense și descărcărilor parțiale.

Prin urmare, în aceasta teză de doctorat se propune o metodă originală de îmbătrânire accelerată a uleiului mineral sub acțiunea câmpului electric intens și a DP.

În acest context, menționăm faptul că standardul ASTM D 6180-05 [5.2] specifică modul de examinare a influenței câmpului electric intens și descărcărilor electrice care se produc la suprafața liberă a uleiului, asupra proprietăților acestuia. Astfel, studiul efectuat în cadrul tezei de doctorat vizează elaborarea unei metode experimentale pentru îmbătrânirea accelerată a uleiului mineral sub acțiunea câmpului electric intens și a descărcărilor parțiale produse chiar în volumul de ulei. În acest sens, a fost proiectată și executată o celulă de îmbătrânire dotată cu un electrod metalic central.

5.2 Dimensionarea proiectarea celulei de îmbătrânire

Pentru proiectarea celulei de îmbătrânire s-a pornit de la principiul evitării descărcărilor electrice totale (străpungerii) între electrozii acesteia. În acest sens, s-a utilizat o barieră dielectrică din sticlă, foarte stabilă din punct de vedere termic și chimic, respectiv cu o tensiune de străpungere suficient de ridicată pentru a permite producerea descărcărilor parțiale și îmbătrânirea uleiului. În ceea ce privește caracteristicile electrodului metalic interior, s-a insistat asupra faptului că acesta trebuie să aibă muchiile rotunjite și marginile neascuțite pentru a preveni fenomenul de injecție de sarcină. În plus, electrozii metalici interiori (pentru ambele variante) au fost proiectați pentru a ajuta la crearea de bule de gaz și la formarea de pungă de gaz, care, la rândul lor, vor facilita descărcările electrice locale. [5.3]

5.2.1 Modelul geometric

Întregul model a fost configurat în funcție de eprubetele de sticlă disponibile (dimensiuni de 130 mm înălțime, 14 mm diametru interior și pereți groși de 1,25 mm) realizate din sticlă foarte stabilă atât din punct de vedere dielectric, chimic și termic [5.3]. Prin faptul că servește drept barieră dielectrică între electrodul exterior, compus dintr-o soluție de apă și NaCl, și electrodul metalic interior, acest tub împiedică străpungerea completă a distanței dintre electrozi. În interiorul eprubetei de sticlă, s-a poziționat electrodul metalic, care constă dintr-o tijă cilindrică având inele (discuri) cu un diametru exterior de 12 mm. Suprafața electrodului a fost prelucrată special pentru a satisface atât cerințele de detaliu ale conceptului, cât și limitele de execuție și multiplicare.

Pentru simularea inițială, au fost alese două tipuri de electrozi cu trei și șase discuri fiind fabricate din alamă (Fig. 5.1). Geometria electrodului urmărește să genereze un câmp electric intens care să conducă la formarea bulelor de gaze în volumul de ulei și care vor declanșa ulterior descărcări parțiale. Distanța dintre discurile electrozilor și peretele interior al eprubetei de sticlă a fost stabilit la 1 mm, urmărindu-se evaluarea (în primul rând prin calcul, cu ajutorul COMSOL Multiphysics) a intensității câmpului electric zona respectivă.

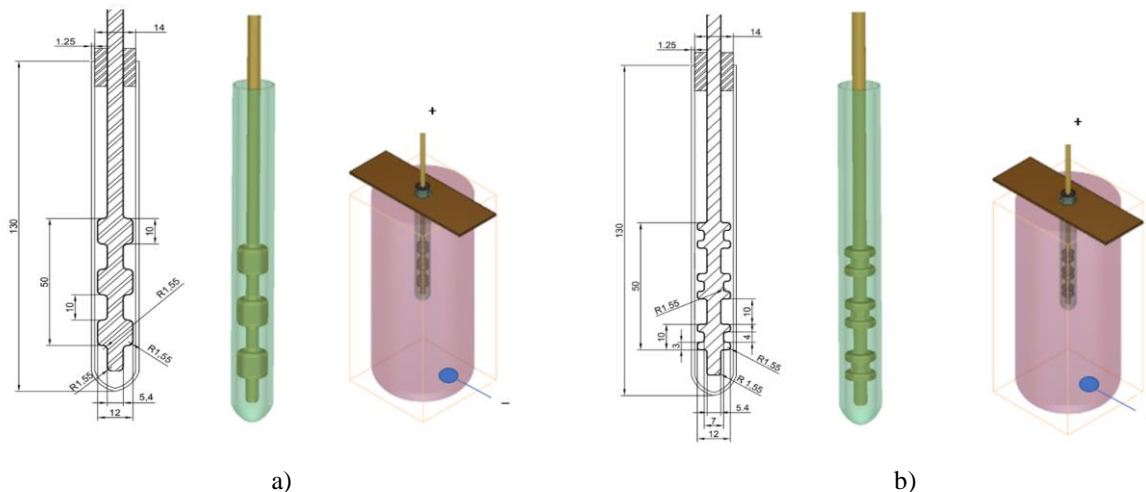


Fig. 5.1. Geometria electrodului metalic și conceptul celulei de îmbătrânire a) trei discuri; b) șase discuri.

Al doilea electrod (exterior) constă într-o soluție de apă și NaCl în care este imersată eprubeta, asigurându-se astfel un contact foarte bun între peretele exterior de sticlă și electrolit. După cum se arată în Fig. 5.1, un electrod din oțel inoxidabil este scufundat în apă sărată, astfel încât tensiunea este aplicată și controlată, între electrodul metalic și soluția de apă cu sare.

5.2.2 Calculul numeric a repartiției câmpului electric în celula de îmbătrânire

5.2.2.1 Modelul fizic

Modelul fizic este prezentat în fig. 5.1 a și b pt. ambele tipuri de electrod. Dimensionarea celulei de îmbătrânire pe baza distribuției câmpului electric presupune determinarea valorilor câmpului electric în spațiul dintre electrodul metalic interior și electrodul exterior conectat la potențial zero. Prin urmare, se va calcula distribuția câmpului electric în pereții de sticlă (ai celulei de îmbătrânire) și în ulei considerând toate mediile liniare, omogene și izotrope.

5.2.2.2 Domeniul de calcul

5.2.2.3 Modelul matematic

5.2.2.4 Condiții de frontieră

5.2.2.5 Rezultatele simulării – electrod metalic cu șase discuri

Pentru o mai bună precizie a calculului în zona în care intensitatea câmpului electric este mare, s-a ales o rețea de discretizare suficient de fină. După crearea rețelei de discretizare, a fost calculată distribuția potențialului electric și intensității câmpului electric (Fig. 5.2) pentru electrodul cu șase discuri (Fig. 5.1b). Rezultatele obținute indică o concentrare a câmpului electric în zonele de margine ale electrodului ceea ce înseamnă că fenomenul de disociere moleculară a uleiului cu formarea ulterioară a bulelor de gaz și inițierea descărcărilor parțiale (DP) (datorită permitivității relative mai mici a gazelor generate) va fi un fenomen dependent de forma geometrică a electrodului.

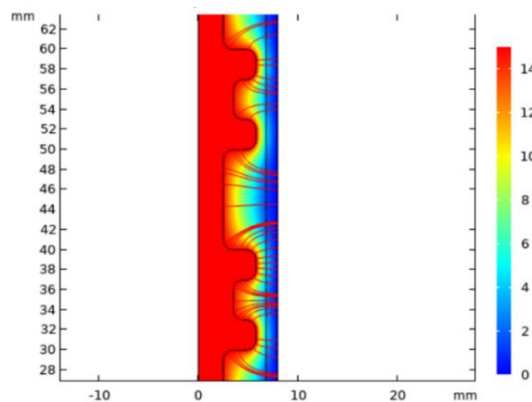


Fig. 5.2. Liniile de câmp electric (electrod cu 6 discuri).

Fenomenele simulate și prezentate mai sus au fost validate prin experimente practice efectuate în laborator (ex: generarea bulelor de gaz și formarea DP între discurile de electrozi).

5.2.2.5.1 Distribuția câmpului electric pentru electrodul cu șase discuri

Valorile potențialului electric și ale intensității câmpului electric (ex. Fig. 5.4 și Fig. 5.5) în volumul de ulei au fost analizate în diferite puncte și direcții de calcul.

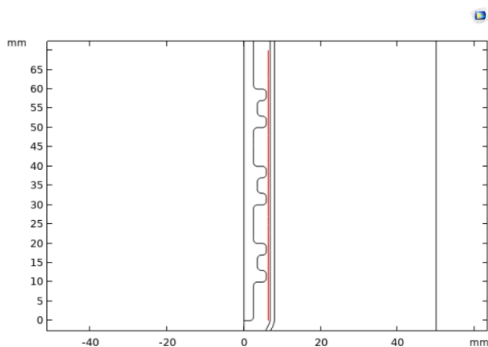


Fig. 5.3. Componenta axială în volumul de ulei utilizat pentru calculul câmpului electric.

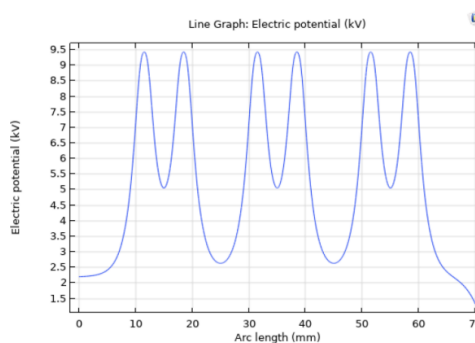


Fig. 5.4. Variația potențialului electric pe direcție axială (în volumul de ulei).

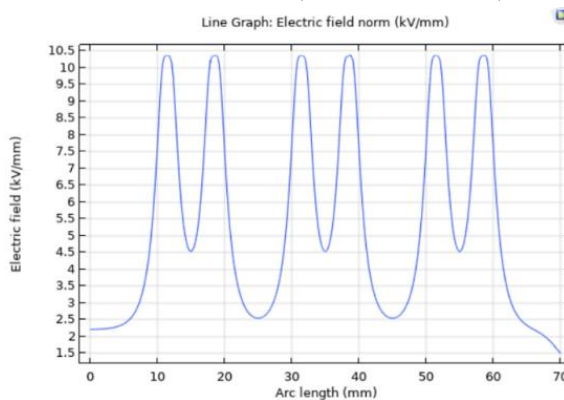


Fig. 5.5. Variația câmpului electric în direcția axială (în volumul de ulei).

Astfel, pe direcția axială (fig. 5.3), se poate observa că valoarea câmpului electric se situează în intervalul de intensitate $\sim 10,5$ kV/mm, suficient pentru a prefigura generarea de descărcări electrice în volumul de ulei și, de asemenea, adecvat pentru a evita străpungerea electrică totală a uleiului (știut fiind că rigiditatea dielectrică a uleiului mineral de transformator este mai mare de 15 kV/mm). Aceste rezultate au permis inițierea testelor practice de laborator pentru îmbătrânirea accelerată a uleiului mineral sub acțiunea câmpului electric și a descărcărilor parțiale.

5.2.2.6 Rezultatele simulării – electrod metalic cu trei discuri

Distribuția câmpului electric a fost determinată și pentru electrodul constituit din trei discuri (a se vedea Fig. 5.1a). Pașii urmați au fost aceiași cu cei din simularea efectuată în cazul electrodului cu șase discuri (Fig. 5.6). Distanța dintre discurile electrodului și peretele eprubetei este menținută la valoarea de 1 mm.

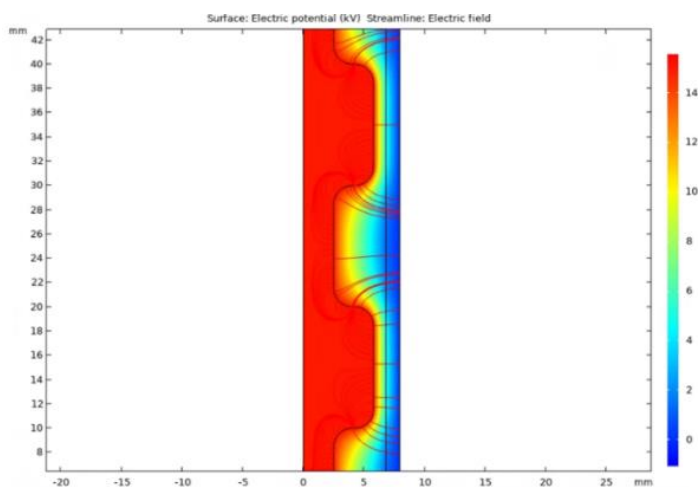


Fig. 5.6. Liniile de câmp electric (electrod cu 3 discuri).

Aceeași observație în ceea ce privește valoarea potențialului electric (aplicat la electrodul de alamă); acesta scade spre peretele tubului de sticlă unde este impusă condiția de potențial electric $V = 0$. De asemenea, liniile de câmp sunt concentrate în zonele de rază ale electrodului (marginile) așa cum se arată în Fig. 5.6.

O observație suplimentară se referă la distribuția liniilor de câmp electric având legătură cu numărul mai mic de muchii (marginii), care determina zone mai puține de concentrare a câmpului electric, ceea ce poate duce la o îmbătrânire mai lentă (mai puține bule și DP se generează).

5.2.2.6.1 Distribuția câmpului electric pentru electrodul cu trei discuri

Distribuția câmpului electric (și a potențialului electric) în interiorul celei de îmbătrânire a fost, de asemenea, calculată pentru modelul de electrod cu trei discuri (Figurile 5.7, 5.8 și 5.9). În primul rând, a fost observată o variație diferită (datorată designului electrozului metalic), cu valori de vârf mai mici decât în cazul electrozului cu șase discuri. Astfel, valoarea de vârf a câmpului electric se încadrează în domeniul de 10 kV/mm (Fig. 5.9), care este ușor mai mică ($\sim 0,5$ kV/mm) decât valorile găsite pentru electrodul cu șase discuri (Fig. 5.5).

