

METODA SI ECHIPAMENT PENTRU DETERMINAREA DURATEI DE

VIATA RAMASA A SISTEMELOR DE IZOLATIE ALE

TRANSFORMATOARELOR DE PUTERE

– EDVTP –

PN-III-P2-2.1-PTE-2016-0053

Contractul nr.6PTE/06.10.2016

RAPORT ETAPA de execuție II-2017

**ELABORAREA METODEI SI A SOFTULUI DE CALCUL AL DURATEI
DE VIATA CONSUMATA SI RAMASA A ULEIULUI
CONCEPEREA, REALIZAREA SI EXPERIMENTAREA MODELULUI
EXPERIMENTAL PENTRU DETERMINAREA CONSTANTELOR a si Ea
ALE SISTEMELOR DE IZOLATIE
ELABORAREA METODEI DE CALCUL A DURATEI DE VIATA A SITP -
SINTEZA DOCUMENTARA PENTRU ANALIZA METODELOR DE
CALCUL A DURATEI DE VIATA A SITP**

REZUMAT RAPORT ETAPA II

Scopul proiectului: elaborarea unei metode si a unui echipament pentru estimarea cat mai precisa a rezervelor de durata de viata ale transformatoarelor.

Obiectivul general: realizarea unui echipament pentru determinarea cu precizie a duratei de viata ramasa a sistemelor de izolatie ale transformatoarelor de putere.

Obiective specifice: 1. Conceperea, realizarea si experimentarea modelului experimental pentru masurarea curentilor de absorbtie/resorbtie cu celula on-line in laborator; 2. Elaborarea metodei si a softului de calcul al duratei de viata consumata si ramasa a uleiului; 3. Conceperea, realizarea si experimentarea modelului experimental pentru determinarea constantelor a si Ea ale sistemelor de izolatie; 4. Elaborarea metodei si a softului de calcul al duratelor de viata consumata si ramasa ale SITP; 5. Realizarea si testarea componentelor soft ale EDVTP; 6. Realizarea si incercarea prototipurilor configuratiilor EDVTP.

Etapa de executie II, derulată în anul 2017 a cuprins următoarele activități și subactivități pentru a atinge obiectivele specifice 2, 3 și parțial 4.

Activitatea A2.1: Elaborarea metodei și a softului de calcul al duratei de viata consumată și rămasă a uleiului, cu:

Cap.1. *Subactivitatea A2.1-1: Sinteza documentara pentru analiza metodelor de calcul a duratei de viata a uleiului electroizolant- executant SIMTECH*

Cap.2. *Subactivitatea A2.1-2: Elaborarea metodei de calcul a duratei de viata a uleiului electroizolant - executant- UPB*

Activitatea A2.2: Elaborarea aplicației software de calcul a duratei de viata a uleiului electroizolant cu:

Cap.3. *Subactivitatea A2.2-1: Realizarea aplicației software pentru calculul duratei de viata a uleiului electroizolant -executant SIMTECH*

Cap.4. *Subactivitatea A2.2-2: Testarea si validarea aplicației software pentru calculul duratei de viata a uleiului electroizolant –executant UPB*

Cap.5. Activitatea A2.3: Diseminare rezultate – UPB

Activitatea A2.4: Proiectarea și realizarea modelului pentru determinarea constantelor a și Ea ale sistemelor de izolație cu:

Cap.6. *Subactivitatea A2.4-1: Proiectarea modelelor modelului pentru determinarea constantelor a și Ea ale sistemelor de izolație –executanți SIMTECH + UPB*

Cap.7. *Subactivitatea A2.4-2: Realizarea modelului experimental pentru determinarea constantelor a și Ea ale sistemelor de izolație- executantSIMTECH*

Activitatea A2.5:Experimentarea modelului experimental pentru determinarea constantelor a și Ea ale sistemelor de izolație

Cap.8. *Subactivitatea A2.5-1: Realizarea testelor pentru validarea modelului experimental –executant SIMTECH*

Cap.9. *Subactivitatea A2.5-2: Validarea experimentală a modelului executant- UPB*

Cap.10. Activitatea A2.6- Diseminarea rezultatelor UPB

Activitatea A2.7:Elaborarea metodei de calcul a duratei de viata a SITP

Cap.11 *Subactivitatea A2.7-1: Sinteza documentara pentru analiza metodelor de calcul a duratei de viata a SITP –executant SIMTECH*

Cap.12. Concluzii finale.

RAPORT ETAPA II

Activitatea A2.1: Elaborarea metodei și a softului de calcul al duratei de viața consumată și rămasă a uleiului

Cap.1 Subactivitatea A2.1-1: Sinteza documentară pentru analiza metodelor de calcul a duratei de viața a uleiului electroizolant

În carul acestei subactivități s-a urmărit întocmirea unei sinteze documentare care să ofere posibilitatea de cunoaște cele mai recente rezultate ale cercetărilor în domeniul calculului duratei de viață a sistemelor de izolație ale transformatoarelor și de a scoate în evidență elementele de noutate ale cercetărilor propuse prin actualul proiect.

Pe parcursul a peste 50 de pagini, consultand peste 75 dintre cele mai recente publicații pe tematica îmbătrânirii sistemelor de și a evaluării duratei de viață a materialelor și sistemelor izolante s-au sintetizat informații despre:

- cele mai recente modele de cinatici de îmbătrânire,
- particularitățile îmbătrânii complexului izolant hârtie –ulei de transformator;
- modelele clasice (modelul Montsinger și modelul Dakin) de calcul al duratei de viață a materialelor din sistemele de izolații la solicitări termice constante și variabile în timp;
- metodele curente de determinare a parametrilor dreptelor duratelor de viață ale materialelor izolante și , evident,
- metode utilizate pentru calculul duratei de viață a uleiului de transformator.

Într-un subcapitol aparte s-au sintetizat informațiile din literatură de specialitate despre măsurarea rezistivității uleiului de transformator și a rezultatelor proprii de cercetare referitoare la determinarea rezistivității uleiului cu metoda curenților de absorbție-resorbție, prezentate amply în Raportul etapei I a actualului proiect.

Extrase din sinteza documentară, relevante pentru cercetările din această etapă a proiectului sunt prezentate în Anexa 1.

Principalele concluzii ale studiului documentar sunt:

1. Transformatoarele electrice de putere sunt echipamente extrem de importante pentru sistemele electroenergetice. Din acest motiv, evaluarea duretei de viață, a duratei de viață consumată și rezervei de durată de viață a transformatoarelor electrice este de mare actualitate.

2. Definiția acceptată de utilizatorii de transformatoare că durata de viață reprezintă intervalul de timp de la intrarea în exploatare în care transformatorul poate îndeplini funcțiunile sale electroenergetice, în anumite condiții de exploatare, până la scoaterea definitivă din funcțiune în urma unei defectări majore suscită numeroase comentarii.

3. Defectările sau pierderile de capacitate de a îndeplini funcțiunile sale electroenergetice au ca și consecință faptul ca durata de viață a transformatorului este dependentă de durata de viață a diferitelor sale componente și îndeosebi a sistemului de izolație.

4. Sistemele de izolație ale transformatoarelor electrice sunt ansambluri complexe de material electroizolante, dependente de puterea transformatorului și de tensiunile sale nominale.

5. Eliminând cauzele de întreținere defectuoasă, se acceptă faptul că durata de viață a transformatorului este în strânsă și directă legătură cu durata de viață a sistemului de izolație.

6. Durata de viață a sistemului de izolație, indiferent de definiția acceptată, este o funcție complexă de duratele de viață ale diferitelor sale componente.

7. Durata de viață a unei componente a sistemului de izolație (electrică) se definește ca intervalul de timp în care, sub acțiunea solicitărilor, valoarea uneia dintre proprietățile sale cu importanță funcțională scade sub o valoare limită care face improprie funcționarea componentei. Proprietatea aleasă se numește factor de diagnostic relevant, iar valoarea limită a proprietății avute în vedere se numește criteriu de sfârșit de viață.

