

DETERMINAREA DURATEI DE VIATA RAMASA A COMPONENTEI SOLIDE A IZOLATIEI UNUI TRANSFORMATOR DE PUTERE PE BAZA CURENTILOR DE ABSORBTIE/RESORBTIE

Petru V. NOTINGHER¹, Laurențiu Marius DUMITRAN¹, Gabriel TANASESCU²,
Stefan BUSOI², Viorel BADICU³, Radu SETNESCU⁴

¹Universitatea Politehnica din Bucuresti, Facultatea de Inginerie Electrică

²SIMTECH INTERNATIONAL SRL, Bucuresti

³OMICRON Energy Solutions GmbH, Berlin, Germania

⁴Universitatea Valahia din Targoviste, Romania

petrunot@elmat.pub.ro

In aceasta lucrare se prezinta o metoda de estimare a duratei de viata consumate D_c si ramase D_r a hartiei dintr-un transformator de putere, pe baza parametrilor dreptei duratei de viata trasate de producator ($\ln D = a + b/T$) si a curbei de incarcare in exploatare a transformatorului, respectiv a variatiei in timp a temperaturii hartiei $T(t)$. Se prezinta in detaliu procedura de imbatranire accelerata a hartiei in ulei mineral si modul de variatie a rezistivitatii de volum a hartiei (factor de diagnostic) cu durata de imbatranire. Alegand un criteriu de sfarsit de viata pentru rezistivitate se determina dreapta duratei de viata (marimile a si b) prin doua metode: metoda standard (care implica o imbatranire accelerata la trei temperaturi) si o metoda rapida (o imbatranire la cea mai inalta temperatura si determinarea energiei de activare prin masuratori DSC). Pe baza valorilor marimilor a si b - corespunzatoare celor doua metode - se determina uzura hartiei, durata de viata consumata si durata de viata ramasa.

1. INTRODUCERE

Datorita solicitarilor (termice, electrice, mecanice, de mediu, etc.) - permanente si/sau temporare - la care sunt supuse transformatoarele electrice în exploatare, componentele acestora sufera diferite procese de imbatranire (degradare) care conduc la reducerea valorilor proprietatilor lor esentiale si la scoaterea prematura din functiune a acestor echipamente. Una din componentele cele mai sensibile la actiunea acestor solicitari o constituie sistemul de izolatie hartie-ulei, durata de viata a unui transformator depinzand, de fapt, de viteza de degradare a hartiei. Degradarea accentuată a hârtiei conduce la străpungerea izolației și la scoaterea din funcțiune a transformatorului, refacerea izolației fiind o operație complicată și costisitoare [1].

Hârtia pentru transformator este formată din celuloză, hemiceluloză și reziduuri de tiolignină care nu au fost eliminate complet în timpul procesării. Celuloza este formată din lanțuri liniare polimerice constituite din unități ciclice β -D-glucopiranozil, legate una de alta prin legaturi glicozidice ($1 \rightarrow 4$, fig. 1) [2]. Numărul acestor unități pe fiecare lanț reprezinta gradul de polimerizare al hartiei (GP). Daca hartia este neutilizata (neimbatranita), gradul de polimerizare al acesteia este de aproximativ 1000-1200. Daca valoarea gradului de polimerizare scade sub 200 se consideră că hârtia a atins criteriul de sfârșit de viață [3, 36].

Mai multe lanturi orientate paralel unele fata de altele formeaza miclele, care se aranjeaza in acelasi mod, formand fibrilele si apoi fibrele celulozice [27]. Aceasta structura determina porozitatea ridicata a celulozei, respectiv a hartiei de transformator. Rezistenta mecanica a

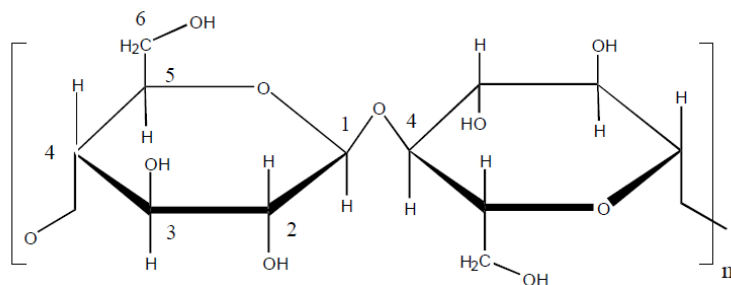


Fig. 1. Monomerul de celuloză [1].

celulozei se datoreaza orientarii liniare a lanturilor si a legaturilor intre lanturi prin intermediul atomilor de hidrogen [21]. Gradul de polimerizare si rezistenta la rupere furnizeaza informatii privind numarul de lanturi moleculare si de legaturi de hidrogen intre lanturi intacte. La nivel molecular, celuloza prezinta o structura semicristalina, in care zonele amorse sunt alternate cu zonele cristaline. Zonele amorse permit patrunderea apei, in timp ce zonele cristaline sunt rigide, inerte, ordonate si relativ impermeabile. Degradarea celulozei consta in distrugerea lanturilor macromoleculare si poate fi pusă pe seama a trei procese distincte: oxidarea, hidroliza si piroliza.

In numeroase lucrari sunt analizate fenomenele de imbatranire a hartiei de transformator sub actiunea caldurii si in prezenta uleiului (vegetal si mineral). S-au studiat variatiile proprietatilor electrice (rigiditatea dielectrica si factorul de pierderi) [6-8] si fizico-chimice (conținutul de apă [9-11], conținutul de furani din ulei [11-12] si gradul de polimerizare [13-16] ale hartiei imbatranite. S-a constatat ca, in aceleasi conditii, hartia se degradeaza mai repede in ulei mineral decat in ulei vegetal (fig. 2) [21], ca hartia imbatranita in ulei vegetal are rigiditatea dielectrica si factorul de pierderi mai mari decat cea imbatranita in ulei mineral si ca valorile conținutului de apă din aceasta scad cu durata de imbatranire. De asemenea, s-a observat ca in uleiul mineral imbatranit se gasesc un conținut mai ridicat de furani decat in cel vegetal, iar gradul de polimerizare al hartiei imbatranite in ulei vegetal este de aproximativ doua ori mai mare decat al celei imbatranite in ulei mineral [5].