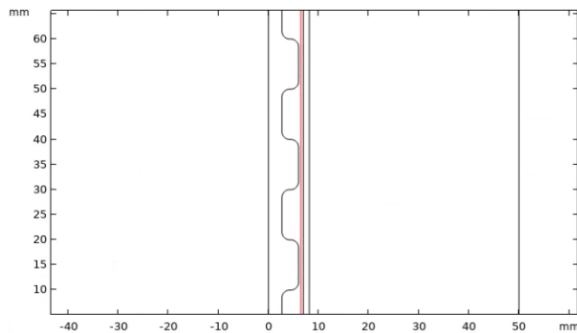


Fig. 5.7. Componenta axială a câmpului electric în volumul de ulei.

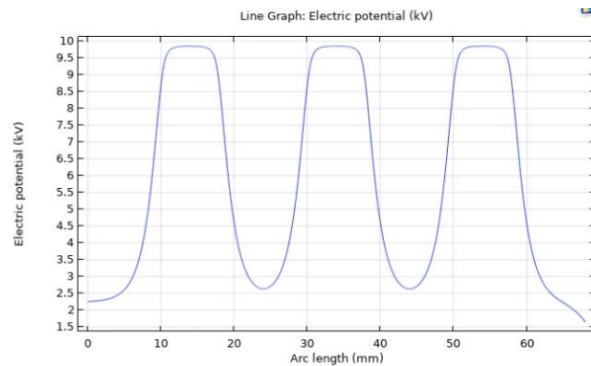


Fig. 5.8. Variația potențialului electric pe direcția axială.

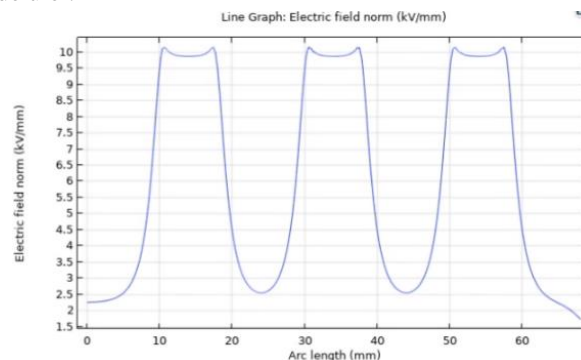


Fig. 5.9. Variația câmpului electric pe axa verticală la suprafața electrozului metalic.

Valorile maxime ale intensității câmpului electric la extremitățile suprafețelor discurilor sunt datorate razei discului care concentrează liniile câmpului electric (determină apariția unui gradient de potențial ridicat).

Observația finală este legată de atenuarea valorii intensității câmpului electric și de dispersia acestuia în cazul electrozului cu trei discuri (în raport cu simularea realizată în cazul electrozului cu șase discuri), toate acestea fiind determinate în principal de geometria electrozului. Chiar dacă rezultatul simulării sugerează că electrodul cu șase discuri determină apariția unui câmp electric mai intens la aceeași valoarea aplicată a potențialului electric, au fost evaluate ambele modele în cadrul unui experiment de laborator, obținându-se rezultatele ce vor fi prezentate în paragraful următor.

5.3 Validare experimentală

Ambele modele de electrozi (fig. 5.1a și b) au fost concepute și realizate în funcție de posibilitățile tehnice și tehnologice. În urma testării celor două tipuri de electrozi au fost evidențiate unele observații, cea mai importantă fiind legată de formarea bulelor de gaz, care este semnificativ mai mare pentru electrozul cu șase discuri. Prin urmare, deși procesul de îmbătrânire se inițiază și se dezvoltă în același mod (mai exact, bulele de gaz apar la suprafața liberă a uleiului și avansează în întregul volum de ulei), în cazul electrozului cu șase discuri se observă un proces de îmbătrânire mai rapid în comparație cu acela care are loc pentru electrozul cu trei discuri pentru aceeași perioadă de îmbătrânire (Fig. 5.10). Gradul de îmbătrânire a uleiului poate fi ușor evaluat pe baza observațiilor vizuale - culoarea uleiului, care este mai închisă în cazul electrozului cu șase discuri. Având în vedere aceste considerente, electrozul cu șase discuri a fost utilizat pentru experimentele ulterioare.

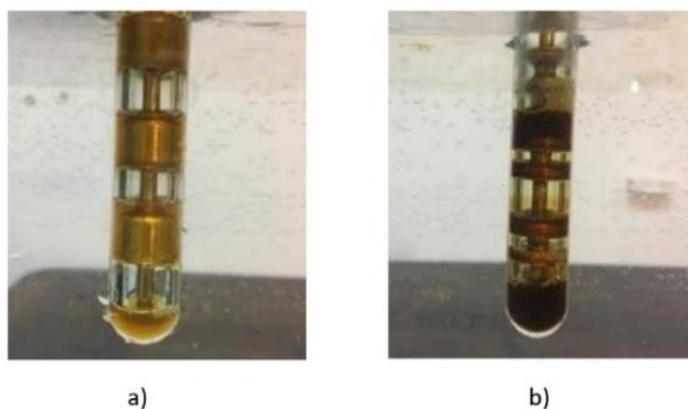


Fig. 5.10. Ulei îmbătrânit timp de 8 ore: a) electrod trei discuri; b) electrod șase discuri.

5.4 Metoda experimentală

Metoda de îmbătrânire urmărește să limiteze influența factorilor externi asupra uleiului pe parcursul procesului de îmbătrânire. Astfel, pregătirea celulei înainte de începerea procesului de îmbătrânire constă în protejarea uleiului cu azot (odată ce eprubeta a fost umplută cu ulei) la suprafața sa liberă și în utilizarea unor dopuri speciale care centrează poziția electrozului în eprubetă, sigilând atât uleiul, cât și azotul. Având în vedere faptul că în celulă ia naștere o presiune ridicată pe tot parcursul experimentului, generarea bulelor de gaz rezultă exclusiv din reacțiile care au loc în interiorul volumului de ulei sub acțiunea câmpului electric intens (similar cu situația funcționării transformatorului de putere), fără implicarea altor gaze atmosferice (de ex: oxigen etc.). O atenție suplimentară a fost acordată lustruirii suprafeței electrozilor ca o modalitate de a preveni concentrarea locală a câmpului electric și de a garanta consistența rezultatelor în toate celulele de îmbătrânire.

5.4.1 Celula de îmbătrânire

O caracteristică cheie a celulei este eprubetă realizată dintr-o sticlă specială, cu un diametru interior de 14 mm și o înălțime de 130 mm, care poate găzdui un volum de ulei de ~8 ml. Electrocul de alamă este poziționat în interiorul tubului de sticlă și constă dintr-o tijă cilindrică cu șase discuri, având un diametru exterior de 12 mm. Prin urmare, există un spațiu de 1 mm între discuri și peretele de sticlă. Un câmp electric intens este generat în celula prin scufundarea acesteia într-o soluție de apă cu sare conectată la masă și prin alimentarea electrocului de alamă cu o tensiune înaltă.

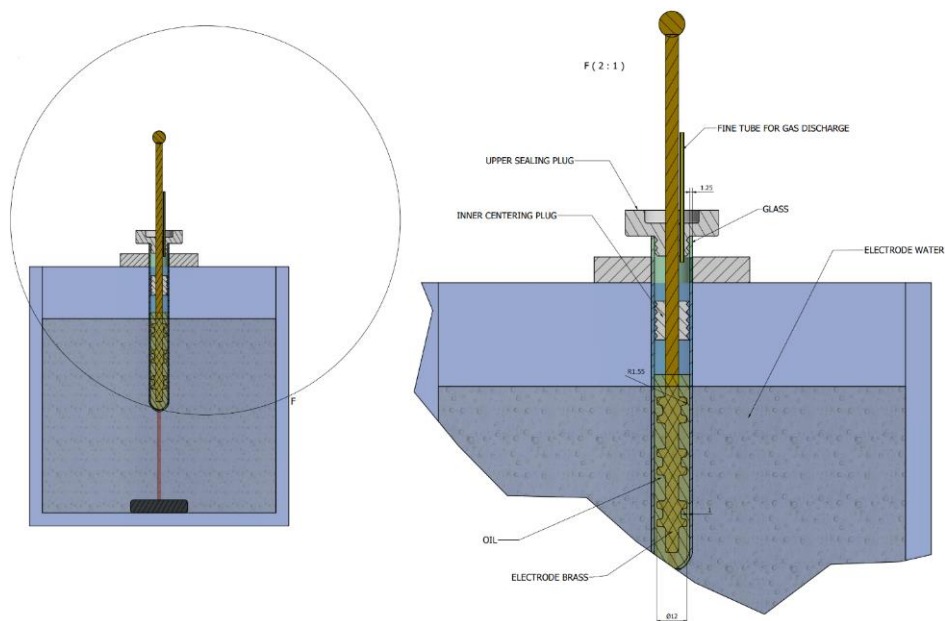


Fig. 5.11. Proiectul și amenajarea celulelor de îmbătrânire.

Grosimea peretelui de sticlă al eprubetei este de 1,25 mm, așa cum se arată în Fig. 5.11, iar electrocul de alamă are marginile rotunjite cu o rază de 1,5 mm, evitându-se orice defecte (sau imperfecțiuni) sau margini ascuțite care ar putea induce injectarea de sarcină sau concentrarea locală a câmpului electric. Evacuarea gazelor generate în interiorul celulei în timpul procesului de îmbătrânire se face cu ajutorul unui canal special practicat în dopul celulei.

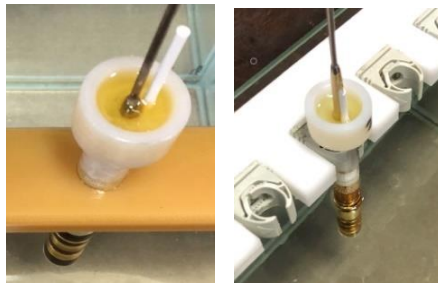


Fig. 5.12 Dopul exterior al celulei de îmbătrânire.

Există o corelație importantă între volumul și nivelul inițial al uleiului din celulă, deoarece acesta trebuie să se situeze la aproximativ 15 mm sub dopul interior, întrucât apariția fenomenului de formare a bulelor de gaz determină o creștere a nivelului acestuia. În ceea ce privește fenomenul de expansiune a uleiului, dopul superior este construit în așa fel încât să colecteze uleiul expulzat din celulă pe parcursul procesului de îmbătrânire.(Fig.5.12)

5.4.2 Instalația experimentală

Instalația experimentală de îmbătrânire accelerată cuprinde un recipient de sticlă care conține o soluție de apă și NaCl în care celulele de îmbătrânire sunt parțial scufundate, așa cum se poate observa Fig. 5.13. Suportul celulelor de îmbătrânire poate găzdui până la 5 celule care pot fi alimentate simultan prin aplicarea unei tensiuni electrice între electrodul metalic interior electrodul din oțel inoxidabil scufundat în soluția de apă sărată.

Astfel, tensiunea poate fi modificată de la 0 la 50 kV, iar experimentările sunt monitorizate video de o cameră care captează până la 30 de cadre pe secundă pe tot parcursul procesului de îmbătrânire. Un cronometru este utilizat pentru a măsura durata de îmbătrânire, cu rolul de a urmări aplicarea tensiunii, iar releul de curent, care este atașat la secțiunea de joasă tensiune a transformatorului, are rolul de a întrerupe alimentarea în cazul în care tubul de sticlă al unei celule de îmbătrânire se străpunge. Testele de îmbătrânire au fost efectuate folosind mostre de ulei mineral MOL de transformator.

Uleiul a fost pregătit timp de 72 de ore la 60 de grade Celsius într-un cuptor cu flux forțat înainte de a fi introdus în celula de îmbătrânire. Au fost stabilite mai multe etape de proces ca parte a tehnicii de pregătire a celulei de îmbătrânire. Astfel, înainte de toate, s-a făcut o curățare temeinică a tuturor părților celulei cu alcool, suflându-se apoi aer comprimat peste ele și uscându-le într-o etuvă încălzită la 50 °C timp de minimum 15 minute. În eprubetă s-a adăugat cu grijă ulei mineral într-o cantitate de 8 ml, fără a se produce bule de aer. Apoi, pentru a izola uleiul de interacțiunea cu aerul, s-a eliberat azot deasupra lui la suprafața sa liberă. Electrocul de alamă, dopul interior și exterior al acestuia au fost apoi introduse succesiv în celulă, ajustând și menținând electrocul în poziția corectă. În cele din urmă, celulele finalizate au fost încălzite la 50 °C timp de 15 minute în cuptor.

Toate testele au fost efectuate în laborator la temperatura ambiantă, cu o tensiune electric aplicat treptat electrozilor de alamă până când aceasta a atins valoarea de 16 kV, moment în care a început fenomenul de formare a bulelor și, ulterior, au apărut descărcări parțiale. După ce descărcările electrice s-au propagat în tot volumul de ulei, valoarea tensiunii a fost ușor redusă la 13 kV. S-a confirmat faptul că bulele de gaz și descărcările parțiale se manifestă la acest nivel de tensiune pe parcursul întregului proces

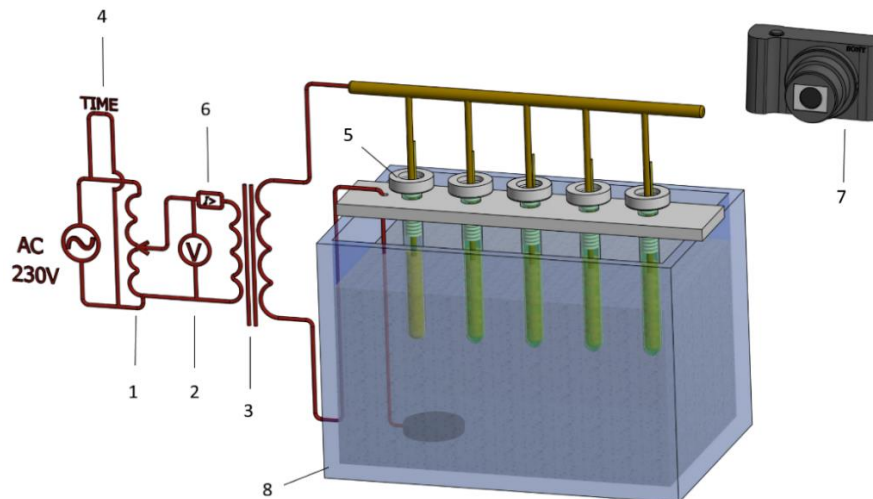


Fig. 5.13. Schema experimentală: 1-transformator reglabil utilizat pentru stabilirea valorii tensiunii; 2-volmetru; 3-transformator de înaltă tensiune; 4-cronometru; 5-celulă de îmbătrânire; 6-releu de curent; 7-cameră video și 8-rezervor de sticlă. [5.4]

Experimentele au fost efectuate pe minimum trei probe pentru fiecare timp de îmbătrânire. Pentru a asigura consistența rezultatelor, valorile finale au reprezentat o medie a celor trei valori măsurate.