8. Nu există o teorie completă și nici un model satisfăcător de calcul a duratei de viață a sistemelor de izolație a transformatorului supuse solicitărilor reale din exploatare.

9. Datorită dificultății de supunere a transformatoarelor reale aflate în funcționare la observații sistematice care să permită stabilirea unor teorii și modele de calcul a duratelor de viață a acestora se acceptă modele aproximative stabilite pe considerente mai mult sau mai puțin fundamentate științific și măsurări pe modele fizice supuse unor îmbătrâniri termice accelerate prin solicitări termice superioare celor din exploatare.

10. În funcție de componenta sistemului de izolație, a unei părți sau a întregului sistem de izolație se pot alege factori relevanți de diagnostic și criterii adecvate de sfârșit de viață precum și modele fizice care să fie supuse îmbătrânirilor accelerate.

11. Referitor la hârtia și uleiul de transformator, dar și la modele fizice reunind aceste două componente ale sistemului de izolație a transformatorului există metode standardizate sau larg acceptate de producătorii și utilizatorii de transformatoare pentru a determina drepte (curbe) ale duratelor de viață la pe bază de încercări de îmbătrânire termică accelerată, bazate pe factori de diagnostic care necesită încercări în laborator, incompatibile cu măsurări in situ.

12. Factor de diagnostic rezistență de izolație și rezistivitate sunt alternative care au fost mai puțin abordate în literatură de specialitate și a căror viabilitate trebuie demonstrată.

13. Rezistența de izolație a sistemelor de izolație se măsoară relativ ușor în situ, ceea ce face ca utilizarea factorului de diagnostic rezistență de izolație poate fi utilizat fără dificultăți majore la transformatoare aflate în exploatare.

14. Rezistivitatea uleiului poate fi determinată prin măsurători in situ cu ajutorul celulei și metodei puse la punct în cadrul cercetărilor de la etapa precedentă a proiectului.

15. Modelele Montsinger și Dakin pentru calculul duratei de viață pentru modele fizice supuse la solicitări termice constante în timp și-au probat viabilitatea și sunt larg acceptate, existând metode standardizate pentru aplicarea lor. Ca urmare pot fi extinse și la factorii de diagnostic rezistență de izolație și rezistivitate.

Având în vedere cele de mai sus, *apreciem că obiectivul subactivității A2.1-1 a fost atins.*

Cap.2 Subactivitatea A2.1-2: Elaborarea metodei de calcul a duratei de viață a uleiului electroizolant - executant- UPB

În cadrul acestei subactivități s-a urmărit elaborarea unei metode de calcul a duratei de viață a uleiului de transformator care să se aplice pe transformatoare reale sau pe modele fizice, atât în cazul în care se cunoaște variația în timp a temperaturii uleiului, cât și în cazul în care această temperatură nu e cunoscută.

Metoda elaborată se bazează pe calculul duratei de viață relative a uleiului, consumată într-un interval dat de timp (uzura uleiului în acel interval de timp), cu ajutorul factorului de diagnosticare rezistivitate a uleiului. Rezistivitatea uleiului se măsoară prin metoda curenților de absorbție-resorbție cu ajutorul celulei concepută în cadrul cercetărilor din Etapa I a acestui proiect, și poate fi verificată prin orice altă metodă. Celula permite măsurători în laborator, dar poate fi atașată oricărui transformator în exploatare, permițând astfel determinări on-line.

Relația de bază pentru aplicarea metodei elaborate este:

$$U(\Delta t, t_0) = D_{rel,c}(\Delta t, t_0) = \frac{\rho(t_0) - \rho(\Delta t + t_0)}{\rho(t_0) - \rho_{eol}},$$

în care s-au notat cu : $D_{rel,c}(\Delta t, t_0)$ durata de viață relativă consumată în intervalul de timp Δt , $U(\Delta t, t_0)$ uzura uleiului în același interval de timp, $\rho(t_0)$ valoarea rezistivității uleiului înainte de punerea în exploatare la momentul t_0 , $\rho(\Delta t + t_0)$ valoarea rezistivității uleiului după intervalul de timp Δt , ρ_{eol} - valoarea rezistivității corespunzătoare criteriului de sfârșit de viață, Δt intervalul de timp avut în vedere.

Duratele de viață consumată $D_c(\Delta t)$ și ramase $D_r(\Delta t)$ după intervalul de timp Δt se calculează cu ajutorul relațiilor:

$$D_c(\Delta t) = D_{rel,c}(\Delta t) \cdot D$$

$$D_r(\Delta t) = D - D_c(\Delta t)$$

S-a notat cu D durata de viață a uleiului în condițiile experimentărilor. Calculul acestei mărimi se face în primă aproximație cu relațiile din modelul Montsinger sau Dakin cu parametrii determinați prin metoda îmbătrânirii la trei temperaturi sau, mai precis, cu metoda energiilor de activare.

În metoda elaborată s-a stabilit procedură de determinare a energiei de activare printr-o procedură iterativă.

În **Anexa 2** este prezentată detaliat metoda elaborată și utilizarea ei pentru determinarea duratei de viață și a celorlalte mărimi legate de aceasta.

Principalele concluzii stabilite în urma realizării subactivității A2.1- sunt:

1. Uleiul de transformator poate fi îmbătrânit accelerat în laborator pentru a obține date care să se poată utiliza la analiza și monitorizarea uleiurilor din transformatoare reale sau din modele fizice.

2. Modelele Montsinger și Dakin pot fi aplicate fără dificultăți la calculul duratei de viață prin îmbătrânire accelerată în laborator, la trei temperaturi impuse de norme, utilizând ca factor de diagnosticare rezistivitatea electrică deoarece acest parametru se măsoară ușor cu ajutorul metodei curenților de absorbție și resorbție.

3. Parametrii a_M , A_M și b_M modelului Montsinger pentru solicitări termice constante pe toată durata de viață se determină prin identificarea duratei de viață din modelul Montsinger cu dreapta duratei de viață $D(\theta)$ determinată din datele experimentale.

4. Parametrii a_D , A_D și b_D modelului Dakin pentru solicitări termice constante pe toată durata de viață se determină prin identificarea duratei de viață din modelul Dakin cu dreapta duratei de viață $D(1/T)$ determinată din datele experimentale.

5. S-a demonstrat dependența critică a valorii calculate a duratei de viață a uleiului de valoarea energiei de activare E_a utilizată în modelul Dakin sau modelul Montsinger.

6. Parametrul esențial pentru evaluarea îmbătrânirii uleiului, energia de activare E_a se determină din parametrii dreptei duratei de viață la solicitări termice constante în modelul Dakin sau cu metoda termocalorimetriei diferențiale.

7. Calculul parametrilor dreptei duratei de viață în cazul temperaturilor variabile în timp cunoscute pot impune metode numerice de rezolvare a sistemelor de ecuații din care acestia se deduc.

8. În cadrul cecetărilor efectuate în acest capitol s-a stabilit o relație originală de clacul duratei de viață relative consumată într-un anumit interval de timp pe baza măsurării rezistivității uleiului la punerea în funcțiune și la începutul și sfârșitul intervalului de timp avut în vedere.

9. Calculul uzurii relative a uleiului pe un anumit interval de timp cu ajutorul rezistivității permite evaluarea duratei de viață relativă consumată în acel interval de timp, fără a cunoaște modul în care a evoluat temperatura uleiului în intervalul de timp avut în vedere.

10. Durata de viață a uleiului poate fi calculată în primă aproximație cu parametrii Dakin determinați prin încercări de îmbătrânire accelerată în laborator, la trei temperaturi cunoscute.

11. S-a demonstrat că este suficientă cunoașterea parametrilor dreptei de viață corespunzător unui anumit model, parametrii în celălalt model fiind relativ ușor calculabil.