In lucrarile anterioare [1-2, 4-5, 17-19] s-au prezentat rezultatele cercetarilor efectuate de autori privind degradarea hartiei in diferite conditii, respectiv la diferite temperaturi si in absenta sau in prezenta uleiului mineral sau vegetal. In aceasta lucrare se prezinta rezultatele unui studiu privind variatiile rezistivitatii hartiei de transformator impregnate cu ulei mineral supuse unei imbatraniri termice accelerate cu temperatura si duratele solicitarilor, metodele de determinare a

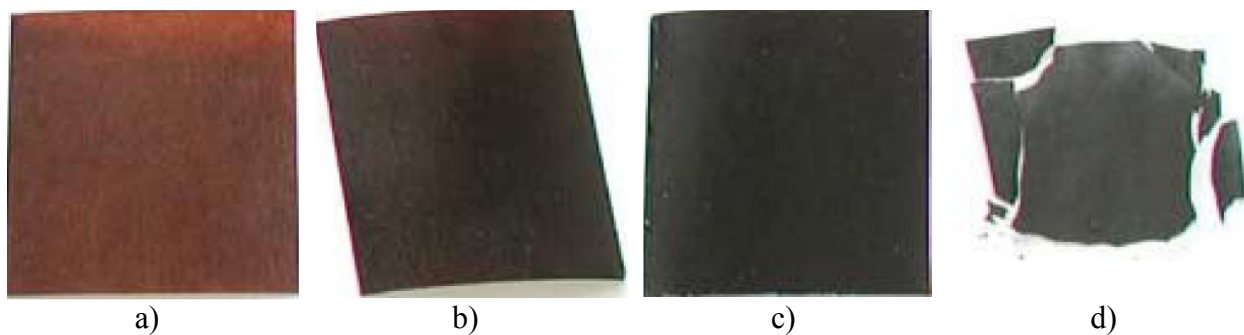


Fig. 2. Degradarea hartiei Kraft dupa 4000 ore de solicitare termica la 150 °C (a,c) si 170 °C (b, d), in ester natural (a,c) si ulei mineral (b,d) [21].

dreptei duratei de viata la solicitari termice constante si calculul duratei de viata consumate si ramase ale hartiei, supuse, in exploatare, unor solicitari termice variabile.

2. DEGRADAREA HARTIEI DE TRANSFORMATOR

Degradarea celulozei se datoreaza mai multor factori, cum sunt apa, caldura, oxigenul, lumina, agentii poluanti din aer, microorganismele etc. [43]. Principalele centre reactive din celuloza sunt grupurile secundare hidroxil (OH) localizate in pozitiile C-2 si C-3 si cele primare situate in C-6 (fig. 1). Aceste grupuri sunt implicate in legaturile de hidrogen intre lanturi, care asigura reactivitatea la temperaturi ridicate. Apa migreaza in aceste zone si rupe legaturile de hidrogen dintre lanturi, conducand la distrugerea locala a matricii moleculare.

Degradarea generata printr-o solicitare (imbatranire) termica accelerata reprezinta o combinatie de ruperi hidrolitice si scizuni termice ($1 \rightarrow 4$) a legaturilor glicozidice. Oxidarea si alte reactii secundare cu grupurile hidroxil C-2, C-3 si C-6 reprezinta al doilea factor important de degradare.

Sub actiunea combinata a oxigenului si caldurii rezultă o serie de produși de degradare. Dintre aceștia, cei mai importanți sunt H_2 , CO, CO_2 , H_2O , H_2 , CH_4 , acizii carboxilici (cu masă moleculară mică), compușii furanici etc. (tipurile de produși rezultati depinzand de natura chimica a hartiei si de temperatura la care se afla materialul [34-35]). Pe lângă aceștia, în urma reacțiilor de termo-oxidare a celulozei pot sa apară o serie de radicali liberi foarte instabili, care inițiază reacții (în avalanșă) de depolimerizare a lanțului macromolecular celulozic. Depolimerizarea celulozei datorată oxidării, este catalizată de radicalii hidroxil ($HO\bullet$) care apar la descompunerea hidro-peroxizilor H_2O_2 . Hidroperoxizii se pot forma ca urmare a reacțiilor dintre oxigen și apă, catalizate de cationii metalelor de tranziție (Cu^+/Cu^{2+} sau Fe^{2+}/Fe^3) [3-4].

Apa influențează degradarea celulozei prin inițierea reacțiilor de hidroliză. Datorită naturii higroscopice a celulozei și structurii capilare a fibrelor, apa se acumulează între moleculele celulozei și provoacă ruperea legăturilor dintre acestea, accelerand astfel procesele de îmbătrânire a celulozei. Apariția apei și acizilor ca urmare a oxidării celulozei, conduce la inițierea reacțiilor de hidroliză acidă. Cauza principală a producerii acestui tip de reacție o constituie disocierea acizilor carboxilici în apă, proces în urma căruia se produce creșterea rapidă a concentrației de ioni H^+ . Acizii carboxilici nedisociați în apă nu favorizează reacțiile de hidroliză acidă, respectiv reacțiile de depolimerizare a celulozei. Astfel, apa nu participă în mod direct la descompunerea celulozei (și la înrăutățirea proprietăților mecanice ale acesteia), ci influențează concentrația de ioni H^+ , prin favorizarea disocierii acizilor [5]. Trebuie remarcat ca degradarea celulozei prin hidroliza este neomogena, respectiv ca viteza de depolimerizare are valori mari in zonele amorfe si valori foarte reduse in zonele cristaline ale materialului [32].

Concentrația de apă din componentele sistemelor de izolație ale transformatoarelor de putere (SITP) depinde de starea de echilibru termodinamic a sistemului hartie-ulei, puternic influențată de temperatura. Migrarea apei se produce până când presiunea de vapori de apă este aceeași în ambele componente ale sistemului de izolație. Odată cu creșterea temperaturii, solubilitatea apei în ulei crește, în timp ce capacitatea de absorbție a hârtiei scade, astfel încât, pentru echilibrarea sistemului apa va migra din hârtie în ulei [6].

Mecanismul de degradare a celulozei este prezentat schematic în figura 3. Se observa ca are loc o reacție de dehidratare și eliminare de formaldehida (CH_2O) și formare de 2-furfural [24]. Din acest motiv, 2-furfuralul este unul din parametrii chimici utilizați pentru caracterizarea stărilor de degradare a hartiei de transformator [35].