5.4.3 Constatările experimentale

În ceea ce privesc diferitele faze de îmbătrânire, s-au făcut câteva observații. În primul rând, fenomenul de formare a bulelor de gaz este evident și ușor de detectat, pornind de la suprafața liberă a uleiului, extinzându-se apoi în întreaga cantitate (Fig. 5.14a). Pe măsură ce bulele de gaz se formează, în interiorul celulei de îmbătrânire pot fi detectate cu ușurință descărcări electrice luminoase, mici și dispersate, așa cum sunt prezentate în Fig. 5.14b.

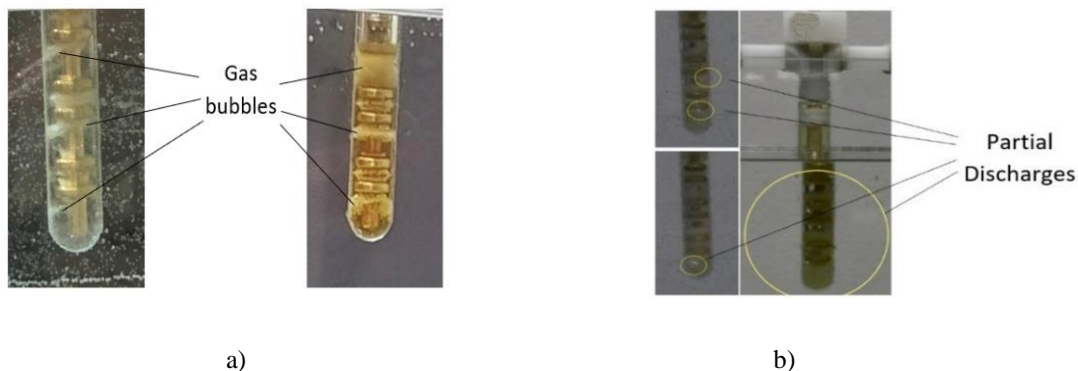


Fig. 5.14. a) Bule de gaz în interiorul celulei de îmbătrânire; b) Descărcări electrice luminescente.

Un punct esențial care trebuie subliniat în fazele ulterioare procesului de îmbătrânire este formarea de pungă de gaz între discurile electrozilor din alamă; astfel, bulele de gaz se adună în pungă, influențând dinamica procesului de îmbătrânire. Mai mult, chiar și după ce tensiunea a fost întreruptă, pungile de gaz formate în timpul procesului de îmbătrânire sunt menținute și conservate. (a se vedea Fig. 5.15).



a)

b)

c)

Fig. 5.15. Pungile de gaz în celula de îmbătrânire.

Fig.5.16. Culoarea uleiului se schimbă pe măsură ce este îmbătrânit: a) ulei neîmbătrânit; b) ulei îmbătrânit 3 ore; c) ulei îmbătrânit 8 ore.

În afara datelor analitice, care vor fi descrise în detaliu în capitolul următor, stadiul procesului de îmbătrânire poate fi indicat din punct de vedere calitativ printr-o inspecție vizuală a culorii uleiului pe parcursul procesului de îmbătrânire. După cum este ilustrat în Fig. 5.16, dacă culoarea uleiului virgin este aproape incoloră, nuanța uleiului devine mai închisă pe măsură ce crește durata aplicării tensiunii [5.4].

CAPITOLUL 6

INFLUENȚA PROCESULUI DE ÎMBĂTRÂNIRE ASUPRA PROPRIETĂȚILOR ULEIULUI MINERAL

În acest capitol sunt discutate rezultatele experimentale și metodele utilizate pentru a evalua proprietățile uleiului. Studiul are în vedere determinarea componentelor reale și imaginare ale permitivității relative complexe și ale conductivității complexe, respectiv a factorului de pierderi dielectrice ale eșantioanelor de ulei îmbătrânit. Ipoteza generării de purtători de sarcină din specii diferite, care sunt mai mobile și mai ușor de activat, este explorată pentru a explica creșterea semnificativă a conductivității electrice a uleiului. Pe baza rezultatelor obținute și a unor modele de calcul, au fost estimate mobilitatea medie a ionilor de conducție și energia de activare pentru diferite durate de îmbătrânire și temperaturi, confirmând ipoteza că moleculele de hidrocarburi se fragmentează continuu în urma acțiunii DP și a câmpului electric intens.

6.1 Introducere

Spectroscopia dielectrică este o metodă bine cunoscută de analiză a interacțiunii dintre un material și un câmp electric armonic exercitat asupra acestuia, oferind informații despre dinamica moleculară pe o gamă largă de frecvențe la diferite temperaturi. Noile instrumente dielectrice permit realizarea spectroscopiei dielectrice în bandă largă (BDS) de la frecvențe foarte joase de 10^{-6} Hz până la frecvențe infraroșii în intervalul 10^{12} Hz. [6.1, 6.2]. În ultima perioadă, spectroscopia dielectrică a înregistrat progrese semnificative datorită progreselor din domeniul software și al electrotehnici.

Această metodă, bazată pe polarizare și conducție electrică, este utilizată pe scară largă pentru diagnosticarea sistemelor de izolație și evaluarea îmbătrânirii.

6.2 Metoda spectroscopiei dielectrice

Pentru a evalua procesul de îmbătrânire accelerată a uleiului mineral sub influența câmpurilor electrice intense și a descărcărilor parțiale, proprietățile dielectrice ale probelor de ulei au fost determinate cu ajutorul spectroscopiei dielectrice. În acest scop, au fost utilizate un spectrometru Novocontrol (Fig. 6.1) și o celulă de măsurare specială pentru lichide dielectrice cu un volum de ~1,8 ml (Fig.6.2). Părțile reale și imaginare ale permitivității relative complexe (ϵ_r' și ϵ_r''), factorul de pierderi dielectrice $\tan \delta$ și conductivitatea complexă (σ) au fost măsurate într-un interval de frecvență de la mHz la MHz.



Fig. 6.1. Spectrometru dielectric 1 - PC; 2 - Unitate centrală; 3 - Celulă de măsurare; 4 - Sistem de control al temperaturii NovoTherm; 5 - Unitate de comandă.



Fig. 6.2. Celula de măsură.

Probele de ulei îmbătrânit au fost adăugate pe rând în celula de măsurare a lichidului din spectrometru pentru a determina modul în care proprietățile dielectrice ale uleiului au fost afectate de procesul de îmbătrânire. Efectul asupra proprietăților dielectrice ale probelor de ulei mineral a fost evaluat pentru o gamă de frecvențe cuprinsă între 3 mHz și 1 MHz la diferite temperaturi. Măsurătorile au fost executate utilizând un spectrometru dielectric, iar toate probele de ulei, înainte de a fi testate, au fost ținute în cuptor timp de 12 ore la 50°C (utilizând un recipient de sticlă de 10 ml) în scopul stabilizării fizico-chimice. Reamintim că pentru consistența rezultatelor, fiecare valoare experimentală a fost calculată ca medie a trei rezultate măsurate.

În ceea ce privește metoda de măsurare, se consideră că o tensiune $u(t) = U_{RMS} \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t)$ de frecvență cunoscută f este aplicată prin electrozii celulei de măsurare la proba de test. Astfel, spectrometrul va măsura un curent $i(t) = I_{RMS} \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - \varphi)$ care are un defazaj φ în raport cu tensiunea aplicată, indicele RMS specificând valoarea medie pătrată a $u(t)$ și $i(t)$, iar pulsația are forma $\omega = 2\pi f$. Prin urmare, rezultatul furnizat de spectrometru va fi o impedanță Z asociată cu proba de testare (uleiul îmbătrânit accelerat în cazul nostru). Proba de ulei testată are capacitatea complexă C de forma următoarei relații:

$$\underline{C} = \frac{1}{j\omega\underline{Z}(\omega)} = \underline{\varepsilon}_r \cdot C_0 = [\varepsilon_r'(\omega) - j\varepsilon_r''(\omega)]C_0, \quad (6.1)$$

unde $\varepsilon_r'(\omega)$ și $\varepsilon_r''(\omega)$ reprezintă partea reală și, respectiv, partea imaginară a permitivității relative complexe a probei de ulei, C_0 reprezintă capacitatea celulei goale (cu aer), iar $j^2 = -1$. [6.3]

Factorul de pierderi dielectrice este:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'}. \quad (6.2)$$

În plus, spectrometrul va măsura conductivitatea complexă a probei de ulei, care va fi calculată ca raportul dintre permitivitatea complexă relativă și impedanța celulei de măsurare goale Z_0 :

$$\underline{\sigma} = \frac{\underline{\varepsilon}_r}{Z_0(\omega)} = j\omega\varepsilon_0\underline{\varepsilon}_r = \omega\varepsilon_0\varepsilon_r''(\omega) + j \cdot \omega\varepsilon_0\varepsilon_r'(\omega) \quad (6.3)$$

unde, $\sigma'(\omega) = \omega\varepsilon_0\varepsilon_r''(\omega)$ este partea reală a conductivității complexe și $\sigma''(\omega) = \omega\varepsilon_0\varepsilon_r'(\omega)$ este partea imaginară a conductivității complexe. [6.3]

În cazul în care frecvența tensiunii aplicate are valori reduse, σ' poate fi aproximată considerată conductivitatea electrică în curent continuu σ_{DC} ($\sigma' \cong \sigma_{DC}$). Astfel, examinând domeniile de frecvență joasă în care spectrul real al conductivității complexe σ' este constant, se identifică conductivitatea statică a probelor de ulei mineral. În plus, avem relația Jonscher, care ilustrează creșteri ale părții reale a conductivității complexe pentru frecvențe mai mari [6.5, 6.6]:

$$\sigma'(\omega) = \sigma_0 + A(T)\omega^n = \sigma_0[1 + (\omega \cdot \tau)^n], \quad (6.4)$$

astfel, pentru o frecvență redusă, valoarea $\sigma'(\omega) \cong \sigma_0 \cong \sigma_{DC}$ este conductivitatea statică discutată mai sus.

Ultima parte a ecuației lui Jonscher $A(T)\omega^n$ reprezintă σ_{AC} ; termenul dependent de frecvență, cunoscut ca partea disipativă a conductivității (având exponentul $n \cong 1$ pentru uleiul mineral), care caracterizează mișcarea purtătorilor de sarcină (ioni) pe distanțe scurte. Ecuația (6.4) conține timpul de relaxare τ corespunzător fenomenului de relaxare electrică, care modelează și face ca $\sigma'(\omega)$ să fie o lege puternică caracterizată de n ($0 < n \leq 1$), atunci când $\omega \cdot \tau \gg 1$, și, de asemenea, face ca $\sigma'(\omega) \cong \sigma_0 \cong \sigma_{DC}$ atunci când $\omega \cdot \tau \ll 1$. [6.3] Fenomenul de relaxare electrică menționat mai sus este explicat mai detaliat în [6.1, 6.7], fiind legat de mobilitatea ionilor liberi în medii dielectrice structural dezordonate, cum ar fi uleiurile minerale produse din diverse combinații de hidrocarburi.

6.3 Rezultate experimentale și discuții

Variațiile cu frecvența și temperatura pentru principalii factori de diagnosticare ai uleiului mineral MOL îmbătrânit electric accelerat vor fi prezentate în paragrafele următoare, evidențiind și insistând asupra fenomenelor particulare care rezultă din acest proces.

6.3.1 Permitivitatea relativă complexă și factorul de pierderi dielectrice

Figurile 6.3, 6.4, prezintă variația componentei reale a permitivității relative complexe cu frecvența la diferite durate de îmbătrânire pentru un interval de temperatură de 25 °C și 40 °C. De asemenea, fig. 6.5, 6.6, prezintă var. componentele imaginare ale permitivității relative complexe cu frecvența la diferite durate de îmbătrânire și la aceleași temperaturi. Rezultatele obținute, arată că modificările ϵ_r' și ϵ_r'' sunt tipice pentru uleiul mineral în cazul uleiului neîmbătrânit și condiționat, așa cum au fost cuantificate și prezentate în unele cercetări anterioare [6.8].

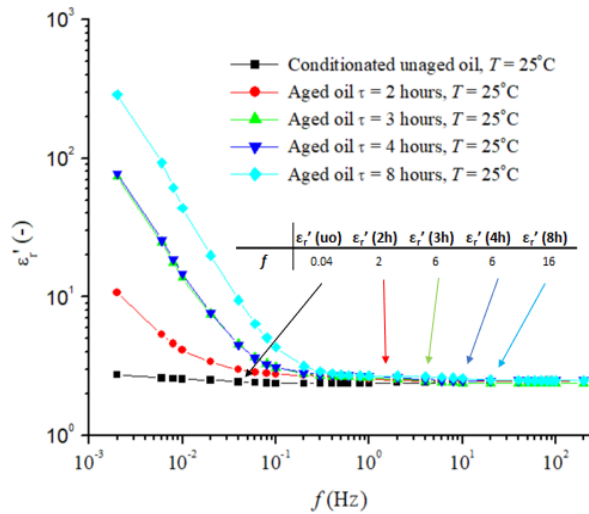


Fig. 6.3. Variația părții reale a permitivității relative complexe (ϵ_r') în funcție de frecvență pentru diferite durate de îmbătrânire (temperatura de măsurare $T = 25$ °C și tensiunea de aplicată $U = 13$ kV).