12. S-a stabilit o procedură pentru aplicarea metodei de calcul al duratei de viață a uleiului electroizolant prin încercări de îmbătrânire accelerată.

Având în vedere cele de mai sus, **apreciem că obiectivul subactivității A2.1-2 a fost atins.**

Activitatea A2.2: Elaborarea aplicației software de calcul a duratei de viață a uleiului electroizolant cu:

Cap.3 Subactivitatea A2.2-1: Realizarea aplicației software pentru calculul duratei de viață a uleiului electroizolant

Obiectivul specific activității 1-a constituit elaborarea unei aplicații software corespunzătoare metodei prezentate în cap.2 al acestui raport. Aplicația trebuie să se aplice atât la transformatoarele electrice de putere și modele fizice, care au sisteme de izolație ulei-hartie, cât și altor încercări ale uleiurilor de transformator, inclusiv cele de îmbătrânire termică accelerată.

Aplicația software elaborată pentru calculul duratelor de viață a uleiului electroizolant are în vedere trei cazuri importante:

- calcularea duratelor de viață a uleiului la temperatura constantă;
- calcularea duratelor de viață a uleiului la temperatura variabilă;
- calcularea duratelor de viață a uleiului atunci când nu se cunoaște temperatura, dar se cunosc rezistivitățile de material.

Aplicația software s-a realizat în programul Visual Studio, folosind limbajul de programare C++. Ecranul cu rezultate pentru un anumit caz arată astfel:

Metoda DAKIN			Metoda MONTSINGER	
Dreapta duratei de viață	Temperatura variabila	Durata de viață cunoscând rezistivitatea	Temperatura constantă	Temperatura variabila
a = 4.80561E-07 s	a = 4.80561E-07 s	$\rho(t_0)$ 111 G Ω m	a = 9.907E11 s	a = 9.907E11 s
b = 12251.35 K	b = 12251.35 K	$\rho(t_1)$ 98.2 G Ω m	b = 0.0572 °C ⁻¹	b = 0.0572 °C ⁻¹
T = 70 °C		ρ_{eol} 20 G Ω m	T = 155 °C	
Durata de viață termică (ani): 48.7963841566353	Durata de viață estimată (ani): 36.0243599979756	Durata de viață relativ consumată (ani): 0.140659340659341	Durata de viață estimată (ani): 4.43282594959741	Durata de viață estimată (ani): 4.36935414856493
	Durata de viață consumată (ani): 10.8363083556521	Durata de viață consumată (ani): 6.86366722203222	Durata de viață consumată în 24h (ani): 0.00273972602739726	Durata de viață consumată (ani): 0.0634718010324772
Temperatura constantă	Durata de viață ramasă (ani): 25.1880758009832	Durata de viață ramasă (ani): 41.9327169346031	Durata de viață ramasă (ani): 4.43008622357001	Durata de viață ramasă (ani): 4.36935414856493
a = 4.80561E-07 s	a = 1.10865E-6	Temperatura constantă pe intervale		
b = 12251.35 K	b = 12250.95	a = 1.676165E-6		
T = 70 °C	Ea = 101.826	b = 12100.5141097787		
Durata de viață estimată (ani): 48.7963841566353		Ea = 100.694		
Durata de viață consumată în 24h (ani): 0.00273972602739726				
Durata de viață ramasă (ani): 48.7936444306079				

Concluziile principale referitoare la aplicația software realizată sunt:

- Aplicația software prezentată se bazează pe metoda de evaluare a duratei de viață utilizând ca factor de diagnostic rezistivitatea uleiului, prezentată în cap.2 al prezentului raport.
- Aplicația se compune dintr-o serie de module care permit calculele legate de durata de viață a uleiului de transformator corespunzătoare atât metodei Montsinger cât și metodei Dakin, pentru cazuri de solicitări la temperaturi constante pe toată durata de viață, cât și pentru cazurile temperaturilor variabile, corespunzătoare atât curbelor de temperatură cunoscute, cât mai ales, cazului general al curbelor de temperatură necunoscute.
- Datele privind curbele de temperatură cât și cele corespunzătoare factorului de diagnosticare rezistență de izolație a uleiului pot fi obținute din fișiere rezultate în urma monitorizărilor în situ cât și din încercări în laborator a modelelor fizice ale sistemelor de izolație hârtie ulei, sau încercărilor de îmbătrânire accelerată a uleiului de transformator.
- Aplicația permite și introducerea de la consolă a unor date, în cazurile în care se fac monitorizări și diagnosticări off-line.
- Valorile parametrilor dreptelor de durată de viață a și b și a energiilor de activare ale uleiului pot fi corectate/ajustate cu valorile obținute în momentul realizării testelor periodice ale uleiului electroizolant în laboratoare de specialitate, rezultând noi valori ale duratelor de viață ramasă și consumată.
- Aplicația permite determinarea parametrilor dreptei de sarcină corespunzătoare modelului Montsinger dacă se cunosc parametrii modulului Dakin și invers.
- Aplicația se poate integra cu ușurință în aplicațiile monitorizare și de diagnosticare utilizate pentru determinarea stărilor transformatoarelor electrice de putere aflate în exploatare.

8. Datorită factorului original de diagnostic alfat la baza aplicației, aceasta poate fi supusă protejării prin drepturi de autor.

În **Anexa 3** este prezentată detaliat aplicația software descrisă mai sus.

Ținând cont și de validările din cap.4 se apreciază că obiectivul subactivității a fost realizat.

Cap.4 Subactivitatea A2.2-2: Testarea și validarea aplicației software pentru calculul duratei de viață a uleiului electroizolant

Obiectivul specific activității l-a constituit verificarea rezultatelor obținute cu aplicația software elaborată în cap.3.

În vederea testării și verificării funcționării softului propus s-au efectuat câteva calcule numerice ale parametrilor dreptei duratei de viață a unui ulei MOL și ale duratelor de viață consumate și rămase și ale parametrilor a și b ale dreptei duratei de viață ale unui ulei îmbătrânit în exploatare.

În urma efectuării calculelor și analizei rezultatelor se pot formula următoarele concluzii:

1. În vederea testării softului prezentat în cap.3 s-au utilizat date referitoare la un ulei marca MOL îmbătrânit în exploatare.

2. S-au efectuat manual calcule ale parametrilor dreptei duratei de viață, ale duratelor de viață consumate și rămase, ale parametrilor dreptei de viață corecțate. Valorile numerice obținute cu ajutorul SOFT-ului realizat în cadrul Proiectului sunt, practic, identice cu cele obținute manual.

3. Ca urmare, SOPFT-ul poate fi utilizat pe echipamentul ce se va realiza în etapa următoare în cadrul Proiectului pentru caracterizarea stării uleiului din transformatoarele aflate în exploatare.

În **Anexa 4** este prezentată detaliat calcule și considerente efectuate pentru a valida aplicația software elaborată.

Ținând cont și de validările din cap.4 se apreciază că obiectivul subactivității A2.2-2 a fost realizat.

Cap.5 Activitatea A2.3: Diseminare rezultate

O parte din cercetările efectuate în cadrul proiectului **PN-III-P2-2.1-PTE-2016-0053** referitoare la modul de evaluare a dreptei duratei de viață a uleiului mineral, utilizând ca factor de diagnostic rezistivitatea electrică, calculată pe baza măsurării curenților de absorbție/resorbție și determinarea pe baza acestui factor de diagnosticare a energiei de activare E_a și parametrilor dreptei duratei de viață a uleiului prin metoda celor trei temperaturi și metoda calorimetriei diferențiale DSC au fost sintetizate în lucrarea științifică intitulată *“Determination of the Remaining Lifetime of Power Transformers Liquid Insulations Based on the Absorption/Resorption Currents”*, autori: Petru V. Notingher, Laurentiu Marius Dumitran, Stefan Busoi, Gabriel Tanasescu și Laurentiu Viorel Badicu.