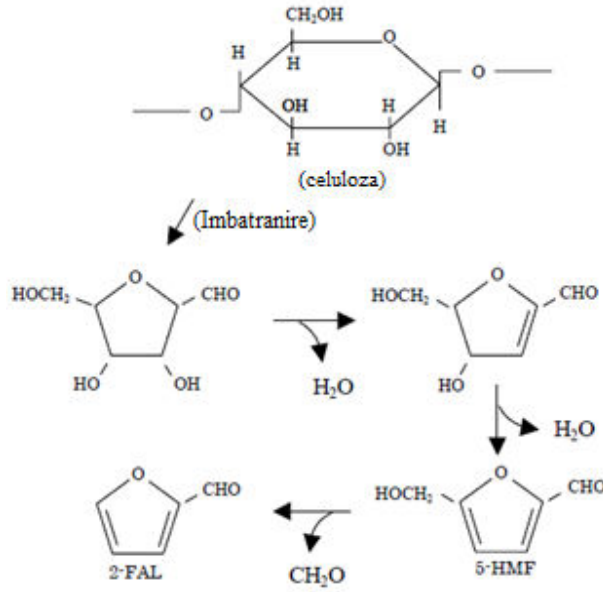


Fig. 3. Degradarea celulozei cu generare de 5-Hidroximetilfural (5-HMF) ($\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_3$) si de 2-Fural (2-FAL) ($\text{OC}_4\text{H}_3\text{CHO}$) [24].

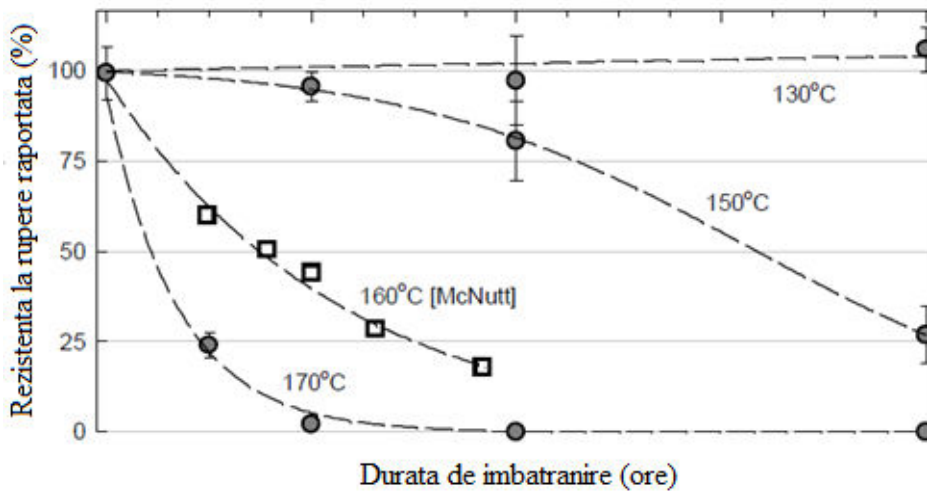


Fig. 4. Variatia rezistentei la rupere prin tractiune cu durata de imbatranire termica a hartiei tratate termic [21, 23].

Cei mai importanti parametri utilizati pentru caracterizarea starii de degradare (imbatranire) a hartiei de transformator sunt rezistenta la rupere prin tractiune si gradul de polimerizare [20]. Variatiile acestor marimi cu intensitatile si duratele solicitarilor termice sunt analizate in [20-25, 28-33, 35]. Influenta temperaturii de imbatranire asupra rezistentei la rupere prin tractiune si a gradului de polimerizare este prezentata in figurile 4 si 5 [21, 23].

3. CURENTII DE ABSORBTIE/RESORBTIE

La aplicarea unei tensiuni treapta U_0 armaturilor de arie A ale unui condensator plan (cu dielectricul de grosime g , conductivitate σ si permitivitate ϵ), acesta absoarbe un curent variabil in timp, de intensitate $i_a(t)$:

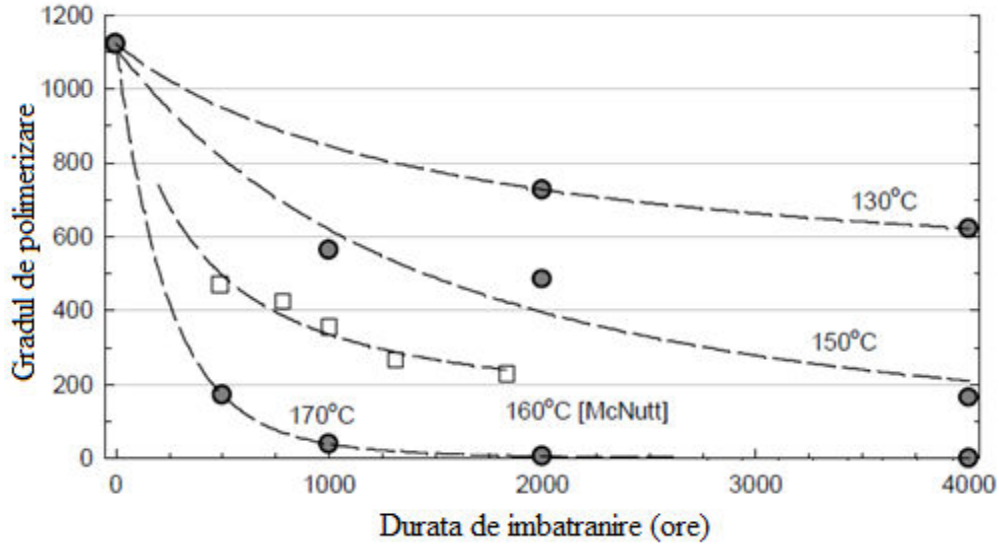


Fig. 5. Variatia gradului de polimerizare cu durata de imbatranire termica a hartiei tratate termic [21, 23].

$$i_a(t) = i_i(t) + i_p(t) + i_{ss}(t) + i_c(t) \quad (1)$$

unde $i_i(t)$ reprezinta intensitatea curentului de incarcare a condensatorului avand ca dielectric vidul, $i_p(t)$ – intensitatea curentului de polarizare, $i_{ss}(t)$ – intensitatea curentului aferent sarcinii spatiale si $i_c(t)$ – intensitatea curentului de conductie [40].