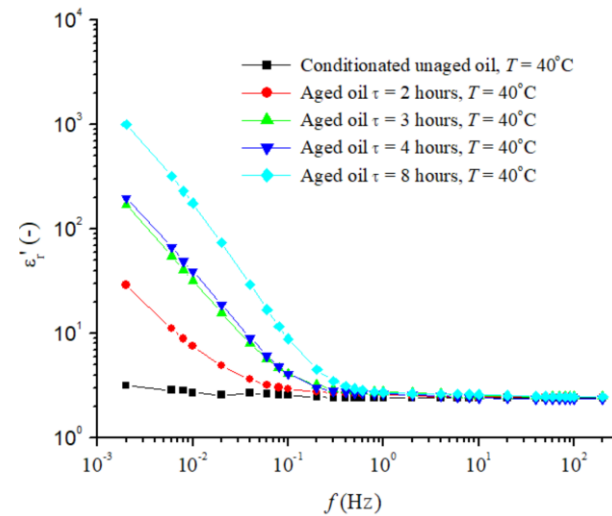


Fig. 6.4. Variația părții reale a permitivității relative complexe (ϵ_r') în funcție de frecvență pentru diferite durate de îmbătrânire (temperatura de măsurare $T = 40$ °C și tensiunea de aplicată $U = 13$ kV).

Totuși, examinând probele care au fost îmbătrânite, observăm ca valorile lui ϵ_r' cresc semnificativ, în special atunci când frecvența câmpului electric aplicat scade sub 0.1 Hz. De asemenea, aceeași situație se observă și în cazul lui ϵ_r'' , care, într-o gamă largă de frecvențe, ia valori mult mai mari în comparație cu cele ale uleiului neîmbătrânit (Fig. 6.5-6.6). În general, acest lucru indică o concentrație mare de radicali liberi polari și purtători liberi de sarcină, ceea ce atestă existența unor puternice procese de deteriorare în ulei. Acestea, bineînțeles, determină intensificarea proceselor de conducție și polarizare electrică.

Trebuie acordată o atenție specială variației permitivității relative complexe în funcție de frecvență, deoarece, în domeniul frecvențelor joase, fiecare moleculă (implicit dipolii) ar putea urmări variațiile câmpului electric. Ca urmare, partea reală a valorii permitivității relative rămâne neschimbată pe măsură ce frecvența se reduce, fenomen care se conturează prin valoarea de platou al lui $\epsilon_r'(\omega)$ (vezi Fig. 6.3-6.4).

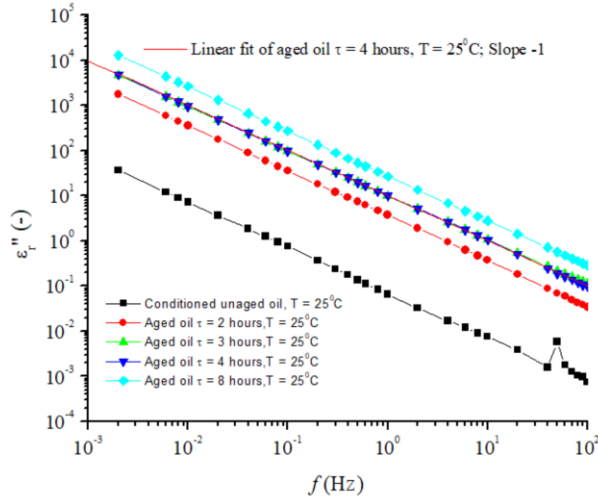


Fig. 6.5. Variația părții imaginare a permitivității relative complexe (ϵ_r'') în funcție de frecvență pentru diferite durate de îmbătrânire (temp. de măsurare $T = 25$ °C și tensiunea de îmbătrânire aplicată $U = 13$ kV).

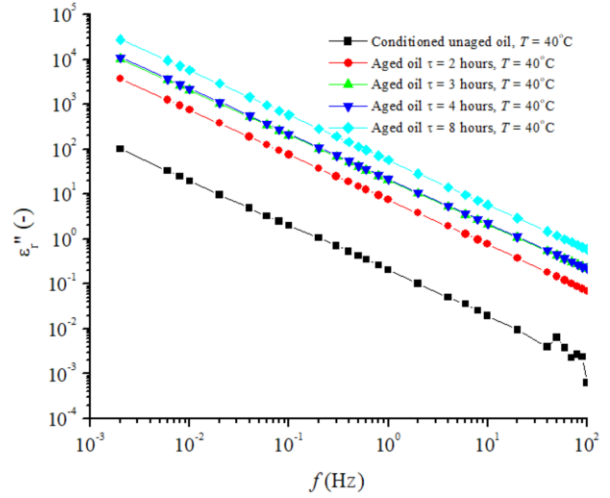


Fig.6.6. Variația părții imaginare a permitivității relative complexe (ϵ_r'') în funcție de frecvență pentru diferite durate de îmbătrânire (temp. de măsurare $T = 40$ °C și tensiunea de îmbătrânire aplicată $U = 13$ kV).

După cum știm $\sigma'(\omega) = \omega\epsilon_0\epsilon_r''(\omega)$ și dacă $\sigma'(\omega) = \sigma_{DC} = ct. \rightarrow \epsilon_r''(\omega) = \frac{\sigma'(\omega)}{\omega\epsilon_0}$; ca o consecință fluctuația lui $\epsilon_r''(\omega)$ este invers prop. cu ω (adica cu frecvența), iar linia reprezentând variația lui $\log \epsilon_r''$ cu $\log \omega$ va avea o panta egala cu -1 (Fig.6.5). Acesta reprezintă un exemplu tipic de fenomen de conducție în care σ_{DC} poate fi estimat la frecvențe joase corespunzător zonei din grafic unde avem o variație liniară cu panta -1 pentru $\epsilon_r''(\omega)$ și partea reală a permitivității complexe $\epsilon_r'(\omega) = ct.$ [6.9] Merită să se acorde o atenție deosebită modului în care ϵ_r' și ϵ_r'' variază în domeniul frecvențelor foarte joase. Astfel, o creștere a valorii lui ϵ_r' odată ce frecvența câmpului electric scade poate fi explicată, în concordanță cu teoria Debye [6.1], prin procesele de relaxare electrică care au loc la frecvențe joase.

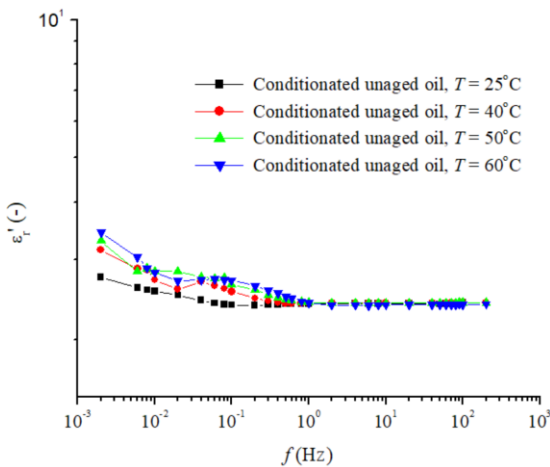


Fig. 6.7. Partea reală a variației permitivității relative complexe (ϵ_r') în funcție de frecvență pentru diferite temperaturi de măsurare (ulei neîmbătrânit și tensiune de îmbătrânire aplicată $U = 13$ kV).

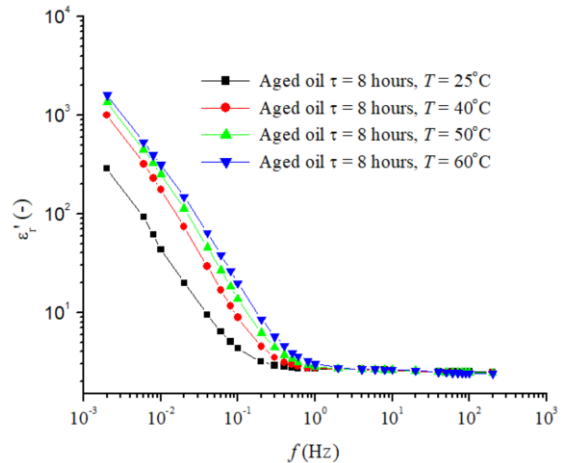


Fig. 6.8. Variația părții reale a permitivității relative complexe (ϵ_r') în funcție de frecvență pentru diferite temperaturi de măsurare (ulei îmbătrânit 8 ore și tensiune de îmbătrânire aplicată $U = 13$ kV).

Ca atare, valoarea la care crește ϵ_r' sau punctul în care traiectoria își modifică panta poate fi utilizată pentru a determina frecvența de relaxare asociată cu fenomenul de relaxare electrică. (a se vedea Fig. 6.3). Fig. 6.7 și 6.8 prezintă partea reală a permitivității relative complexe pentru uleiul condiționat și, respectiv, îmbătrânit la diferite temperaturi.

Duratele mai lungi de îmbătrânire și temperaturile de măsurare mai ridicate se dovedesc a reduce regiunea de platou din variația lui ϵ_r' cu frecvența (de exemplu, Fig. 6.3 pentru uleiul neîmbătrânit de la 0,04 Hz la 16 Hz pentru o perioadă de îmbătrânire de 8 ore la o temperatură de măsurare de 25 °C). Acest lucru apare cel mai probabil ca urmare a diferitelor specii de purtători de sarcină generate în timpul procesului de îmbătrânire, precum și a scăderii densității lichidului și a implicării unor procese complicate care sunt susceptibile de a declanșa scăderea polarizabilității cu temperatura. [6.9] Conform constatărilor din Fig. 6.3, uleiul îmbătrânit prezintă valori incredibil de mari ale lui ϵ_r' atunci când este testat la frecvențe din gama mHz-ilor. Astfel, ϵ_r' poate atinge valori cuprinse între câteva sute și chiar peste o mie pentru frecvențe sub câteva mHz. De asemenea, Fig. 6.8 arată că, în cadrul unui spectru de frecvențe similar, creșterile temperaturii de măsurare de la 25 °C la 60 °C determină o creștere importantă a valorii ϵ_r' pentru uleiul îmbătrânit. Fenomenul de polarizare la electrod (cunoscut și sub numele de polarizare spațială), care corespunde acumulării de purtători de sarcină mobili la limita dintre electrozii celulei de măsură și uleiul testat sub efectul unui câmp electric, ar putea fi explicația acestor valori uriașe (o valoare extrem de mare care nu poate fi explicată prin procese de relaxare a conducției). Astfel, la interfața electrozilor se dezvoltă un strat dublu electric, prin care tensiunea care se aplică scade rapid și se produce o polarizare electrică importantă [6.1, 6.10]. Fenomenul de polarizare spațială se dezvoltă dacă timpul de tranzit al purtătorilor de sarcină liberi între electrozi este mai scurt decât semiperioada tensiunii, permițându-le să ajungă la electrodul de semn opus și astfel să realizeze o sarcină spațială la joncțiunea ulei-electrod. Conform studiilor de specialitate, acest efect este adesea rezervat materialelor moderat sau puternic conductoare. Uleiul mineral în stare bună (neîmbătrânit), fiind un izolator foarte bun, nu se află în mod normal într-o astfel de situație, după cum se observă în toate diagramele. Cu toate acestea, deoarece uleiul mineral are în principal conducție ionică, este plauzibil să presupunem că acest fenomen este determinat în principal de ioni liberi care se dezvoltă în ulei ca urmare a descărcărilor parțiale și a unui câmp electric de mare intensitate.

Un alt aspect esențial este legat de modul în care variază factorul de pierderi dielectrice cu frec. câmpului electric pentru uleiul îmbătrânit, măsurat la diferite temperaturi (fig. 6.9 - 6.10). Astfel, pentru valori ale frecvenței cuprinse între 10^{-2} și 10^{-1} Hz, se poate observa că, în funcție de durata de îmbătrânire, alura graficelor de variație se modifică, iar factorul de pierdere pare să atingă o valoare maximă, după care prezintă o ușoară scădere. Acest lucru se întâmplă datorită efectului fenomenului de polarizare la electrod, care determină o creștere rapidă a lui ϵ_r' și, ca urmare, o scădere a valorilor calculate ale lui $\text{tg } \delta$ (fact. de pierderi dielectrice fiind $\text{tg } \delta = \epsilon_r'' / \epsilon_r'$).

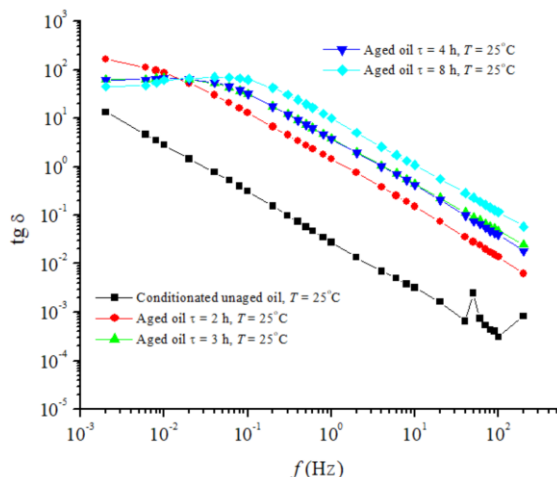


Fig.6.9. Variația $\text{tg}\delta$ (factor de pierdere dielectrică) în funcție de frecvență pentru diferite perioade de îmbătrânire (temperatura de măsurare $T = 25^\circ\text{C}$ și tensiunea aplicată (de îmbătrânire) $U = 13\text{ kV}$).