Lucrarea a fost prezentată în cadrul *“The 10th International Symposium On ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING ATEE – 2017, MARCH 23 – 25, 2017*, Bucharest, Romania, conferința indexată în IEEE Xplore, Thomson Reuters Conference Proceedings Citation Index (CPCI) și ISI. Lucrarea în extenso a fost publicată în Proceedings-ul ATEE 2017, poate fi accesată cu IEEE Xplore și este atașată acestui Raport în **Anexa 5**.

Se apreciază că obiectivul subactivității a fost realizat.

Activitatea A2.4: Proiectarea și realizarea modelului pentru determinarea constantelor a și E_a ale sistemelor de izolație

Cap.6 Subactivitatea A2.4-1: Proiectarea modelului pentru determinarea constantelor a și E_a ale sistemelor de izolație

Obiectivul specific activității l-a constituit proiectarea unui model fizic pentru experimentare sistemelor de izolație în vederea determinării parametrilor dreptei duratei de viață prin încercări de îmbătrânire termică accelerată utilizând factorul de diagnostic rezistență de izolație.

Prin model *model fizic*, cu referire la sistemul de izolație, în acest raport se desemnează orice configurate, aranjament, sau asociere de materiale care intră în structura transformatorului sau sistemului de izolație a acestui și permite reproducerea calitativă sau cantitativă a fenomenelor fizice și chimice din transformatorul real. Este cazul motoretelor, transformatoarelor și altor modele funcționale de acest fel.

În vederea determinării parametrilor a și b ai dreptei duratei de viață și a energiei de activare E_a pentru sistemele de izolație hartie-ulei s-au proiectat două modele fizice, experimentale de laborator:

- modelul experimental cu infasurari plane și miez magnetic denumit *modelul* (M_1) sau motoretă;
- modelul experimental cu infasurari cilindrice și miez magnetic denumit *modelul* (M_2), respectiv transformoretă, ce reproduce la scara redusă un transformator de putere.

Elementele cheie ale modelului fizic experimental sunt:

- să reproducă complexul hartie-ulei în contact cu conductoarele înfășurărilor și tolele miezului magnetic;
- să permită măsurarea rezistenței de izolație și curenții de absorbție resorbție;
- să permită îmbătrânirea termică accelerată la temperaturi controlate ;
- să asigure posibilitatea extragerii și analizei uleiului de transformator;
- să conțină eșantioane de hârtie care să permită determinarea gradului de depolimerizare al hârtiei, ca alternativă la factorul de diagnosticare rezistență de izolație;
- să permită examinări vizuale.

Modelul experimental cu infasurari plane (M_1) se referă la transformatoarele de puteri foarte mari și tensiuni înalte, cazuri în care diametrele bobinelor au valori foarte mari și, la limita, ar putea fi considerate plane. Deoarece nu forma bobinelor influențează foarte mult comportarea izolației și eforturile mecanice la care sunt supuse straturile de hartie ca urmare a îndoirii conductoarelor, important este ca modelul realizat să conțină, în aceeași cuvă, în afara tolelor, conductoarele reale izolate cu hartie și uleiul folosit în construcția transformatorului modelat.

Modelul experimental M_2 cu infasurările cilindrice (minitransformatorul) reproduce, la scara redusă, structura unui transformator de putere. Acesta se realizează dintr-un miez feromagnetic și două infasurări cilindrice concentrice. Prima infasurare, dispusă direct pe miez, corespunde infasurării de joasă tensiune, iar cea de-a doua (exterioară) corespunde infasurării de înaltă tensiune. Miezul și bobinele sunt introduse într-o cuvă din tablă de inox, care se umple apoi cu ulei de transformator.

Datele tehnice de proiectare ale minitransformatorului sunt:

- transformator monofazat;
- tip constructiv: în manta;
- putere nominală: $S_N = 50$ VA;
- $U_{1N} / U_{2N} = 14$ V / 10,5 V;
- $f = 50$ Hz;
- miez magnetic din tole Fe-Si (fig. 6.6);

Din calculele de proiectare aferente datelor tehnice ale minitransformatorului au rezultat 30 de spire pe infasurarea primară, realizate din conductor rotund din cupru izolat cu hartie, 26 de spire pe infasurarea secundară realizate din conductor profilat din aluminiu izolat de hartie.

Volumul cuvei în ambele cazuri trebuie dimensionat astfel încât să includă atât modelul, cât și volumul de ulei necesar pentru probe, în așa fel încât la terminarea probelor să rămână suficient ulei în cuvă pentru ca transformatorul să fie acoperit în întregime de ulei.

În **Anexa 6** se prezintă elementele principale ale proiectării modelelor fizice experimentale implicate în proiect.





Datorită faptului că modelele au fost realizate efectiv se consideră că obiectivul subactivității A2.4-1 au fost atinse.

Cap.7 Subactivitatea A2.4-2: Realizarea modelului experimental pentru determinarea constantelor a și E_a ale sistemelor de izolație

Obiectivul specific activității l-a constituit realizare modelului fizic pentru experimentarea sistemelor de izolație în vederea determinării parametrilor dreptei duratei de viață prin încercări de îmbătrânire termică accelerată utilizând factorul de diagnosticare rezistență de izolație.

S-au realizat două variante de modele experimentale care permit reproducerea îmbătrânirii termice accelerată a unui sistem de izolație hartie –ulei specifice transformatoarelor de putere.

Modelul experimental cu infasurari plane, denumit modelul experimental M1 (sau motorete) conține un miez magnetic din tole Fe-Si; infasurari din conductor profilat din aluminiu, cu izolație din hartie amplasat într-o cuva din inox, umplută cu ulei, etanșezată cu mastic și introdusă în etuva, în vederea îmbătrânirii termice accelerate la temperaturile stabilite.

	
<p>a) modelul fizic experimental M1 decuvat</p>	<p>a) modelul fizic experimental M2 decuvat</p>
	
<p>b) cuva modelului experimental M1</p>	<p>b) cuva modelului experimental M2</p>
<p>Modelul fizic experimental M1 (motoretă)</p>	<p>Model fizic experimental M2 (transformoretă)</p>

Modelul experimental cu înfășurări cilindrice, denumit modelul experimental M2 (sau transformorete) este în fapt un transformator monofazat, tip constructiv în manta, putere nominală: $S_N = 50 \text{ VA}$, - $U_{1N} / U_{2N} = 14 \text{ V} / 10,5 \text{ V}$; - $f = 50 \text{ Hz}$; miez magnetic: tole Fe-Si cu grosimea de 0,5 mm, infasurari

din conductor din aluminiu cu izolație din hartie, introdus într-o cuvă umplută cu ulei etanșată cu mastic și introdusă într-o etuvă, în vederea îmbătrânirii termice accelerate la temperaturile prestabilite anterior.

În **Anexa 7** se prezintă modelele fizice experimentale realizate conform proiectului prezentat în cap.6..

Datorită faptului că modelele au fost realizate efectiv se consideră că obiectivul subactivității A2.4-2 au fost atinse.

Activitatea A2.5. Experimentarea modelului experimental pentru determinarea constantelor a și E_a ale sistemelor de izolație

Cap.8. Subactivitatea A2.5-1: Realizarea testelor pentru validarea modelului experimental

Obiectivul specific activității l-a constituit testare constructivă și funcțională a fiecărui exemplar al modelor fizice experimentale realizate conform proiectelor prezentate în cap.6.

Modelele experimentale pentru determinarea constantelor a și E_a ale sistemelor de izolație, realizate în cele două variante (M_1) cu înfășurări plane, respectiv (M_2) cu înfășurări cilindrice au fost testate constructiv și funcțional pentru a verifica executia modelelor în conformitate cu datele de proiectare și pentru a asigura desfășurarea în bune condiții a testelor de îmbătrânire.