Componenta $i_i(t) = \varepsilon_0 A \partial E / \partial t$ corespunde incarcarii condensatorului cu vid (pentru $\varepsilon = \varepsilon_0$), $i_p(t)$ corespunde fenomenului de polarizare a dielectricului, $i_{ss}(t)$ corespunde sarcinii spatiale aflate in volumul dielectricului (generate in timpul proceselor tehnologice de fabricatie si de degradare in exploatare, prin injectia de purtatori de sarcina etc.), iar $i_c(t) = A \sigma U_0 / g$ se datoreaza convectiei electronilor, golurilor, ionilor si molionilor [40]. Aceasta componenta a curentului nu se modifica in timp (de la aplicarea si pana la anularea tensiunii) si permite determinarea experimentală a conductivitatii (rezistivitatii) electrice a dielectricului [27].

Daca se decupleaza sursa de tensiune ($U_0 = 0$) si se scurtcircuiteaza armaturile, condensatorul se descarca, prin dielectricul sau trecand un curent tranzitoriu $i_r(t)$:

$$i_r(t) = i_d(t) + i_{dp}(t) + i'_{ss}(t), \quad (2)$$

unde $i_d(t)$ reprezinta intensitatea curentului de descarcare a condensatorului cu vid, $i_{dp}(t)$ - intensitatea curentului de depolarizare si $i'_{ss}(t)$ - intensitatea curentului de sarcina spatiale.

Cunoscand valorile curentilor de absorbtie si de resorbție la momentul t (dupa aplicarea tensiunii continue U_0) se poate calcula rezistivitatea de volum a dielectricului $\rho_v(t)$:

$$\rho_v(t) = \frac{S}{g} \frac{U_0}{i_a(t) - i_r(t)}, \quad (3)$$

unde S reprezinta aria suprafetei active a electrozilor si g – grosimea dielectricului [18].

4. DURATA DE VIATA TERMICA

Durata de viata a unui transformator reprezinta durata de functionare in exploatare, respectiv intervalul de timp scurs de la punerea sa in functiune si pana la defectarea acestuia. Pentru sistemul de izolatie al transformatorului (SIT), durata de viata reprezinta durata de atingere a unei valori limita admisibile a unui parametru esential pentru functionarea SIT (rigiditatea dielectricaetc.) a uneia dintre componentele sale (hartie, ulei). Pentru estimarea duratei de viata sunt necesare definirea unui factor de diagnostic relevant care sa descrie cat mai corect starea materialului si a unei valori critice a acestui factor (criteriu de sfarsit de viata) referitoare la functionarea corecta a sistemului de izolatie [18]. Pentru hartia de transformator, ca factori de diagnostic se utilizeaza, indeosebi, gradul de depolimerizare si rezistenta la rupere prin tractiune, dar si rigiditatea dielectrica, rezistivitatea, factorul de pierderi etc. Pentru aceasta trebuie luate in considerare mecanismele si modelele de degradare a hartiei sub actiunea solicitarilor unifactor sau multifactor.

Pentru hartia de transformator analizata in lucrare s-a considerat ca viteza de degradare a acesteia sub actiunea caldurii (v_T) variaza cu temperatura T dupa o functie de tip Arrhenius:

$$v_T = v_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (4)$$

unde v_0 este o constanta de material, E_a – energia aparenta de activare (asociata procesului de conductie electrica in hartie) si $R = 8314 \text{ J/kmolK}$ - constanta generala a gazelor.

Plecand de la ecuatia (1) si admitand ca, urmare a procesului de degradare la temperatura T , rezistivitatea hartiei a scazut pana la valoarea limita sub care hartia nu-si mai indeplineste rolul de izolator electric (respectiv, a atins criteriul de sfarsit de viata) in intervalul de timp D (durata de viata) se obtin relatiile:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (5)$$

$$\ln D = a + b/T, \quad (6)$$

unde $a = \ln D_0$ si $b = E_a/RT$ sunt constante de material care se determina experimental [27].

Ecuatia (3) reprezinta, in coordonate semilogaritmice ($\ln D(T) = f(1/T)$), dreapta duratei de viata corespunzatoare solicitarilor termice la temperatura constanta T (fig. 6) [27]. Pentru determinarea constantelor a si b s-au utilizat doua metode: metoda standard a celor trei temperaturi (MIEC) [38] si metoda energiei de activare (MEA) [27].

MIEC implica efectuarea unor incercari de imbatranire termica accelerata la trei temperaturi, alese in concordanta cu [39] ($T_{1,2,3}$), trasarea curbelor de variatie a rezistivitatii ρ cu durata de imbatranire τ ($\rho(\tau)$), alegerea unui criteriu de sfarsit de viata si determinarea punctelor de intersectie ale curbelor $\rho(\tau)$ cu orizontala corespunzatoare criteriului de sfarsit de viata ($Q_{1,2,3}$) si a absciselor acestora ($\tau_{1,2,3}$) (fig.7) [38]. Cu ajutorul punctelor $P_1(1/T_1, \ln\tau_1)$, $P_2(1/T_2, \ln\tau_2)$ si $P_3(1/T_3, \ln\tau_3)$ se traseaza dreapta duratei de viata si valorile parametrilor a si b din ecuatia (3).

Utilizarea MEA implica efectuarea unei imbatraniri accelerate in laborator la valoarea cea mai mare recomandata in [39], respectiv T_3 (fig. 7) si determinarea energiei de activare pe baza curbelor DSC (Differential Scanning Calorimetry) prin care se evidentiaza temperaturile de oxidare a hartiei [4]. Cunoscand valoarea energiei de activare E_a , se determina parametrul b '=

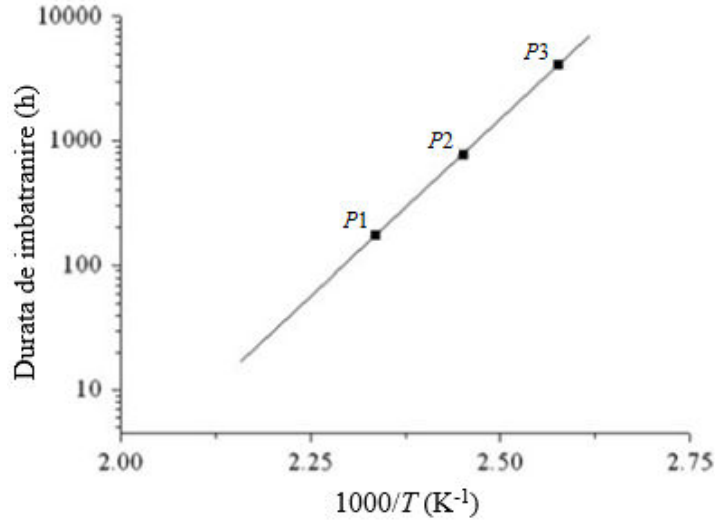


Fig. 6. Dreapta duratei de viata pentru hartie Kraft.