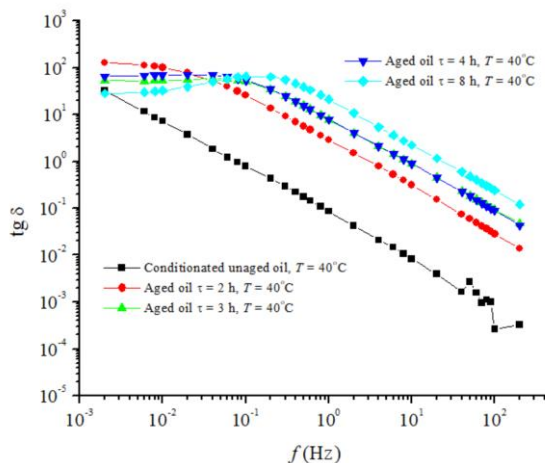


Fig.6.10. Variația $\text{tg}\delta$ (factor de pierdere dielectrică) în funcție de frecvență pentru diferite perioade de îmbătrânire (temperatura de măsurare $T = 40^\circ\text{C}$ și tensiunea aplicată (de îmbătrânire) $U = 13\text{ kV}$).

6.3.2 Modulul electric complex

Pentru a recunoaște și înțelege mai bine răspunsul dielectric (conducția), precum și pentru a atenua efectul polarizării la electrod, se vor studia părțile reale și imaginare ale modului electric, știind că modulul electric echivalează cu relaxarea câmpului electric în materialul dielectric, facilitându-ne astfel detectarea fenomenelor asociate de mișcarea sarcinilor electrice [6.1]. Frecvențele pentru care M'' prezintă valori maxime la temperatura de măsurare de 40°C (ca exemplu) sunt prezentate în tabelul 6.1 și reprezintă frecvențe de relaxare, unde diverse specii de purtători de sarcină și radicali liberi polari sunt puternic relaxați (vezi fig.6.11). Această valoare maximă indică faptul că, pentru toate frecvențele echivalente, purtătorii de sarcină se orientează cel mai ușor în câmpul electric.

Tabel 6.1 Frecvența corespunzătoare vârfului $M''(f)$ la toate perioadele de îmbătrânire și temperatura de măsură 40°C .

	M''	M''	M''	M''	M''
Durata de îmbătrânire	(uo)	(2h)	(3h)	(4h)	(8h)
Frecvență de vârf (Hz)	0.08	3	8	9	18

De asemenea, toate valorile de vârf ale lui $M''(f)$ arată că frecvența de relaxare crește odată cu creșterea timpului de îmbătrânire și a temperaturii de măsură. Aceasta tendință poate fi atribuită, de asemenea, apariției unor specii de radicali liberi polari a căror relaxare are loc la frecvențe din ce în ce mai mari; aceștia orientându-se mai ușor la aceste frecvențe de câmp electric.

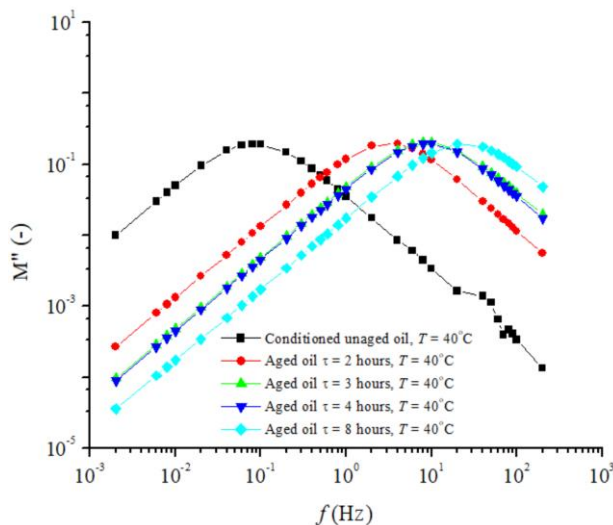


Fig.6.11. Variația componentei imaginare a modului electric (M'') în funcție de frecvență pentru diferite perioade de îmbătrânire (temperatura de măsurare $T = 40^{\circ}\text{C}$ și tensiunea de îmbătrânire aplicată $U = 13\text{ kV}$).

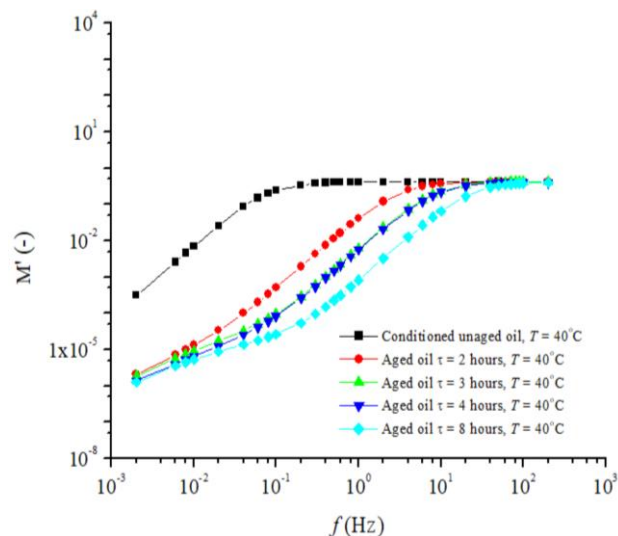


Fig.6.12. Variația componentei imaginare a modului electric (M') în funcție de frecvență pentru diferite perioade de îmbătrânire (temperatura de măsurare $T = 40^{\circ}\text{C}$ și tensiunea de îmbătrânire aplicată $U = 13\text{ kV}$).

În plus, pentru variația M' cu frecvența, aceleași frecvențe par să declanșeze modificări ale pantelor curbei, fiind influențate în mod similar de durata de îmbătrânire și de temperatura de măsurare. Dependența de frecvență a componentei reale a modului electric M' pentru diferite durate de îmbătrânire este prezentată în Fig. 6.12.

Se poate observa că M' se reduce la valori foarte mici la frecvențe mici, ceea ce indică faptul că influența polarizării electrodului a fost eliminată [6.1]. După cum se observă în figurile 6.13 și 6.14, există o dependență semnificativă de temperatură și de durata de îmbătrânire a frecvenței punctului de vârf al lui $M''(f)$.

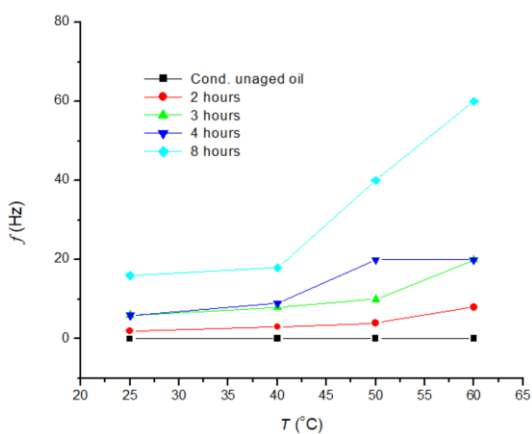


Fig. 6.13. Variația frecvenței corespunzătoare punctului de vârf pentru $M''(u_0)$; $M''(2h)$; $M''(3h)$; $M''(4h)$; $M''(8h)$ în funcție de temperatura de măsurare (temperatura de măsurare $T = 25; 40; 50; 60^{\circ}\text{C}$ și tensiunea de îmbătrânire aplicată $U = 13\text{ kV}$).

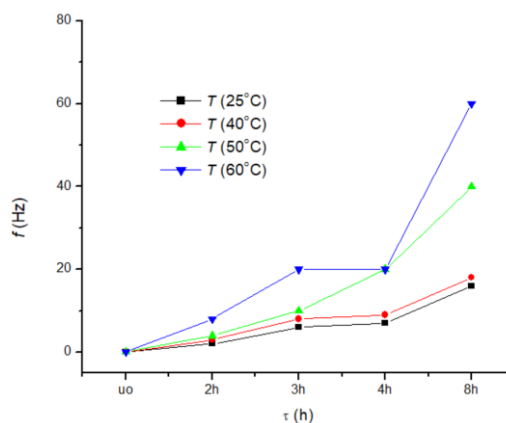


Fig.6.14. Variația frecvenței corespunzătoare punctului de vârf pentru $M''(u_0)$; $M''(2h)$; $M''(3h)$; $M''(4h)$; $M''(8h)$ în funcție de durata îmbătrânirii (temperatura de măsurare $T = 25; 40; 50; 60^{\circ}\text{C}$ și tensiunea de îmbătrânire aplicată $U = 13\text{ kV}$).

Reprezentarea grafică a acestor valori face mai evidentă legătura cauzală dintre acești parametri; o astfel de creștere este asociată cu mobilitatea pe distanțe lungi a purtătorilor de sarcină și, de asemenea, cu creșterea concentrației de radicali liberi polari. Valori similare pentru aceleași temperaturi și timpi de îmbătrânire au fost observate pentru variația $M'(f)$. Această schimbare semnificativă pentru uleiul îmbătrânit întărește ipoteza că radicalii liberi polari și purtătorii de sarcină care apar ulterior în ulei după îmbătrânire se orientează mai ușor în câmpuri electrice, în funcție de specii și concentrații.

6.3.3 Componentele conductivității complexă a uleiului mineral (MOL)

Pentru a identifica mai bine modificările dielectrice determinate de influența câmpului electric de intensitate mare și a descărcărilor parțiale, au fost analizate și componentele reale și imaginare ale conductivității complexe (σ' și σ''). Rezultatele evidențiază un platou larg în spectrele de frecvență măsurate ale componentei reale a conductivității complexe (σ') de la 10^{-3} Hz până la aproximativ 2 Hz, valoarea absolută crescând spre valori mai mari odată cu creșterea duratei de îmbătrânire și a temperaturii de măsurare, așa cum se arată în figurile 6.15-6.16.

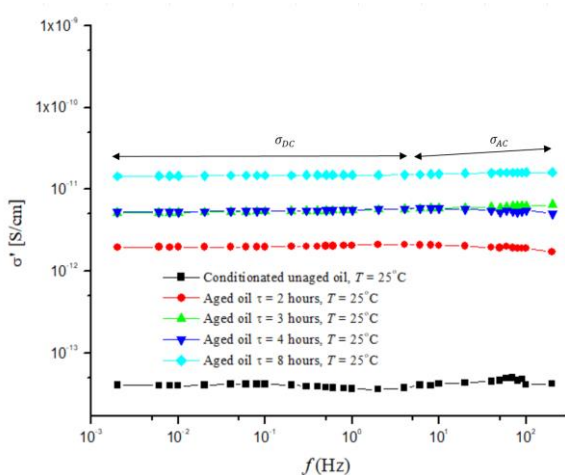


Fig.6.15. Variația lui σ' în funcție de frecvență pentru diferite durate de îmbătrânire (temperatura de măsurare $T = 25^\circ\text{C}$ și tens. de îmbătrânire aplicată $U = 13\text{ kV}$).

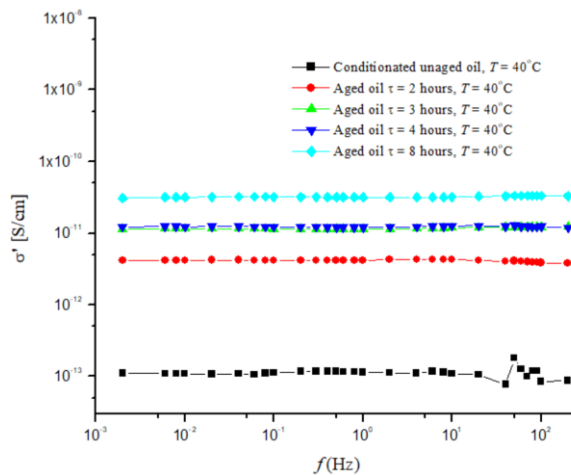


Fig.6.16. Variația lui σ' în funcție de frecvență pentru diferite durate de îmbătrânire (temperatura de măsurare $T = 40^\circ\text{C}$ și tens. de îmbătrânire aplicată $U = 13\text{ kV}$).

Reamintim că un astfel de platou în care partea reală a conductivității nu se modifică cu frecvența definește conductivitatea în curent continuu, adică σ_{DC} . Studiul relevă faptul că, la frecvențe joase, conductivitatea este generată prin deplasarea ionilor pe distanțe lungi, ceea ce duce la transportul de sarcină între electrozi. În plus se constată că panta diagramelor pentru eșantioanele de ulei îmbătrânit se modifică ușor (Fig. 6.15) la frecvențe mai mari de 2 Hz, ceea ce indică faptul că, odată cu creșterea frecvenței, crește și $\sigma'(f)$

Acest lucru se întâmplă datorită componentei disipative a conductivității $\sigma_{AC}(f)$, care apare suplimentar, ca urmare, ioni se deplasează pe distanțe scurte fără a ajunge la electrozii celulei de măsură, deci nu există tranzit de sarcină între aceștia. În plus, absența dispersiei σ'' în spectrul de joasă frecvență pentru uleiul neîmbătrânit (Fig. 6.17) indică o cantitate mai mică de purtători de sarcină dacă se compară cu probele de ulei îmbătrânit (Fig. 6.18).

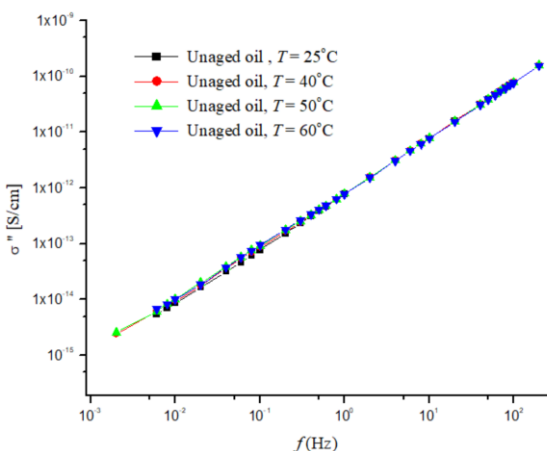


Fig.6.17. Variația lui σ'' în funcție de frecvență la diferite temperaturi pentru proba de ulei neîmbătrânit.