Programul de testare constructiv funcțională a celor două variante ale modelelor experimentale pentru determinarea constantelor a și E_a cuprinde următoarele teste:

a) *verificarea dimensiunilor geometrice ale modelelor* – acest test este necesar pentru a verifica realizarea esantioanelor conform datelor de proiectare;

b) *verificarea continuității înfășurărilor, înainte și după experimentari* – acest test este necesar pentru verificarea integrității structurale a materialului conductor;

c) *masurarea rezistenței ohmice, înainte și după experimentari* - acest test este necesar pentru determinarea rezistenței de contact a înfășurărilor la borne și a absența unor scurtcircuite între spire;

d) *masurarea rezistențelor de izolație, între înfășurări și fata de masa, în ulei și în aer, înainte și după experimentari*– scopul acestei testări este de a determina dacă izolația are caracteristici suficiente de bune așa încât să se asigure funcționarea în bune condiții a modelului din care face parte;

e) *masurarea curenților de absorbție/resorbție, înainte și după experimentari* – acest test este necesar pentru a se observa gama de măsură a curenților de absorbție/resorbție.

Se vor accepta la experimentările de îmbătrânire accelerată numai esantioanele care trec întregul întregul program de testare constructiv funcțională.

Vor fi acceptate esantioane ale căror dimensiuni geometrice se abat cu cel mult 2% de la dimensiunile de proiectare.

Verificarea dimensională s-a efectuat cu ajutorul unui subler electronic cu afisaj digital.

Continuitatea înfășurărilor s-a verificat cu ajutorul unui multimetru atât înaintea experimentărilor de îmbătrânire cât și după terminarea acestora.

Măsurarea rezistențelor ohmice ale înfășurărilor s-a efectuat conform:

- CEI 60076 - Transformatoare de putere;
- PE 116/94 – Normativ de încercări și măsurători la echipamente și instalații electrice;
- 3.1. RE-I 53-91 - Instrucțiuni tehnologice de verificare profilactică a transformatoarelor de putere.

Pentru măsurători s-a folosit un echipament tip 2292 – HAEFELY TEST AG – seria 173957/2011, cu gama de măsură : $1 \mu\Omega \dots 20 \text{ k}\Omega \pm 0.05 \%$ din valoarea măsurată, iar tensiunea aplicată : 50 V.

Valorile rezistențelor ohmice ale primarului (P) și ale secundarului (S) modelului M_1 , la temperatura de 20°C , sunt: $R_P = 93.82 \text{ m}\Omega$, $R_S = 26.93 \text{ m}\Omega$.

Valorile de fabrică ale rezistențelor ohmice ale primarului (P) și ale secundarului (S) modelului M_2 , la temperatura de 20°C , sunt : $R_P = 0.0073 \text{ m}\Omega$, $R_S = 0.00728 \text{ m}\Omega$.

Măsurarea rezistențelor de izolație se efectuează conform:

- CEI 60076 - Transformatoare de putere;

- b) PE 116/94 – Normativ de incercari si masuratori la echipamente si instalatii electrice ;
- c) 3.1. RE-I 53-91 - Instructiuni tehnologice de verificare profilactica a transformatoarelor de putere.

Pentru transformatoarele de mica putere avand înfășurările cu $U_n \leq 500$ V, la care nu există buletine ale fabricii, valoarea minimă a rezistenței de izolație la 20° C va fi de cel puțin 2 MΩ.

Pentru masurarea rezistențelor de izolație s-a folosit un megaohmetru tip 5478B – HAEFELY TEST AG – seria 15113768/2007, cu gama de masura : 0.01 MΩ...5 TΩ ± 5 % din valoarea masurata ± 3 digiti, iar tensiunea aplicata : 250 V... 5000 V ± 3 % din valoarea masurata ± 3 V.

Rezultatele măsurătorilor efectuate au arătat că izolația tuturor exemplarelor este în stare bună, atât înainte de supunere la testele de îmbătrânire cât și după.

Achiziția curentilor de absorbtie/resorbție se face conform procedurii descrise în subactivitatea A1.2-1 din Etapa I.

Înainte de realizarea experimentelor curentii de absorbtie pentru modelul cilindric sunt în gama de $2 \cdot 10^{-11} \div 5 \cdot 10^{-11}$ A. După efectuarea experimentelor curentii de absorbtie pentru esantioanele de hartie sunt în gama de $16 \cdot 10^{-9} \div 0.3 \cdot 10^{-10}$ A.

În **Anexa 8** se prezintă detaliat rezultatele testelor constructive și funcționale ale exemplarelor modelelor fizice experimentale realizate conform proiectului prezentat în cap.6.

În urma testelor constructive și funcționale se formulează concluziile de mai jos.

1. Pentru fiecare exemplar al modelelor fizice experimentale realizate abaterile dimensionale sunt mai mici de 2 % față de cele din proiect.
2. Toate exemplarele modelele experimentale realizate au trecut cu succes testul continuității înfășurărilor.
3. Valorile rezistențelor ohmice ale înfășurărilor tuturor modelelor fizice realizate se încadrează în eroarea de 2 %.
4. Valorile rezistențelor de izolație ale tuturor exemplarelor modelelor fizice realizate sunt superioare valorilor minime impuse.
5. Valorile curentilor de absorbtie – resorbție inițiali sunt în gama normală a unui sistem de izolație nou.

În urma experimentelor, fără excepție se constată creșterea valorilor curentilor de absorbtie-resorbție, ceea ce arată înrautățirea proprietăților sistemelor de izolație.

Având în vedere cele prezentate se consideră că obiectivul subactivității A2.5-1 au fost atinse.

Cap.9. Subactivitatea A2.5-2: Validarea experimentală a modelului executant

Obiectivul specific activității 1-a constituit supunerea la îmbătrânirea termică a fiecărui exemplar al modelor fizice experimentale realizate și analiza rezultatelor obținute.

Pentru determinarea parametrilor dreptei duratei de viață atasate izolației hartie-ulei a transformatoarelor s-au proiectat și s-au realizat două modele experimentale de laborator, respectiv modelul înfășurărilor plane (motorete) denumit modelul experimental (M_1)-(realizat în 9 exemplare) și modelul înfășurărilor cilindrice (transformatoarete) denumit modelul experimental (M_2) (realizat în 3 exemplare). Aceste modele au fost supuse unor solicitări termice accelerate la 155, 135 și 115 °C pe durate cuprinse între 500 h și 5.000h. După anumite intervale de timp s-au măsurat valorile rezistențelor de izolație, pe baza cărora s-a determinat valorile parametrilor a și b (respectiv energia de activare asociată îmbătrânirii izolației hartie - ulei E_a) ai dreptei duratei de viață, dreapta care poate fi utilizată în estimarea valorilor duratelor de viață consumate și rămase ale izolației aflate în exploatare.

De asemenea, pentru a estima stările de îmbătrânire ale componentelor sistemului de izolație al unui transformator s-au introdus în celulele pentru motorete și transformatoarete anumite cantități de ulei PRISTA și hartie Weidmann și s-au determinat valorile rezistivității electrice ale acestora după anumite durate de îmbătrânire

În vederea validării modelelor de determinare a constantelor a și E_a s-au calculat valorile acestor mărimi pe baza măsurării rezistenței de izolație R_{iz} aferente înfășurărilor ambelor modele, modelelor plane (motorete) și cilindrice (transformatoare).

Valorile temperaturilor (115, 135 și 155 °C) și duratelor de îmbătrânire corespunzătoare fiecărei temperaturi au fost alese în conformitate cu prescripțiile IEC 60216-1, Electrical Insulation Materials – Properties of Thermal Endurance – Part 1: Ageing Procedures and Evaluation of Test Results, Fifth Edition, 2001-07.