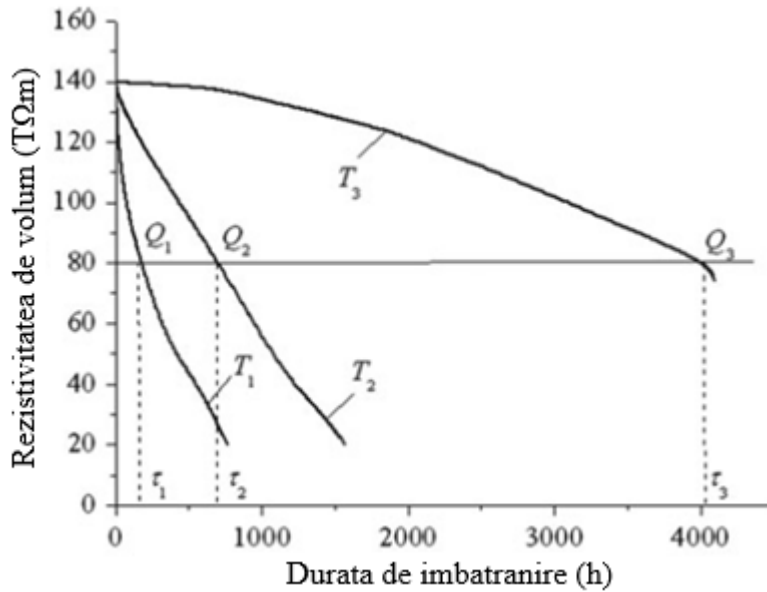


Fig. 7. Variatia rezistivitatii hartiei Kraft cu durata de imbatranire (pentru $T_1 = 155 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_2 = 135 \text{ }^\circ\text{C}$ si $T_3 = 115 \text{ }^\circ\text{C}$).

E_a/R . Alegand, apoi, criteriul de sfarsit de viata se determina coordonatele punctului P_3 ($1/T_3$, $\ln\tau_3$) si cu ajutorul relatiei (3) se determina valoarea parametrului a' [18].

5. DURATA DE VIATA CONSUMATA SI RAMASA

Daca transformatorul functioneaza la o temperatura constanta T , durata de viata consumata D_c este identica cu durata de functionare D_f , iar durata de viata ramasa D_r este:

$$D_r = D - D_f \quad (7)$$

unde D reprezinta durata de viata estimata pentru temperatura de functionare T .

Cum, in exploatare, sarcina si, deci, temperatura sistemului de izolatie sunt variabile in timp ($T(t)$), calculul marimilor D_c si D_r este mai complicat. In acest sens se defineste uzura termica a materialului izolant in unitatea de timp (viteza de degradare a materialului) U_D plecand de la expresia duratei de viata stabilita pe baza modelului Dakin ($D = A \cdot \exp(b/T)$) [27]:

$$U_D = \frac{1}{D} = \frac{1}{A} e^{-b/T} . \quad (8)$$

si uzura $U_D^*(\Delta t)$ a materialului intr-un interval de timp Δt , respectiv durata de viata relativa consumata in intervalul $\Delta t (D_{rc}^*)$:

$$U_D^*(\Delta t) = D_{rc}^* = \frac{1}{A} \cdot \int_0^{\Delta t} e^{-b/T(t)} dt . \quad (9)$$

Durata de viata consumata in intervalul $\Delta t (D_c^*)$ este:

$$D_c^* = D_{rc}^* \cdot D , \quad (10)$$

iar durata de viata ramasa D_r dupa functionarea in intervalul Δt , la temperatura variabila $T(t)$ este:

$$D_r = D - D_c^* . \quad (11)$$

6. EXPERIMENTARI

Experimentarile s-au efectuat pe esantioane din hartie Kraft, impregnate cu ulei mineral MOL (cu $\rho_v = 4 \times 10^{12} \Omega m$). Esantioanele au fost supuse unor imbatraniri termice accelerate intr-o etuva de laborator Trade Raypa cu circulatie forata de aer la trei temperaturi ($T_1 = 155 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_2 = 135 \text{ }^\circ\text{C}$ si $T_3 = 115 \text{ }^\circ\text{C}$), pentru durate cuprinse intre 1000 si 4000 h. La intervale bine definite (τ), grupuri de 5 esantioane au fost extrase din etuva si s-au masurat curentii de absorbtie/resorbtie.

Pentru masurarea curentilor s-au utilizat placi de forma patratica cu latura de 100 mm si grosimea de 0,24 si 0,5 mm (Weidmann AG). Masuratorile s-au efectuat cu un electrometru Keithley 6517, conectat la o celula de masura Keithley 8009 sau la o celula speciala construita in UPB, la tensiuni cuprinse intre 100 si 1000 V [4].

Testele DSC au fost realizate la ICPE-CA, cu un echipament Setaram 131 EVO (Setaram Instrumentation, France) utilizand esantioane cu dimensiunile $3 \times 3 \times 0,08 \text{ mm}^3$.

Tabelul 1. Conditionarea esantioanelor de hartie Kraft.

Esantion	Temperatura [$^\circ\text{C}$]	Durata [ore]	Pierdere de masa [%]
A	-	-	-
B	50	48	4
C	90	24	6.8
D	90	48	6.9
E	130	48	7.2

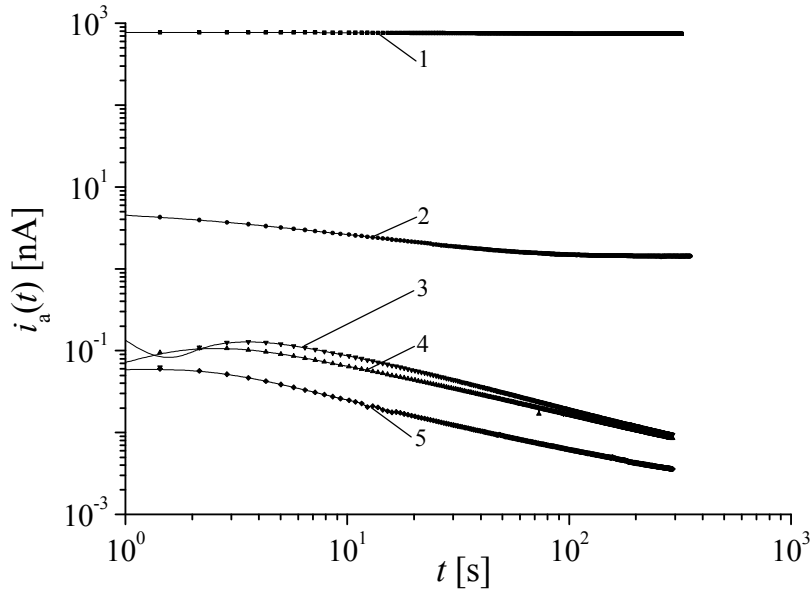


Fig. 8. Variatia in timp (t) a curentilor de absorbtie i_a pentru esantioane din hartie neimpregnata, neconditionate A (1) si conditionate termic: B (2), C (3), D (4) si E (5).