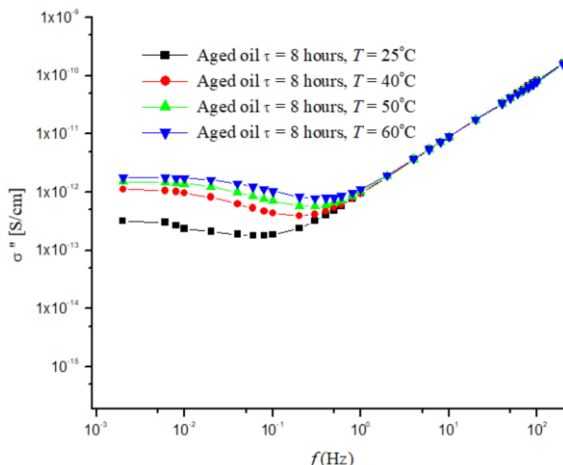


Fig.6.18. Variația lui σ'' în funcție de frecvență la diferite temperaturi pentru proba de ulei îmbătrânit la 8 ore.

Acest aspect este demonstrat, de asemenea, de aproape inexistența fenomenului de polarizare a electrodului pentru probele neîmbătrânite, chiar și în domeniul de frecvență scăzută.

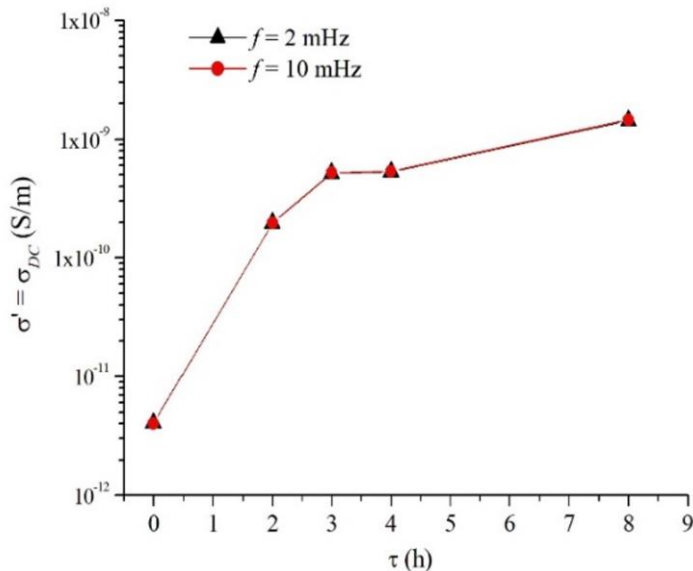


Fig. 6.19. Variația lui σ_{DC} (sau partea reală a conductivității complexe - σ') în funcție de durata de îmbătrânire pentru $f = 2$ și 10 mHz la $T = 25$ °C.

Pe baza datelor furnizate anterior și recunoscând, în general, că σ_{DC} este echivalent cu σ' la frecvențe joase (cum ar fi intervalul de la 2 mHz la 2 Hz), fig. 6.19 indică, fără îndoială, că σ_{DC} crește odată cu durata de îmbătrânire, demonstrând că, concentrația și, potențial, mobilitatea ionilor de conducție cresc odată cu creșterea perioadei de îmbătrânire (τ).

6.3.4 Mobilitatea ionilor de conducție

Gândindu-ne la posibilitatea generării unor ioni cu mobilitate mai mare odată cu creșterea duratei de îmbătrânire (care ar putea contribui la creșterea uriașă a conductivității electrice observată în Fig. 6.19), ne-am concentrat atenția pe estimarea mobilității medii a ionilor liberi care participă la procesul de conducție.

Cu ajutorul modelului simplificat Tobazéon [6.11], am estimat mobilitatea medie a ionilor liberi (μ_{ions}) în raport cu frecvența asociată fazei de început a fenomenului de polarizare a electrodului f_0 . Bazându-ne pe faptul că valorile frecvenței f_0 corespunde valorilor de vârf ale graficelor $M''(f)$ din Fig. 6.11 și cu punctele de inflexiune ale pantelor $M'(f)$ din Fig. 6.12 (adică frecvența câmpului electric la care ionii se pot deplasa între electrozii celulei de măsură), s-a observat că o prelungire a perioadei de îmbătrânire se reflectă într-o creștere a valorii lui f_0 (Tabelul 6.2). Ca urmare, frecvența de relaxare f_0 a ionilor de conducție crește odată cu durata de îmbătrânire, ceea ce duce la o scădere a timpului de relaxare pe măsură ce crește durata de expunere la acțiunea câmpului electric și a descărcărilor parțiale. Figura 6.20 descrie variația mobilității medii a ionilor de conducție în funcție de perioada de îmbătrânire.

După cum s-a anticipat, valorile mobilității (obținute prin metoda simplificată de mai sus) crește semnificativ odată cu durata de îmbătrânire, de la $10^{-7} \text{ m}^2/\text{Vs}$ pentru uleiul neîmbătrânit la $10^{-4} \text{ m}^2/\text{Vs}$ pentru ulei îmbătrânit la $\tau = 8 \text{ h}$.

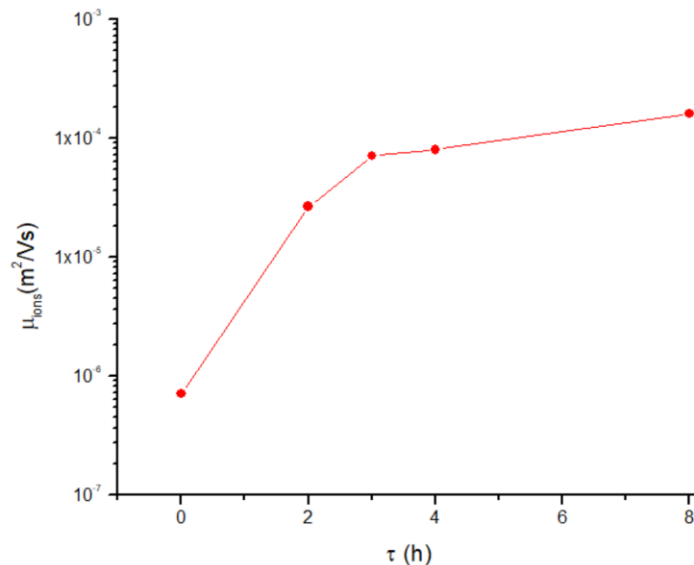


Fig. 6.20. Variația mobilității medii a ionilor liberi în funcție de (τ) timpul de îmbătrânire la $T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$.

În baza metoda descrisă mai sus, valoarea medie a mobilității ionice obținută pentru uleiul mineral neîmbătrânit la $T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ (a se vedea Tabelul 6.2) este de $3.55 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, fiind o valoare mai mare decât cele raportate în anumite publicații de specialitate ($\sim 10^{-9} \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$) [6.12].

Tabel 6.2. Frec. de relaxare (f_0) și mob. ionică (μ_{ions}) calculate pentru diferite durate de îmbătrânire la $T = 40\text{ }^\circ\text{C}$

Temp. ($^\circ\text{C}$)	Timp de Îmbătrânit(ore)	f_0 (Hz)	$M_{ions}(\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1})$
40 $^\circ\text{C}$	uo	0.08	7.10861E-07
40 $^\circ\text{C}$	2	3	2.66573E-05
40 $^\circ\text{C}$	3	8	7.10861E-05
40 $^\circ\text{C}$	4	9	7.99719E-05
40 $^\circ\text{C}$	8	18	1.599E-04

Acest rezultat se datorează faptului că estimarea mobilității ionice depinde de valoarea frecvenței de relaxare a ionilor de conducție și, prin urmare, este sensibilă la metodele de calcul. Cu toate acestea, unele cercetările au evidențiat valori comparabile ale mobilității ionice. După cum se poate observa în Fig. 6.20, rezultatele sugerează că mobilitatea ionilor de conducție crește odată cu perioade mai lungi de îmbătrânire. Prin urmare, prelungirea duratei de îmbătrânire generează specii purtătoare de sarcină care au o mobilitate mai mare (deci ioni foarte mobili). În consecință, creșterea conductivității electrice a uleiului îmbătrânit poate fi atribuită următorilor factori: creșterea concentrației ionilor de conducție, precum și generarea de purtători de sarcină (noi) care au o mobilitate mai mare.

6.3.5 Energia de activare a ionilor de conducție

Datele prezentate mai sus arată în mod cert că, sub influența câmpului electric și a DP, conducția electrică în ulei se modifică semnificativ. Am aprofundat motivul acestor schimbări de conductivitate, care poate fi cauzat, pe de o parte, de creșterea concentrației de purtători de sarcină liberi (fenomen dependent de procesul de îmbătrânire) și, pe de altă parte, după cum s-a demonstrat deja, de generarea de purtători de sarcină care sunt mai mobili și astfel susceptibili să participe la procesul de conducție. O posibilă soluție la această problemă poate fi oferită de estimarea valorii medii a energiei de activare E_a a ionilor de conducție. Energia de activare este definită ca fiind cantitatea minimă de energie necesară pentru ca purtătorii liberi de sarcină (ioni etc.) să se angajeze în procesul de conducție, respectiv să se poată deplasa liber sub influența câmpului electric. Reprezentarea grafică a $\log\sigma_{DC}$ în funcție de $1/T$, redată sub forma unei linii drepte cu o pantă echivalentă cu $-E_a/k$, poate fi utilizată pentru estimarea valorii E_a .

În figura 6.21 sunt prezentate graficele având pantele corespunzătoare pentru valorile lui σ_{DC} de început (0h), mijloc (4h) și sfârșit (8h) a perioadelor de îmbătrânire. Valorile medii ale energiei de activare atât pentru uleiul mineral (UM) neîmbătrânit, cât și pentru cel îmbătrânit sunt menționate de asemeni în Tabelul 6.3.

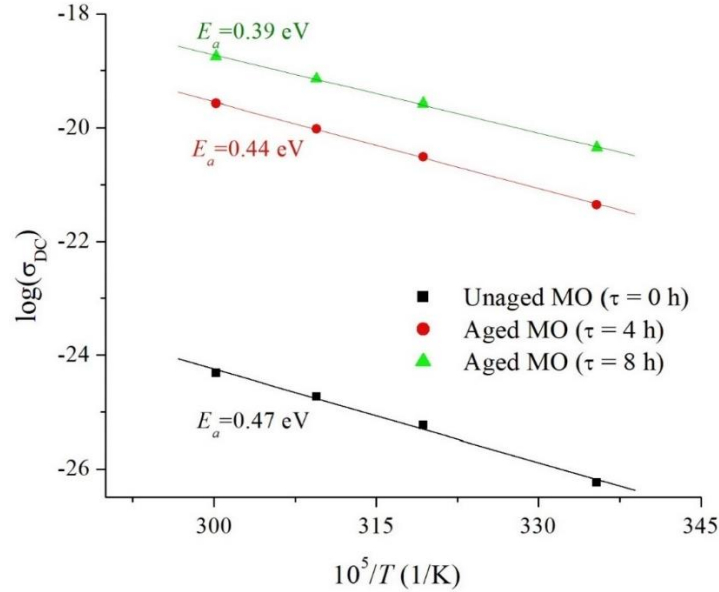


Fig. 6.21. Variația conductivității statice a UM neîmbătrânit și îmbătrânit (σ_{DC}) în funcție de temperatură, reprezentată în coordonate Arrhenius.

Tabel 6.3 Valorile medii ale energiei de activare pentru purtătorii liberi de sarcină în uleiul mineral neîmbătrânit și îmbătrânit la 4 respectiv 8 ore.

Ulei Mineral (UM)	UM neîmbătrânit	UM îmbătrânit 4 ore	UM îmbătrânit 8 ore
E_a (eV)	0.47	0.44	0.39

Valorile estimate ale energiei de activare sunt comparabile cu cele prezentate în alte studii anterioare [6.1, 6.9]. Valoarea afișată relevă faptul că, pe măsură ce uleiul îmbătrânește, energia de activare a ionilor de conducție scade, ceea ce indică procese de deteriorare foarte agresive. Astfel, putem spune că, pe măsură ce durata de îmbătrânire crește, procesele de deteriorare devin mai puternice și, ca urmare, valorile energiei de activare scad (aproximativ 20% diferență între uleiul neîmbătrânit și cel îmbătrânit timp de 8 ore), reflectând faptul că reacțiile chimice declanșează o etapă majoră de fracturare a moleculelor de ulei mineral. Se confirmă astfel faptul că, creșterea timpului de îmbătrânire generează o creștere a concentrației de ioni liberi, alături de apariția unor noi specii de purtători de sarcină mai agili și mai sensibili la a fi implicați în procesul de conducție.

6.4 Influența DP asupra rezistivității în curent continuu a uleiului de transformator

Impactul descărcărilor parțiale și al câmpului electric intens (îmbătrânire electrică accelerată) asupra rezistivității electrice a uleiului mineral este evaluat cu scopul de a efectua o analiză suplimentară dintr-o perspectiva complementară.

Astfel, un electrometru Keithley 6517B și o celulă pentru lichide dielectrice standard IRLAB CL-1 au fost utilizate pentru a determina (la temperatura ambiantă) curenții de absorbție și resorbție ai probelor de ulei. Măsurătorile au fost efectuate pe cinci tipuri de probe descrise în Tabelul 6.4. Fiecare dintre probe a fost obținut prin preconditionarea uleiului mineral Mol® (UM) într-un cuptor cu flux forțat la $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ timp de 72 h.

Tabel 6.4. Eșantioane de ulei mineral analizate.

Esantion	Compozitie
UM virgin	150ml ulei neimbatranit
UM 1ml	150ml ulei neimbatranit + 1 ml ulei imbatranit
UM 2ml	150ml ulei neimbatranit + 2 ml ulei imbatranit
UM 3ml	150ml ulei neimbatranit + 3 ml ulei imbatranit
UM 4ml	150ml ulei neimbatranit + 4 ml ulei imbatranit

Probele de ulei au fost obținute după cum urmează: 150 ml de ulei mineral condiționat au fost contaminați cu 1 ml, 2 ml, 3 ml și 4 ml de ulei îmbătrânit accelerat, în conformitate cu procesul descris în Capitolul 5, la 13 kV timp de 4 ore. Pentru a omogeniza amestecul, probele produse au fost introduse în recipiente de sticlă închise ermetic cu pernă de azot și apoi încălzite la $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ timp de 12 ore.