La intervale stabilite în funcție de valoarea temperaturii de îmbătrânire, s-a redus temperatura etuvei la 27 °C, s-au scos motoretele și transformatoarele din etuva și s-au măsurat curenții de absorbție i_a și resorbție i_r la tensiunea $U_0 = 100$ V și s-au calculat valorile rezistenței de izolație R_{iz} .

În Anexa 9 sunt prezentate detaliat rezultatele obținute.

Rezultate pentru izolație hartie-ulei pentru modelul cu bobine plane (motorete)

Pentru grupuri de 3 motorete s-au măsurat curenții de absorbție și resorbție la $U_0 = 100$ V, pentru durate cuprinse între 60 și 3600 s. Apoi s-a determinat media aritmetică a curenților și s-a calculat rezistența de izolație R_{iz} .

Se constată că valorile rezistențelor de izolație ale motoretelor calculate la 60 s (R_{60}) și, respectiv, la 600 s (R_{600}), după 200 h de îmbătrânire la 155 °C scad. De exemplu, după 1120 h de îmbătrânire, R_{60} scade de peste 20 ori față de valoarea maximă, iar R_{600} scade de cca. 170 ori față de valoarea maximă.

În vederea stabilirii valorii de sfârșit de viață a rezistenței de izolație se face apel la variația gradului de polimerizare a hârtiei supuse îmbătrânirii la aceeași temperatură.

Astfel, considerând criteriul de sfârșit de viață pentru hartie valoarea gradului de polimerizare $GP_{eol} = 200$, în cadrul îmbătrânirii hârtiei de transformator la 155 °C această valoare apare după o durată de îmbătrânire $\tau_{eol} = 418$ h. Pentru această durată de îmbătrânire, rezistența de izolație a motoretelor scade la valoarea $R_{iz} = 0,8$ T Ω .

Ca urmare, pentru factorul de diagnostic "rezistența de izolație" a izolației hartie-ulei se alege criteriul de sfârșit de viață $R_{iz,eol} = 0,8$ T Ω .

În cazul îmbătrânirii accelerate la 135 °C valoarea $R_{iz,eol} = 0,8$ T Ω se obține pentru $\tau_2 = 1105$ h.

Disponând de două puncte (135°C-1105h și 155°C-418h) s-a determinat dreapta duratei de viață

$$\ln D = -13,74 + 8452/T$$

și parametrii $a = -13,74$ și $E_A = 71,25$ kJ/mol pentru izolația hartie-ulei în modelul motoretelor..

Rezultate pentru izolație hartie-ulei pentru modelul cu bobine cilindrice (transformatoare)

Procedând similar pentru transformatoare se găsește dreapta duratei de viață :

$$\ln D = -35,3 + 17700/T,$$

și parametrii parametrii: $a = -35,3$ și $E_A = 147,12$ kJ/mol.

Se constată că valorile parametrilor a și E_A obținuți pentru izolația hartie-ulei a transformatoarelor diferă de valorile aceleiași izolații obținută prin îmbătrânirea motoretelor. Aceasta s-ar putea datora raporturilor diferite între masele de hartie și de ulei, a maselor de cupru, ulei și fier, a conținutului de oxigen din incintele în care au fost îmbătrânite motoretele și transformatoarele etc, dar este posibil ca diferența să fie datorată duratei prea mari după care s-au măsurat rezistențele de izolație sau chiar și alegerii valorii criteriului de sfârșit de viață.

Rezultate pentru rezistivitatea uleiului de transformator îmbătrânit

Testele de îmbătrânire au fost utilizate și pentru a determina rezistivitatea uleiului de transformator cu ajutorul curenților de absorbție/resorbție.

Se constată că valoarea inițială a rezistivității uleiului (neîmbătrânit) este $\rho_0(60) = 9,99$ T Ω m la 60 s de la aplicarea tensiunii U_0 și $\rho_0(600) = 15,3$ T Ω m la 600s de la aplicarea tensiunii U_0 . Pentru o durată de îmbătrânire $\tau = 416$ h la 155°C se obțin, pentru rezistivitate, valorile: $\rho_{60}(416) = 0,07$ T Ω m și $\rho_{600}(416) = 0,077$ T Ω m, cu mult inferioare valorilor inițiale, ceea ce arată o degradare semnificativă a uleiului.

Reducerea importanței a valorilor rezistivității uleiului se datorează degradării acestuia sub acțiunea căldurii și apariției unor noi specii de purtători de sarcină. Acest proces este facilitat și de reducerea conținutului de antioxidant din ulei. Drept urmare s-a redus și energia de activare E_A a reacției de degradare

(oxidare). Masuratorile efectuate prin DSC arata ca valoarea lui E_A a scazut de la 93,4 kJ/mol (pentru uleiul neimbatranit) la 64,7 kJ/mol (pentru uleiul imbatranit timp de 742 h la 155 °C).

Rezultate pentru rezistivitatea hârtiei îmbătrânite

Concluzii calitativ asemenea celor de la ulei se obtin și pentru rezistivitatea hârtiei. Cresterea duratei de imbatranire determina o reducere a valorilor rezistivitatii hârtiei.

În **Anexa 9** se prezintă detaliat rezultatele testelor constructive și funcționale ale exemplarelor modelelor fizice experimentale realizate conform proiectului prezentat în cap.6.

Principalele concluzii care se impun după efectuarea testelor sunt:

1. Validarea celor doua modele experimentale propuse pentru determinarea parametrilor dreptelor duratelor de viata, respectiv a constantelor a si E_a ale sistemelor de izolatia a necesitat efectuarea unor teste de imbatranire termica accelerata la trei temperaturi, respectiv 115, 135 si 155 °C.

2. Valorile parametrilor a si E_A obtinuti pentru izolatia hartie-ulei a motoretelor si transformatoarelor pot fi determinate cu mai multa precizie daca numarul acestora este mai mare, respectiv cate 10 pentru fiecare temperatura de imbatranire. Aceasta incercare necesita insa un volum de munca si costuri relativ ridicate.

3. Valorile parametrilor a si E_A obtinute prin incercari accelerate la 155 °C si 135 °C se pot modifica cu 1...2 procente daca, pentru calculul acestora, se iau in considerare si curbele de imbatranire accelerata a izolatiei hartie-ulei la temperatura de 115 °C.

4. Atat la 155 °C, cat si la 135 °C si 115 °C, ar trebui masurate rezistentele dupa o durata mai mica, pentru a avea valorile initiale ale rezistentelor mai corecte.

5. Pentru a verifica modul de imbatranire a componentelor izolatiei, respectiv a hârtiei si uleiului, s-au determinat si variatiile rezistivitătii acestora cu durata de imbatranire accelerata la $T_1 = 155$ °C. Acestea scad cu durata de imbatranire, in concordanta cu variatiile izolatiei hartie-ulei ale modelelor utilizate pentru determinarea parametrilor a si E_A ai sistemelor de izolatia ale transformatoarelor de putere.

6. Valorile gradului de polimerizare determinate pentru esantioane de hartie prelevate, atat din celulele pentru motorete, cat si din transformatorete pentru diferite valori ale duratei de imbatranire permit alegerea unui anumit criteriu de sfarsit de viata a izolatiei hartie-ulei. Se constata ca valorile gradului de polimerizare a hârtiei imbatranite in celulele pentru motorete si transformatorete sunt similare.

7. Valorile parametrilor a si E_A obtinute pentru izolatia hartie-ulei a transformatoarelor difera de valorile aceleasi izolatii obtinuta prin imbatranirea motoretelor. Aceasta s-ar putea datora raporturilor diferite intre masele de hartie si de ulei, a maselor de cupru, ulei si fier, a continutului de oxigen din incintele in care au fost imbatranite motoretele si transformatoretele etc.

8. Valorile marimilor a si E_A obtinute prin incercari accelerate in laborator permit estimarea duratelor de viata consumate si ramase corespunzatoare unor intervale de functionare date ale transformatoarelor de putere.