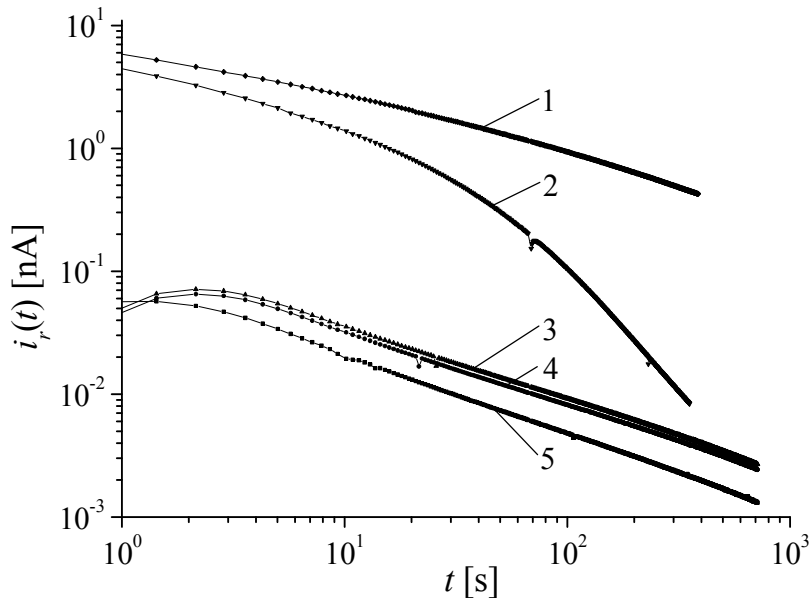


Fig. 9 Variatia in timp a curentilor de resorbtie i_r pentru esantioane din hartie neimpregnata (A) si conditionate termic: B (2), C (3), D (4) si E (5).

7. REZULTATE

In figurile 8 si 9 se prezinta variatiile in timp ale curentilor de absorbtie, masurati la o tensiune $U_0 = 300$ V, timp de 3600 s pe esantioane din hartie neimpregnata de 0,24 mm grosime, tratate termic timp de 24-48 ore la temperaturi cuprinse intre 50 si 130 °C (Tabelul 1). Inainte si dupa conditionare s-au masurat masele esantioanelor si s-au calculat pierderile de masa datorate evaporarii apei din hartie. Curbele trasate reprezinta media aritmetica a valorilor curentilor masurate pe 3 probe din fiecare tip de esantion.

Se constata ca valorile curentilor de absorbtie si resorbtie scad cu cresterea duratei si temperaturii de conditionare. Aceasta scadere se datoreaza, in principal, vaporizarii apei, si deci reducerii concentratiei de purtatori de sarcina si dipoli electrici din volumele esantioanelor [41].

Trebuie remarcat ca, de la scoaterea de sub tensiune si pana la incheierea masuratorilor s-au scurs cca. 90 minute, timp in care esantioanele au absorbit apa din mediul ambiant, ceea ce a influentat valorile curentilor.

Impregnarea cu ulei mineral a esantioanelor D a condus la reducerea valorilor curentilor de absorbtie si resorbtie, asa cum rezulta si din figurile 10-11. Evident, aceste valori cresc cu durata de imbatranire, ca urmare a degradarii hartiei si cresterii concentratiei de purtatori de sarcina.

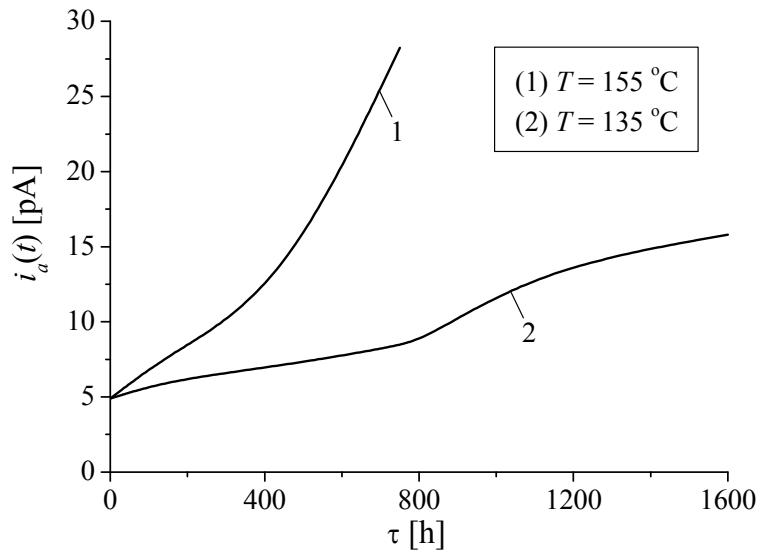


Fig. 10. Variatia curentilor de absorbtie i_a cu durata de imbatranire τ pentru hartie impregnata imbatranita termic accelerat la $T_1 = 155^\circ\text{C}$ (1) și $T_2 = 135^\circ\text{C}$ (2).