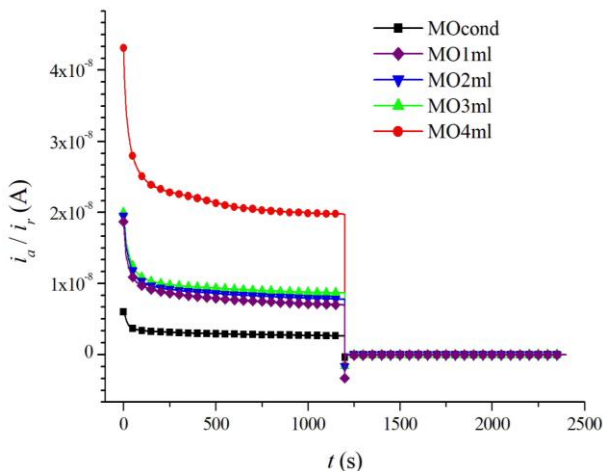


Fig. 6.22. Variația curenților de absorbție și de resorbție în funcție de durata măsurătorii ($U_0 = 200\text{ V}$ și $T = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$).

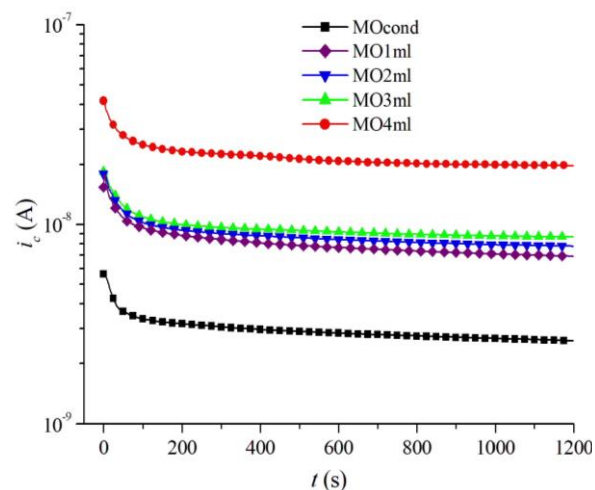


Fig. 6.23. Variația curenților de conducție în funcție de timpul de măsurare ($U_0 = 200\text{ V}$ și $T = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Figura 6.22 arată ce se întâmplă atunci când uleiul mineral condiționat este contaminat cu o cantitate foarte mică de ulei îmbătrânit accelerat; astfel, se observă o creștere semnificativă a curenților de absorbție și resorbție.

Rezultatele obținute arată că $i_a(t)$ și $i_r(t)$ cresc considerabil atunci când volumul de ulei îmbătrânit adăugat crește de la 1 ml (UM 1ml) la 4 ml (UM 4ml). Astfel, ca urmare a contaminării uleiului condiționat cu o cantitate mică de ulei îmbătrânit, crește proporția purtătorilor de sarcină

liberi (ioni) și a dipolilor electrici, ceea ce determină o creștere a componentelor curentului de absorbție, în special a curenților de conducție și de polarizare. În Fig. 6.23 se arată că, curentul de conducție calculat cu ajutorul $i_c(t) = i_a(t) - i_r(t)$, crește cu un ordin de mărime pentru proba UM 4ml, spre deosebire de uleiul condiționat. În baza rezultatelor prezentate în Fig. 6.23, rezistivitatea electrică a probelor de ulei examinate a fost calculată luând în considerare dimensiunile celulei de măsurare a lichidului dielectric.

Figura 6.24a prezintă rezultatele pentru $i_c(60)$ și $i_c(600)$ - adică măsurate după 60 s și 600 s de la momentul aplicării tensiunii, cu variația corespunzătoare a rezistivității electrice prezentată în Fig. 6.24b.

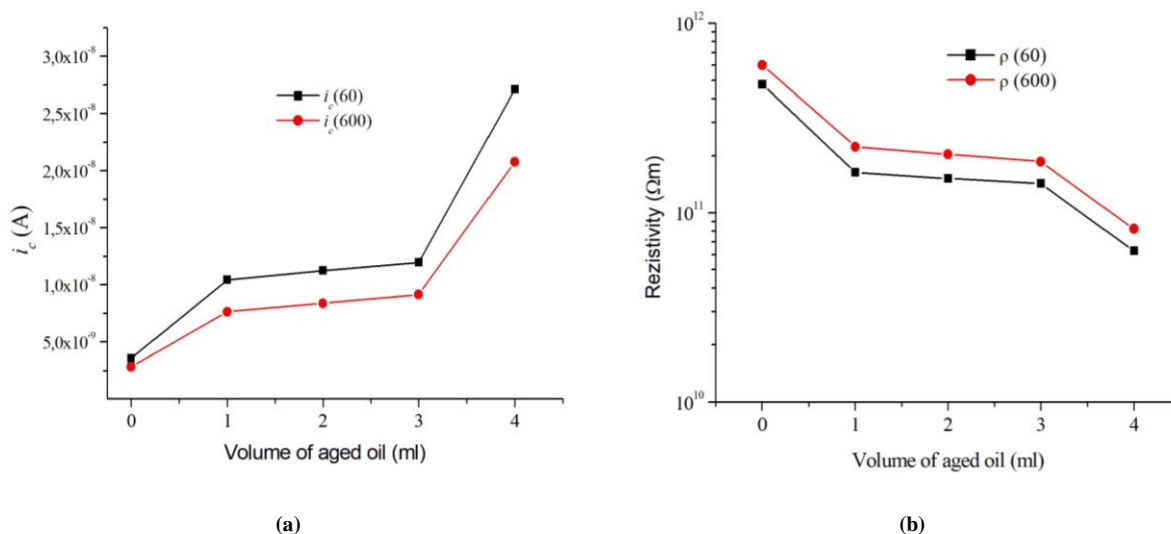


Fig. 6.24. **a)** Variația $i_c(60)$ și $i_c(600)$ în funcție de volumul de ulei îmbătrânit; **b)** Variația $\rho(60)$ și $\rho(600)$ în funcție de volumul de ulei îmbătrânit.

Constatările raportate anterior demonstrează în mod clar că graficele și valorile curenților de absorbție și resorbție sunt modificate atunci când uleiul mineral condiționat este contaminat cu cantități foarte mici de ulei îmbătrânit accelerat, supus unor câmpuri electrice de mare intensitate și DP. Cel mai probabil, acest lucru este cauzat de modificări ale curenților de polarizare și de conducție, cauzate de formarea radicalilor polari liberi și a purtătorilor de sarcină pe parcursul procesului de îmbătrânire. Această ipoteză se bazează pe observația că modificările curbelor de curent de absorbție apar atât pentru perioade scurte de timp ($t < 100$ s) de la aplicarea tensiunii, ceea ce identifică fenomenul de polarizare, cât și pe perioade mai lungi de timp ($t > 100$ s), ceea ce descrie procesul de conducție [6.8]. De asemenea, este interesant de observat că, atunci când 4 ml de ulei îmbătrânit se amestecă cu uleiul condiționat, rezistivitatea electrică scade cu aproape un ordin de mărime în raport cu uleiul condiționat. Având în vedere că volumul de ulei îmbătrânit accelerat reprezintă doar 2,67% din volumul total de ulei și că durata de îmbătrânire este de doar 4 ore, această scădere este foarte importantă indicându-ne o concentrație foarte mare de purtători de sarcină în uleiul îmbătrânit.

CONCLUZII GENERALE , CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI LUCRĂRII VIITOARE

Concluzii generale

Principala concluzia a cercetării care susțin scopul studiului confirmă impactul semnificativ al câmpului electric de mare intensitate și al descărcărilor parțiale asupra proprietăților dielectrice ale uleiului mineral de transformatorului. În lumina acestui fapt, degradarea uleiului mineral cauzată de câmpul electric de mare intensitate și a DP a fost investigată pe baza unei tehnici experimentale noi care utilizează o celulă de îmbătrânire originală folosind metodele de analiză a răspunsului dielectric în domeniul timp și frecvență.

Metoda propusa pentru îmbătrânirea accelerată a uleiului mineral de transformator este deosebit de importantă pentru evaluarea performanței sistemului de izolație al transformatorului, întrucât permite estimarea impactului câmpurilor electrice și al descărcărilor parțiale asupra stării uleiului. La proiectare celulei de îmbătrânire și a metodei experimentale au fost abordate mai multe aspecte, cel mai semnificativ dintre acestea fiind generarea bulelor de gaz în ulei indusă de acțiunea câmpului electric de mare intensitate. De asemenea, au fost luate în considerare inițierea și conservarea unei nivel adecvate de descărcări parțiale în bulele de gaz generate de câmpul electric.

În ceea ce privește tehnica de îmbătrânire propusă, se poate spune că aceasta a fost îmbunătățită și perfecționată în urma observării cu atenție a fazelor de îmbătrânire (formarea de bule de gaz, descărcări parțiale etc.), adaptând-o la fenomenele fizice specifice procesului.

În comparație cu ASTM D 6180 - 05, tehnica experimentală propusă în acest studiu ne permite luarea în considerare a fenomenul real din transformator, unde apar concentrații locale de câmp electric și DP în volumul de ulei (datorită micro defectelor și/sau contaminărilor). Astfel, obiectivul de bază al studiului, acela de a stabili o metodă experimentală pentru îmbătrânirea electrică prin generarea de bule de gaz în volumul de ulei și, ulterior, de descărcări parțiale , a fost realizat și implementat cu succes.

În ceea ce privește rezultatele obținute, se poate confirma că tehnica de îmbătrânire propusă este fiabilă și eficientă, oferind rezultate repetitive și consistente. Rezultatele raportate indică o valoare neobișnuit de mare a părților reale și imaginare ale permitivității relative complexe pentru domeniul de frecvență joasă a câmpului electric, demonstrând, printre altele, apariția efectului de polarizare la electrod. Cu toate acestea, valoarea obținută (ordinul de mărime 10^3) nu a fost observată în cazul îmbătrânirii termice, chiar și pentru un timp de îmbătrânire extrem de lung. Mai mult, s-a constatat că, conductivitatea electrică a uleiului mineral crește substanțial pentru probele de ulei îmbătrânit (crește odată cu durata de îmbătrânire). Acest fenomen se datorează faptului că, pe măsură ce uleiul îmbătrânește, se generează un număr mare de purtători de sarcină (inclusiv ioni pozitivi și negativi) care contribuie la fenomenul de conducție.

De asemenea, s-a demonstrat că rezistivitatea electrică a uleiului contaminat a scăzut cu aproape un ordin de mărime, deși cantitatea de ulei îmbătrânit amestecat cu uleiul condiționat a fost mai mică de 2,67% din volumul total de ulei.

Toți acești factori indică faptul că proprietățile uleiului mineral se deteriorează rapid în condiții de câmpuri electrice de mare intensitate și DP, cel mai probabil din cauza unei creșteri semnificative a concentrației purtătorilor de sarcină. Merită subliniat faptul că toate cercetările din domeniu recunosc faptul că, creșterea concentrației purtătorilor de sarcină și a radicalilor liberi polari este o consecință a impactului solicitării electrice. În plus, a fost investigată o a doua ipoteză probabilă privind generarea de diferiți purtători de sarcină cu mobilitate ridicată pentru a explica creșterea substanțială a valorii conductivității. Astfel, mobilitatea medie a ionilor de conducție a fost estimată pentru diferite perioade de îmbătrânire și temperaturi de măsurare prin utilizarea unei metode simplificate (utilizând valorile frecvenței punctelor de inflexiune din graficele modulelor complexe - $M'(f)$ și $M''(f)$). Rezultatele cercetării demonstrează fără îndoială că apariția speciilor de purtători de sarcină liberă cu mobilitate mai mare este rezultatul unor durate mai lungi de îmbătrânire. Existența unor astfel de ioni liberi arată că procesul de fragmentare a moleculelor de hidrocarburi prin acțiunea câmpului electric și a descărcărilor parțiale este un proces continuu care afectează toate speciile chimice din ulei. În plus, pe baza estimării energiei de activare, se poate concluziona că, creșterea conductivității electrice a uleiului poate fi atribuită, pe de o parte, unei creșteri a concentrației purtătorilor liberi de sarcină produsă sub efectul câmpului electric și al descărcărilor parțiale, împreună cu apariția unor noi specii de purtători de sarcină care sunt mai mobile și mai ușor de activat în procesul de conducție.

Contribuții originale

În ceea ce privesc contribuțiile originale, se poate preciza că:

- A fost efectuată o analiză detaliată a documentației disponibile cu privire la procesele generale de degradare determinate de interacțiunea câmpului electric de mare intensitate și a descărcărilor parțiale cu uleiul mineral de transformator.
- Un alt aspect de originalitate este reprezentat de proiectarea și construcția unei celule de îmbătrânire originale care generează descărcări parțiale continue și controlate în volumul de ulei (diferită de metoda ASTM D 6180-05), precum și de stabilirea unei metodologii specifice pentru realizarea îmbătrânirii electrice accelerate.
- A fost dezvoltat un model numeric pentru două tipuri de electrozi metalici (trei și șase discuri) cu scopul simulării în COMSOL Multiphysics a distribuției câmpului electric.