9. Parametrii a si E_A semodifica in timpul functionarii transformatoarelor, ca urmare a modificarilor structurilor fizico-chimice ale hârtiei si, mai ales, ale uleiului. In vederea unei estimari corecte a duratelor de viata ramase aceti parametri trebuie recalculati in functie de variatiile reale ale valorilor rezistivitatii uleiului si ale rezistentei izolatiei hartie-ulei.

Având în vedere cele prezentate se consideră că obiectivul subactivității A2.5-2 au fost atinse.

Cap.10. Activitatea A2.6- Diseminarea rezultatelor

Unele rezultate privind experimentarile pentru determinarea dreptelor duratelor de viata corespunzatoare functionarii la temperatura constanta si a duratelor de viata consumate si ramase in cazul functionarii la temperatura variabila a unui sistem de izolatia hartie-ulei de transformator, determinate prin metoda standard M_T si metoda energiei de activare M_{EA} și comparatea acestora cu estimarea duratei de viata consumate a componentelor izolatiei unui transformator pe baza monitorizarii rezistivitatii, fara a lua in considerare modul de variatie a temperaturii izolatiei în exploatare, efectuate în cadrul etapei a II a proiectului au fost incluse în lucrarea stiintifica intitulata “*Concerning the power transformers insulation*

systems monitoring”, autori: Petru V. Notingher, Cristina Stancu, Laurentiu-Viorel Badicu, Bogdan Gorgan, Stefan Busoi si Gabriel Tanasescu.

Lucrarea (20 pagini) a fost prezentata in cadrul lucrarilor celui de-al 19-lea *International Symposium “MATERIALS, METHODS & TECHNOLOGIES (MMT), organizat de Bulgarian Academy of Science si Union of Scientists in Bulgaria, Elenite Holiday Village*, in perioada 25 iunie-01 iulie 2017 și a fost publicata in *“Materials, Methods & Technologies Journal”, Vol. 11, p.101-120, 2017, ISSN 1314-7269*, indexata de Google Scholar, Russian Science Citation Index, China National Knowledge Infrastructure (CNKI), Scholar Polish Scholarly Bibliography.

Lucrarea în extenso este anexată raportului în **Anexa 10**.

Activitatea A2.7:Elaborarea metodei de calcul a duratei de viata a SITP

Cap.11. Subactivitatea A2.7-1: Sinteza documentara pentru analiza metodelor de calcul a duratei de viata a SITP

În carul acestei subactivități s-a urmărit întocmirea unei sinteze documentare care să prezinte principalele metode de calcul sau evaluare a duratei de viață a sistemelor de izolație a le transformatoarelor de putere, așa cum se reflectă în literatura de specialitate pe această temă.

Problema calcului duratei de viață a echipamentelor electroenergetice este de marea actualitate, în contextul în care în sistemele electroenergetice se cer din ce în ce mai insistent soluții pentru monitorizarea și diagnosticarea acestor echipamente.

Definirea duratei de viață a unui echipament electroenergetic și în special a mașinilor și transformatoarelor electrice estea ea însăși o provocare.

De exemplu, pentru cazul transformatorului electrice se acceptă definiția că durata de viață reprezintă intervalul de timp de la intrarea în exploatare în care transformatorul poate îndeplini funcțiunile sale electroenergetice, în anumite condiții de exploatare, până la scoaterea definitivă din funcțiune în urma unei defectări majore.

Din punct de vedere practic intervine necesitatea de a decide tipul de defectare care poate interveni, costul acceptabil al reparației de restabilire a capacității funcționale precum și de a anticipa momentul apariției defectării majore. De exemplu, defectarea unui comutator de prize nu conduce neapărat la scoaterea definitivă din funcțiune a transformatorului. Tot astfel, degradarea uleiului poate fi solutionată prin regenerarea lui sau pur și simplu prin înlocuirea lui. În schimb, străpungerea izolației compromite ireversibil transformatorul.

Durata de viață a transformatorului este dependentă de durata de viață a diferitelor sale componente și îndeosebi a sistemului de izolație. Conform standardelor IEEE C57.91 și IEC 60.076, în cele mai multe situații, se acceptă că durata de viață a transformatorului coincide cu durata de viață a sistemului de izolație. Evident, rămâne întrebarea ce tip de defectare a sistemului de izolație trebuie luată în considerare când se evaluează durata de viață a acestui sistem.

Sistemul de izolație fiind alcătuit dintr-un ansamblu de materiale electroizolante, durata sa de viață este o funcție complexă de duratele de viață ale diferitelor sale componente.

Se reamintește că *durata de viață* a unei componente a sistemului de izolație (electrică) se definește ca intervalul de timp în care, sub acțiunea solicitărilor, valoarea uneia dintre proprietățile sale cu importanță funcțională scade sub o valoare limită care face improprie funcționarea componentei. Proprietatea aleasă se numește *factor de diagnostic relevant* iar valoarea limită a proprietății avute în vedere se numește *criteriu de sfârșit de viață*.

De exemplu, pentru hârtia de transformator, se pot adopta ca factori de diagnostic gradul de depolimerizare, rezistența la rupere prin tracțiune, rigiditatea dielectrică, rezistivitatea, factorul de pierderi etc. În cazul uleiului mineral se poate utiliza conținutul de apă, conținutul de acizi, factorul de pierderi, rezistivitatea electrică, etc.

Cel mai adesea, durata de viață a unei componente a sistemului de izolație se determină pe cale experimentală în urma supunerii acelei componente la diferite tipuri de solicitări: termice, electrice,

mecanice, radiative etc.

Alegerea criteriului de sfârșit de viață se face în conformitate cu standardele aflate în vigoare, în funcție de natura materialului, tipul și intensitatea solicitării și, mai ales, experiența de exploatare .

Deoarece toate procesele de degradare conduc la reducerea duratelor de viață ale componentelor sistemelor de izolații, au fost dezvoltate mai multe metode (modele) de estimare a acestora, bazate pe încercări electrice, termice și mecanice accelerate.

Îmbătrânirea accelerată poate fi realizată sub acțiunea unui singur factor de degradare (îmbătrânire unifactor), sau a mai multor factori de degradare (îmbătrânire multifactor).

Datorită faptului că măsurătorile pe transformatoare în funcțiune ar dura ani întregi, în cadrul proiectului, extrapolând recomandările standardelor IEC pentru studiile de îmbătrâniri accelerate ale diferitelor componente ale sistemelor de izolație și calcularea duratelor de viață pe factorii de diagnostic „clasici” (gradul de depolimerizare, rezistența la rupere prin tracțiune, rigiditatea dielectrică, factorul de pierderi, descărcări parțiale, conținut de apă, conținutul de acizi) se propun metode de determinare a duratei viață cu factorii de diagnosticare rezistență de izolație și rezistivitate măsurați pe modele supuse unor îmbătrâniri termice accelerate.