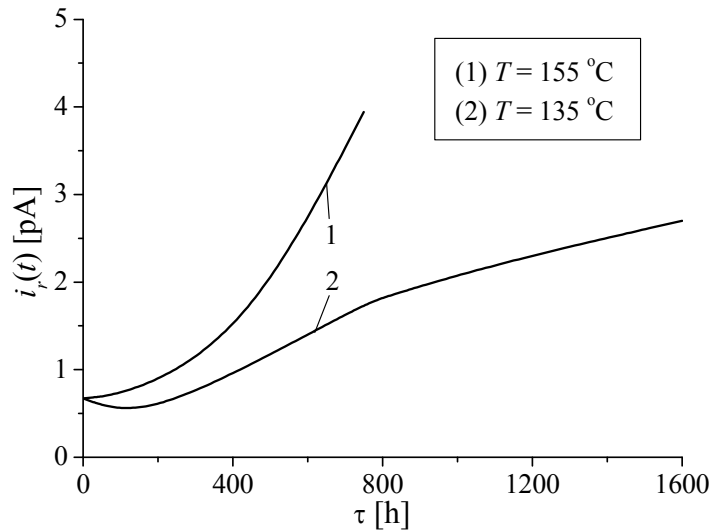


Fig. 11. Variatia curentilor de resorbtie i_r cu durata de imbatranire τ pentru hartie impregnata imbatranita termic accelerat la $T_1 = 155^\circ\text{C}$ (1) și $T_2 = 135^\circ\text{C}$ (2).

Cu ajutorul relatiei (3) s-au calculat valorile rezistivitatii de volum si s-au trasat curbele de variatie a rezistivitatii – masurate la o ora de la aplicarea tensiunii – cu durata de imbatranire pentru cele trei temperaturi (fig. 7). Se constata ca rezistivitatea scade cu durata cu durata de imbatranire si cu temperatura, ca urmare a degradarii celulozei si, deci, a cresterii concentratiei de purtatori de sarcina (indeosebi, ioni si molioni).

Considerand rezistivitatea de volum ca factor de diagnostic si valoarea de $80 \text{ T}\Omega\text{m}$ – criteriu de sfarsit de viata (fig. 7) s-a determinat ecuatia dreptei duratei de viata

$$\ln D(T) = -25,49 + 13114,16/T \quad (12)$$

cu parametrii (conform ecuatiei (6)), $a = -25,49$ si $b = 13114,16 \text{ K}$ si s-a trasat dreapta duratei de viata (fig. 6).

Cunoscand valoarea lui b , s-a determinat valoarea energiei de activare $E_a = 109 \text{ kJ/mol}$. Aceasta valoare este in concordanta cu valorile prezentate in literatura de diferiti cercetatori, respectiv intre 91 si 120 kJ/mol (in functie si de caracteristicile si modul de tratare a uleiului de impregnare [18, 32, 42]).

Valorile duratelor de viata pentru diferite temperaturi de functionare a izolatiei din hartie s-au determinat cu ecuatia (12) – corespunzatoare metodei celor trei temperaturi, recomandate de IEC 60216 (MIEC)–si sunt prezentate in tabelul 2.

Utilizarea metodei IEC 60216 (MIEC) necesita eforturi importante de materiale, energie si forta umana. O evaluare simpla arata ca, in cazul utilizarii MIEC, sunt necesare 200 esantioane ($100 \times 100 \times 0,24 \text{ mm}^3$), peste 6000 ore de imbatranire, peste 90 ore de testari si un consum de energie de cca.6000 kWh. Drept urmare, in cazul inlocuirii unor materiale din sistemul de izolatie al transformatorului este utila o metoda mai rapida si mai putin costisitoare. In acest sens a fost testata Metoda energiei de activare (MEA) prezentata in [18]. In cadrul acestei metode parametrul b din ecuatia dreptei duratei de viata (6) s-a determinat prin masurarea energiei de activare, iar parametrul a – printr-o imbatranire accelerata la temperatura de incercare cea mai ridicata, respectiv la $155 \text{ }^\circ\text{C}$. Energia de activare s-a calculat pe baza unei analize termice rapide, utilizand peak-ul exotermic de temperatura ridicata din masuratorile DSC [18].

Valoarea obtinuta pentru energia de activare cu MEA este $E_a' = 112 \text{ kJ/mol}$, in acord cu valorile obtinute pentru celuloza si de alti autori (intre 105 si 150 kJ/mol) [18, 32, 42]. Cunoscand valoarea lui E_a' s-a calculat parametrul b' al dreptei duratei de viata ($b' = 13471,42 \text{ K}$). Utilizand curba de variatie a rezistivitatii cu durata de imbatranire la $155 \text{ }^\circ\text{C}$ (fig.6) si criteriul de sfarsit de viata $20 \text{ T}\Omega\text{m}$, s-a determinat valoarea parametrului a' ($a' = -26,21$), respectiv ecuatia dreptei duratei de viata:

$$\ln D(T) = -26,21 + 13471,42/T. \quad (13)$$

Utilizarea metodei energiei de activare a necesitat doar 600 ore de imbatranire termica in laborator, 30 ore pentru masuratori DSC, procesare si interpretare a rezultatelor si cca. 600kWh de energie.

Valorile duratei de viata a hartiei calculate cu metoda energiei de activare (MEA), pe baza relatiei (13), pentru diferite valori ale temperaturii de functionare a transformatorului sunt prezentate in tabelul 2. Se constata o buna concordanta intre valorile duratei de viata calculate prin cele doua metode.

Utilizand valorile constantelor a , a' , b si b' s-au calculat duratele de viata consumate si ramase, corespunzatoare unor temperaturi variabile ale hartiei in transformatorul aflat in

exploatare. Curbele de variatie a temperaturii hot spot in timpul unei zile $T(t)$, corespunzatoare unor incarcari diferite ale transformatorului sunt prezentate in figurile 12 si 13, iar valorile duratelor de viata sunt prezentate in tabelul 3.

Tabelul 2. Valori ale duratei de viata (in ani) a hartiei Kraft.

Metoda/Temp. (°C)	70	80	90	100	110	155
MIEC (3 imbatraniri)	43,73	15,17	5,58	2,16	0,88	0,013
MEA (o imbatranire)	48,24	15,86	5,54	2,05	0,80	0,02