- S-a efectuat un studiu comparativ detaliat folosind spectroscopia dielectrică. Acesta a evaluat starea uleiului mineral îmbătrânit și a uleiului mineral virgin la diferite temperaturi și perioade de îmbătrânire prin măsurarea și calcularea principalilor factori de diagnostic (permitivitatea relativă complexă, factorul de pierderi dielectrice, conductivitatea complexă etc.). Pentru a obține o înțelegere cuprinzătoare a mecanismelor care influențează creșterea conductivității electrice, au fost identificați și evidențiați principalii factori responsabili de deteriorarea uleiului prin calcularea mobilității ionilor și a energiei lor de activare.
- Efectul îmbătrânirii electrice asupra caracteristicilor dielectrice ale uleiului a fost demonstrat prin eșantioane de probe contaminate cu diferite cantități de ulei îmbătrânit; astfel chiar și un procent mic de ulei îmbătrânit electric afectează considerabil proprietățile acestuia.
- Rezultatele cercetării au fost publicate în următoarele articole și lucrări de conferință de la diferite manifestări și evenimente științifice:
 - **Manea A.**, L.M. Dumitran, C., Borzea and E. Cazacu (2021) "ACCELERATED AGEING METHOD OF MINERAL OIL UNDER HIGH ELECTRIC FIELD AND PARTIAL DISCHARGES", 2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE) [Preprint]. doi:10.1109/atee52255.2021.9425323. WOS:000676164800155, ISBN:978-1-6654-1878-2, ISSN:1843-8571
 - **Manea A.**, Gorjanu T, Lazeanu A. and Dumitran L.M. (2022) "Effect of electrical accelerated aging on DC resistivity of mineral oil used in power transformers", Energies, 16(1), p. 294. doi:10.3390/en16010294. WOS:000908927300001, eISSN:1996-1073,
 - L. Marius Dumitran, **Manea A.** and T. Gorjanu, (2023) "Influence of electrical accelerated aging on the conductivity and activation energy of free ions in mineral oil", 2023 13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE) [Preprint]. doi:10.1109/atee58038.2023.10108223. INSPEC Accession Number: 23002782
 - Dumitran L.M., **Manea A.** and Gorjanu T, (2023) "Effect of accelerated aging under high electric field and partial discharges on electric conduction in mineral oil", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 30(4), pp. 1623–1631. doi:10.1109/tdei.2023.3292804. INSPEC Accession Number: 23641592.
 - **Andrei Manea**, Laurentius-Marius Dumitran, Teodora Gorjanu, Claudia Borzea, "ON SOME COMPARISON BETWEEN ACCELERATED AGING OF MINERAL OIL UNDER HIGH ELECTRIC FIELD AND HIGH TEMPERATURE", APME, vol. 17, no. 1, pp. 44–51, Feb. 2022, Accessed: Jan. 03, 2024. [Online]. Available: <https://journal.iem.pub.ro/apme/article/view/73> ISSN / ISSN-L: 1843-5912, CROSSREF <https://www.doi.org/10.36801/apme.2021.1.6>

Perspective

În baza investigațiilor finalizate în cadrul prezentei teze de doctorat, se propune următoarea perspectivă de cercetare

- Cercetările viitoare se vor concentra pe evaluarea influenței diferiților parametri în procesul de îmbătrânire a uleiului de transformator, cum ar fi temperatura, frecvența sau tensiunea aplicată.
- Efectuarea procesului de îmbătrânire pentru diferite tipuri de uleiuri, cum ar fi cel vegetal sau sintetic, cu scopul de a compara și analiza comportamentul acestora.

Bibliografie

- [1.1] A. Beroual, U. Khaled, P. Mbolo Noah and H. Sitorus, "Comparative Study of Breakdown Voltage of Mineral, Synthetic and Natural Oils and Based Mineral Oil Mixtures under AC and DC Voltages," *Energies*, Vol. 10, no. 4, p. 511, 2017.
- [1.2] G. J. Pukel, R. Eberhardt, H. M. Muhr, F. Baumann and W. Lick, "Large Power Transformers for Alternative Insulating," *Proceedings of the 16th International Symposium on High Voltage Engineering*, Innes House, Johannesburg, paper F-27, pp 1-4, 2009.
- [1.3] M. Wang, A.J. Vandermaar, K.D. Srivastava, "Review of condition assessment of power transformers in service," *IEEE Electr. Insul. M.*, Vol. 18 no. 6, pp. 12–25, 2002.
- [1.4] M. Darveniza, T.K. Saha, D.J. Hill, T.T. Le, "Investigation into effective methods for assessing the condition of insulation in aged power transformers," *IEEE Trans. Power. Delivery.*, Vol. 13, Issue 4, pp. 1214-1223, October 1998.
- [1.5] S.M. Gubanski, P. Boss, G. Csepes, V. Der Houhanessian, J.C. Filippini, P. Guinic, et al., "Dielectric response methods for diagnostics of power transformers," *IEEE Electr. Insul. M.*, Vol. 19, Issue 3, pp. 2-17, May-June 2003.
- [1.6] T.K. Saha, "Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers," *IEEE Trans. on Dielect. and Electr. Insul.*, Vol. 10, Issue 5, pp. 903–917, October 2003.
- [1.7] A. Bouaïcha, I. Fofana, M. Farzaneh, A. Setayeshmehr, H. Borsi, E. Gockenbach, et al., "Dielectric spectroscopy techniques as quality control tool: a feasibility study," *IEEE Trans. on Dielect. and Electr. Insul.*, Vol. 25, Issue 1, pp. 6-14, January-February 2009.
- [1.8] M.H. Meshkatoddini, "Aging study and lifetime estimation of transformer mineral oil," *Am. J. Eng. Applied. Sci.*, Vol. 4, no. 1, pp. 384-388, 2008
- [1.9] *Standard test method for stability of insulating oils of petroleum origin under electrical discharge*, ASTM D 6180 – 05, 10(3):6180, 2005.
- [2.1] Harlow, J., 2004. *Electric power transformer engineering*. Boca Raton, Fla.: CRC Press.
- [2.2] Bureau, E. et al. (2022) Various types of transformer core assemblies: Video tutorial, *Electronics For You*. Available at: <https://www.electronicsforu.com/videos-slideshows/videos/transformer-core-assemblies-types> (Accessed: 29 November 2023).
- [2.3] Bestoptek.com. 2022. Bestop Technologies. [online] Available at: <http://www.bestoptek.com/Support-Transformer-Basic.html> [Accessed 13 July 2022].
- [2.4] Paper (2018) Smit Draad / Draad Nijmegen B.V. Available at: <https://smitdraad.nl/paper-covered-wire/> (Accessed: 04 December 2023).
- [2.5] How online transformer monitoring can empower asset managers working from home et al. (no date) *Transformer insulation*, Insulect. Available at: <https://insulect.com/products/transformer-insulation> (Accessed: 04 December 2023).
- [2.6] L.M. Dumitran, "Sisteme de izolație electrică", Editura Printech, București, 2008.
- [2.7] P.V. Noțingher, *Sisteme de izolație*, Editura Printech, București, 2002.
- [2.8] [Megger.com. 2022. Electrical test equipment application solutions from Megger. [online] Available at: <https://megger.com/applications/transformers/transformer-insulation> [Accessed 20 July 2022].]
- [2.9] M. Koch and T. Prevost, „Analysis of Dielectric Response Measurements for Condition Assessment of Oil-Paper Transformer Insulation”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*”, Vol. 19, No. 6, 2012, pp. 1908 – 1915.
- [3.1] P.V. Noțingher, *Sisteme de izolație*, Editura Printech, București, 2002.

- [3.2] Tera Analysis Ltd.- QuickField software providers for electromagnetic, heat transfer and stress analysis. M. design applications: electrical machines (no date) Electric field stress in the transformer oil, QuickField.com. Available at: https://quickfield.com/advanced/transformer_electric_stress.htm (Accessed: 04 December 2023).
- [3.3] W. J. K. Raymond, H. A. Illias, A. H. A. Bakar, and H. Mokhlis, "Partial discharge classifications: Review of recent progress," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 68, no. February, pp. 164–181, 2015.
- [3.4] Overview and partial discharge analysis of Power Transformers: A ... Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9411852/> (Accessed: 07 December 2023).
- [3.5] B. Karthikeyan, S. Gopal, and S. Venkatesh, "ART 2-an unsupervised neural network for PD pattern recognition and classification," *Expert Syst. Appl.*, vol. 31, no. 2, pp. 345–350, 2006.
- [3.6] Sun, C.C. et al. (2020) 'Research on the temperature rise characteristics of power transformers based on fluid-solid-thermal coupling', *Journal of Physics: Conference Series*, 1601(2), p. 022017. doi:10.1088/1742-6596/1601/2/022017.
- [3.7] ***IEEE C57.95/1991 Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers
- [3.8] E. Jezierski, Z. Gogolevski, Z. Kopczynski, J. Szmit, *Transformatoare electrice – construcție și proiectare*, Editura tehnica, București, 1996.
- [3.9] I. Fofana, J. Sabau, D. Bussieres and E. B. Robertson, "The mechanism of gassing in power transformers," 2008 IEEE International Conference on Dielectric Liquids, 2008, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICDL.2008.4622489.
- [3.10] M.H. Meshkatoddini, "Aging study and lifetime estimation of transformer mineral oil", *Am. J. Eng. Applied. Sci.*, Vol. 4, no. 1, pp. 384-388, 2008.
- [3.11] J. Hill, Z. Wang, Q. Liu, C. Krause, and G. Wilson, "Analysing the power transformer temperature limitation for avoidance of bubble formation", *IET High Voltage J.*, Vol. 4, Issue. 3, pp. 210-214, 2019.
- [3.12] I. Fofana, A. Bouaicha, M. Farzaneh, and J. Sabau, „Ageing Behavior of Mineral and Ester Liquids: A Comparative Study”, 2008 Annual Report Conference on Electrical Insulation Dielectric Phenomena (CEIDP), , Quebec, 26-29 October 2008, pp. 87-90
- [4.1] L.V. Badicu, "Diagnosis and monitoring of insulation systems of power transformers," PhD dissertation, Dept. of Electr. Eng., University Politehnica of Bucharest, 2011.
- [4.2] **Manea, A. et al. (2022) 'Effect of electrical accelerated aging on DC resistivity of mineral oil used in power transformers', *Energies*, 16(1), p. 294. doi:10.3390/en16010294.**
- [4.3] Jonscher, A.K. (1996) *Universal relaxation law: A sequel to dielectric relaxation in solids*. London: Chelsea Dielectrics Press.
- [4.4] (No date) Cursul 8-9. Polarizarea electrică a Izolațiilor - pub.ro. Available at: <http://www.elmat.pub.ro/~dumitran/Sisteme%20de%20izolatie/Note%20de%20curs/Cursul%208-9.pdf> (Accessed: 19 December 2023).
- [4.5] 'Novocontrol Technologies, WinDETA 5.65-owner's manual,' nr.9,20007
- [4.6] Bakar, N., Abu-Siada, A. and Islam, S. (2014) "A review of dissolved gas analysis measurement and interpretation techniques," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 30(3), pp. 39–49. Available at: <https://doi.org/10.1109/mei.2014.6804740>.
- [5.1] M.H. Meshkatoddini, "Aging study and lifetime estimation of transformer mineral oil", *Am. J. Eng. Applied. Sci.*, Vol. 4, no. 1, pp. 384-388, 2008.
- [5.2] Standard test method for stability of insulating oils of petroleum origin under electrical discharge, ASTM D 6180 – 05, 10(3):6180, 2005.
- [5.3] Manea, A. et al. (2022) "Effect of electrical accelerated aging on DC resistivity of mineral oil used in power transformers," *Energies*, 16(1), p. 294. Available at: <https://doi.org/10.3390/en16010294>.

[5.4] **Marius Dumitran, L., Manea, A. and Gorjanu, T. (2023) “Influence of electrical accelerated aging on the conductivity and activation energy of free ions in mineral oil,” 2023 13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE) [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1109/atee58038.2023.10108223>.**

[6.1] Kremer, F. and Schönhal, A. (2012) Broadband dielectric spectroscopy. Berlin; Heidelberg: Springer.

[6.2] F Ciuprina, “Caracterizarea dielectricilor Solizi Prin Spectroscopie Dielectrica”. Available at: <http://www.elmat.pub.ro/~florin/student/Master-MDE/Spectroscopie%20dielectrica.pdf> (Accessed: 22 May 2023).

[6.3] **Marius Dumitran, L., Manea, A. and Gorjanu, T. (2023) ‘Influence of electrical accelerated aging on the conductivity and activation energy of free ions in mineral oil’, 2023 13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE) [Preprint]. doi:10.1109/atee58038.2023.10108223.**

[6.4] Dumitran, L.M. et al. (2014) “Method for lifetime estimation of power transformer mineral oil,” Fuel, 117, pp. 756–762. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.10.002>.

[6.5] A.K. Jonscher, “The Universal Dielectric Response,” Nature, 267, 1977, pp. 673-679.

[6.6] A.K. Jonscher, “The Universal Dielectric Response: A Review of Data and their New Interpretation”, Phys. Thin. Films, 11, 1980, pp. 205-317.

[6.7] J. Brunson, Hopping conductivity and charge transport in low-density polyethylene, Ph.D., Utah State University, Logan, Utah, 2010.

[6.8] L.V. Badicu, “Diagnosis and monitoring of insulation systems of power transformers,” PhD dissertation, Dept. of Electr. Eng., University Politehnica of Bucharest, 2011.

[6.9] Sidambarompoulé, X., Notingher, P., Paillat, T., Laurentie, J. and Leblanc, P., 2022. Study of electrical properties and estimation of average mobility and diffusion coefficients in several insulating liquids by dielectric spectroscopy. [online] Hal.archives-ouvertes.fr. Available at: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03224002>> [Accessed 11 June 2022].

[6.10] C.P. Ganea, “Electrode polarization and interface effects in liquid crystal systems with mobile ions: development of a model of bipolar diffusion,” Cent. Eu. J. of Physics, Vol. 4, no. 11, pp. 497-511, 2013.

[6.11] R. Tobazéon, Etude des phénomènes d’interface au contact d’un liquide isolant et d’un solide, Ph.D. dissertation, Université de Grenoble, 1973.

[6.12] M. Butcher, et al., “Conduction and breakdown mechanisms in transformer oil,” IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 34, no. 2, pp. 467–475, 2006.