Pe parcursul a 48 de pagini, consultând 45 dintre cele mai recente publicații pe tematica calculului și evaluării duratei de viață a sistemelor de izolație ale transformatoarelor de putere s-au sintetizat informații despre:

- Metode practicate pentru monitorizare și diagnosticare a izolației transformatoarelor electrice de putere.
 - Analiza critică a metodelor existente de calcul a duratei de viață a SITP, evidențiind limitele fiecărei metode și posibilitățile aplicării la măsurătorile in situ.
- In prezent, evaluarea duratei de viață a SITP se efectuează pe baza mai multor metode și anume :
- determinarea directă a gradului de polimerizare al hârtiei;
 - măsurarea conținutului de furani din uleiul electroizolant;
 - metoda cromatografiei cu gel penetrant (gel permeation chromatography);
 - măsurarea rezistenței de rupere la tracțiune a hârtiei;
 - metoda analizei gazelor dizolvate în ulei (dissolved gas analysis);
 - metoda modelului termic al transformatoarelor de putere;
 - metode bazate pe determinarea conținutului de apă din SITP, printre care:
 - metoda Karl Fisher pentru măsurarea conținutului de apă din ulei;
 - metoda bazată pe măsurarea tangentei unghiului de pierderi dielectrice și a permitivității uleiului;
 - metoda bazată pe măsurarea tangentei unghiului de pierderi dielectrice a izolației înfășurătorilor; a tangentei unghiului de pierderi dielectrice și a permitivității uleiului
 - metoda bazată pe măsurarea tensiunii de revenire a izolației înfășurătorilor;
 - metoda bazată pe măsurarea gradului de saturație cu apă a uleiului
 - metoda curenților de absorbție – resorbție – metoda CABS

O atenție deosebită s-a acordat metodei de stabilire a uzurii componentelor sistemului de izolație utilizând energia de activare E_a și constanta a de material care intervine în expresia dreaptă a duratei de viață a componentelor sistemului (ulei, hârtie) determinată cu ajutorul valorilor rezistivității materialului măsurată în curent continuu și a posibilității de extensie a metodei la sisteme de izolație, înlocuind rezistivitatea cu rezistența de izolație.

Definind durata de viață relativă a unui sistem de izolație consumată de la un moment de referință t_0 la un anumit moment t_1 ulterior cu relația :

$$D_{rel,c}^{iz}(t_1, t_0) = \frac{R_{iz}(t_0) - R_{iz}(t_1 + t_0)}{R_{iz}(t_0) - R_{iz,eol}}$$

cu: $D_{rel,c}^{iz}(t_1, t_0)$ durată de viață relativă consumată între t_0 și t_1 , $R_{iz}(t_0)$ rezistența de izolație a sistemului la momentul t_0 , $R_{iz}(t_1 + t_0)$ rezistența de izolație la momentul t_1 , iar $R_{iz, eol}$ valoarea limita acceptată pentru rezistența de izolație.

Apare astfel posibilitatea determinării duratei de viață relativă consumată a sistemului de izolație prin măsurarea rezistenței de izolație a sistemului la momentul inițial și la momentul t_1 , fără a fi necesară cunoașterea variației temperaturii sistemului până la acel moment.

Principalele concluzii ale sintezei documentare sunt:

1. Îmbătrânirea transformatoarelor de putere a devenit o problemă majoră din mai multe motive, printr care:

- presiunile de cunoaștere a disponibilității transformatoarelor exercitate de o piață energetică liberalizată.
- reducerea investițiilor în echipamente noi și trecerea de la mentenanță bazată pe timp la mentenanță bazată pe stare, aceasta din urmă necesitând noi metode de diagnosticare a stării transformatoarelor.

2. În exploatare, transformatoarele sunt supuse la solicitări combinate (electrice, termice, mecanice și de mediu), izolația principală (ulei-hârtie) fiind cea mai afectată. Regimul de funcționare în sarcină face ca cea mai de durată solicitare să fie cea termică, adică încălzirea. Solicitarea termică a sistemului de izolație este datorată pierderilor Joule sau în fier, pierderilor dielectrice, încălzirilor locale în urma unor defecte de izolație, deficiențelor sistemului de răcire, dar și a funcționării îndelungate în suprasarcină.

3. Solicitarea termică afectează în special sistemul de izolație, iar prin persistența sa determină îmbătrânirea acestuia, ce justifică identificarea altor metode de evaluare a acestei îmbătrâniri.

4. Pe lângă aceste solicitări (electrice, termice, mecanice), întotdeauna apar și alte solicitări specifice mediului ambiant în care funcționează echipamentul: umiditatea, oxigenul atmosferic, radiațiile ultraviolete și nucleare, poluarea industrială, microorganismele, etc..

5. Durata de viață a unui transformator este dată durata de viața sistemului de izolație a transformatorului.

6. Determinarea rezervei de durată de viață a unui sistem de izolație pentru transformatoare pe baza factorului de diagnosticare rezistență de izolație reprezintă o direcție de cercetare care trebuie să fie investigată în continuare.

Extrase din sinteza documentară, relevante pentru cercetările din această etapă a proiectului sunt prezentate în *Anexa 11*.

Având în vedere cele prezentate se apreciază că obiectivul subactivității A2.7-1 a fost îndeplinit.

12. Concluzii finale

În concluzie generală, se apreciază că obiectivele etapei au fost realizate. Această concluzie se bazează pe cele expuse în continuare.

1. In Etapa nr.2 a Proiectului s-au executat activitățile și subactivitățile pentru îndeplinirea integrală a obiectivelor specifice nr.2. *Elaborarea metodei si a softului de calcul al duratei de viață consumată și rămasă a uleiului și nr.3. Conceperea, realizarea si experimentarea modelului experimental pentru determinarea constantelor a si Ea ale sistemelor de izolație precum și subactivitatea A7.4-1 necesară îndeplinirii obiectivului specific nr. 4. Elaborarea metodei si a softului de calcul al duratelor de viața consumată si rămasă ale sistemelor de izolație ale transformatoarelor de putere.*

Astfel:

- s-a întocmit sinteza documentara pentru analiza metodelor de calcul a duratei de viata a uleiului electroizolant;
- s-a elaborat o metoda originală de calcul a duratei de viata a uleiului electroizolant;
- s-a realizat și testat aplicația software pentru calculul duratei de viața a uleiului electroizolant și pe baza metodei proprii elaborate;
- s-au proiectat și executat două variante ale unui model experimental pentru studiul îmbătrânirii termice și pentru determinarea constantelor a și Ea care intervin în expresia dreptei uratei de viață a uleiului și hârtiei de transformator precum și a sistemelor de izolație realizate cu aceste materiale;
- s-au realizat testele pentru validarea constructivă și funcțională a celor două variante ale modelului experimental pentru studiul îmbătrânirii termice a complexului hârtie –ulei și pentru determinarea constantelor a și Ea;
- s-au executat testele de îmbătrânire a modelelor experimentale și sa-u interpretat datele măsurate;
- s-a întocmit sinteza documentara pentru analiza metodelor de calcul a duratei de viata a sistemelor de izolație a transformatoarelor de putere;
- s-au elaborat cele două lucrări planificate și s-a participat la două manifestări științifice internaționale pentru a asigura diseminarea rezultatelor.

Rezultatele activităților desfășurate s-au concretizat în

1. *Produse*: 2 variante de model fizic experimentale de studiere a imbatranirii termice a izolației hârtie-ulei, unul pentru înfășurări plane (motorete) în 9 exemplare și altul pentru înfășurări cilindrice (transformorete) în 3 experimentale.
2. *Produse informatice*: o aplicație software cu trei module pentru determinare a dreptelor duratelor de viata, a duratelor de viata estimate, consumate si ramase ale uleiurilor din transformatoare, în cacul în care temperatura de îmbătrânire a uleiului este mentinută constată până la degradarea finală a uleiului, pentru temperatură variabilă în timp după o curbă cunoscută, respective pentru variație necunoscută în timp a temperaturii.
3. *Studii*: Două relații originale, una pentru determinare a duratei de viata consumate a uleiului de transformator aflat în exploatare pe baza măsurării rezistivității electrice și alta pentru determinare a duratei de viata consumate a izolației hârtie -ulei de transformator de transformator aflat în exploatare pe baza măsurării rezistenței de izolație.
4. *Alte rezultate*:
 - 4.1. Metoda de determinare a duratelor de viata consumate relative si ale duratelor de viata ramase ale uleiurilor din transformatoare;
 - 4.2. Metoda de determinare a noilor parametri ai dreptelor duratelor de viata ale uleiului dupa intrarea transformatoarelor in functiune pe baza duratei de viata relative consumate in anumite intervale de timp (prin masurarea rezistivitatii electrice);
 - 4.3. Metoda de determinare a parametrilor dreptei duratei de viata in modelul Dakin cand se cunosc parametrii corespunzatori modelului Montsinger si invers.