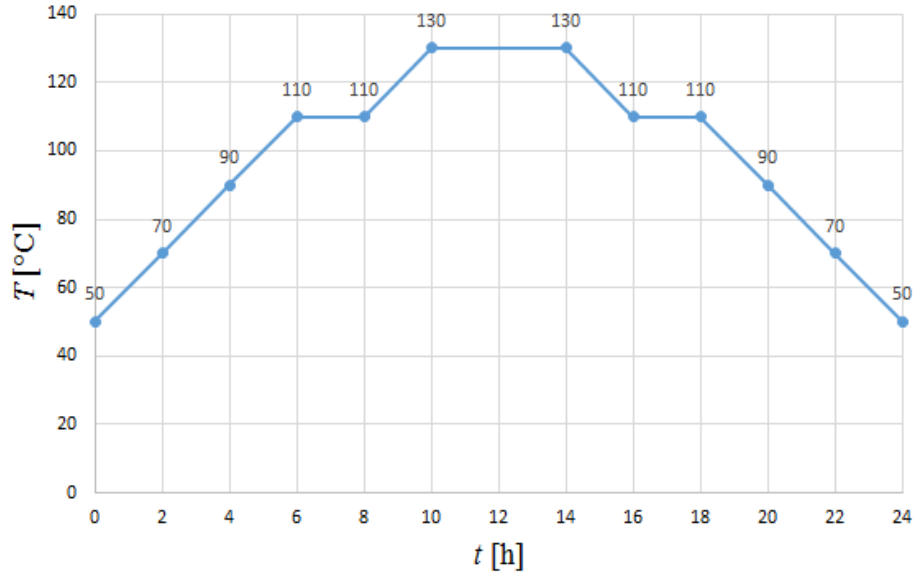


Fig. 12. Variatia temperaturii izolatiei unui transformator (T) in functie de timp - Varianta 1.

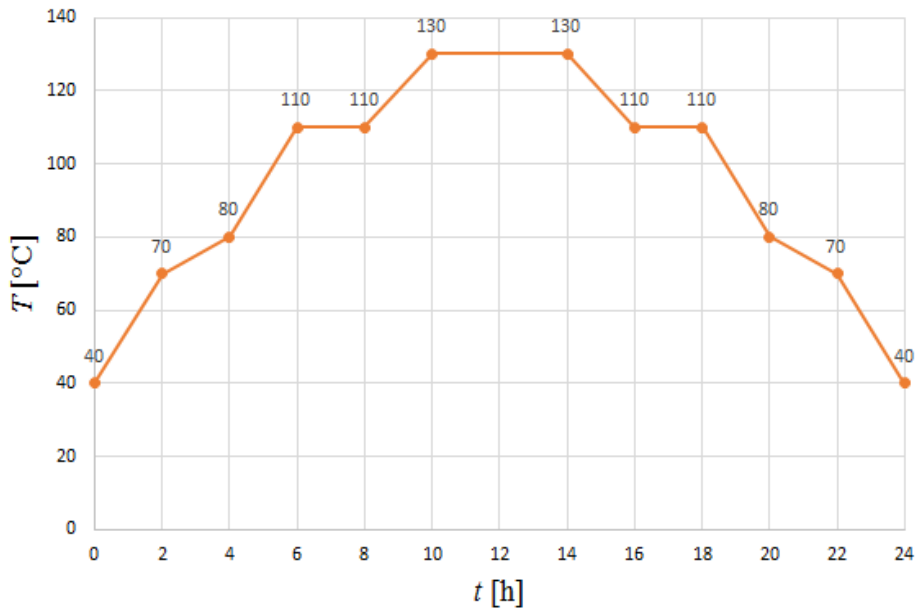


Fig. 13. Variatia temperaturii izolatiei unui transformator (T) in functie de timp - Varianta 2.

Tabelul 3. Valori ale duratelor de viata consumate intr-o zi si ramase calculate cu metoda standard (MIEC) si a energiei de activare (MEA) pentru temperaturile variabile prezentate in figurile 12 (1) si 13 (2).

Durate/Metoda	MIEC1	MIEC2	MEA1	MEA2
D la 80 °C (ani)	15,17	15,17	15,86	15,86
U_D^* (Δt)	$6,2 \times 10^{-3}$	$6,101 \times 10^{-3}$	$5,178 \times 10^{-3}$	$5,1 \times 10^{-3}$
U_D^* (s^{-1})	$7,175 \times 10^{-8}$	$7,061 \times 10^{-8}$	$5,993 \times 10^{-8}$	$5,903 \times 10^{-8}$
D_{Dc}^* (s)	$2,546 \times 10^6$	$2,506 \times 10^6$	$2,85 \times 10^6$	$2,807 \times 10^6$
D_{Dc}^* (zile)	29,47	29,00	32,99	32,49
D_{Dc}^* (ani)	0,081	0,0795	0,0904	0,089
D_r (s)	$4,082 \times 10^8$	$4,082 \times 10^8$	$5,475 \times 10^8$	$5,475 \times 10^8$
D_r (ani)	15,089	15,091	15,77	15,771

Notatii: U_D^* (Δt) - uzura izolatiei in intervalul $\Delta t = 86400s$ (egala cu durata de viata relativa consumata in Δt (D_{Drc}^*)); U_D^* - uzura izolatiei in unitatea de timp; D_{Dc}^* - durata de viata consumata in intervalul Δt ; D_r - rezerva de durata de viata a izolatiei dupa un ciclu de functionare a transformatorului.

Se constata ca in zonele din transformator in care temperatura ar lua, in cursul unei zile, variatiile prezentate in figurile 12 si 13, consumul de durata de viata este foarte mare, respectiv de cca. 30 ori mai mare decat in cazul unei functionari la temperatura constanta de 80 °C.

8. CONCLUZII

Valorile duratelor de viata obtinute prin cele doua metode (MTP si MEA) sunt relativ apropiate. Obtinerea dreptei duratei de viata prin MEA necesita timp si energie mult mai reduse decat metoda standard (MIEC) si poate fi utilizata in cazul inlocuirii hartiei in SITP.

In zonele din sistemele de izolatii ale transformatoarelor cu valori mai ridicate a temperaturii, durata de viata a hartiei se reduce considerabil.

Cunoasterea variatiei temperaturii in timpul functionarii transformatorului permite calculul duratei de viata consumate si a celei ramase.

9. MULTUMIRI

O parte din rezultatele prezentate in aceasta lucrare au fost realizate in cadrul proiectului PN-III-P2-2.1-PTE-2016-0053, finantat de Unitatea Executiva pentru Finantarea Invatamantului Superior, a Cercetarii, Dezvoltarii si Inovarii - UEFISCDI.

10. BIBLIOGRAFIE

- [1] A. Ciuriuc, L. M. Dumitran, P.V. Noțingher, L.V. Bădicu, “Îmbătrânirea hârtiei în uleiurile vegetale și minerale pentru transformatoare”, Lucrarile Simpozionului ACTUALITĂȚI ȘI PERSPECTIVE ÎN DOMENIUL MAȘINILOR ELECTRICE (SME'14), Bucuresti, 3 Octombrie, Lucrarea L 16, 2014.
- [2] A. Ciuriuc, L.M. Dumitran, P.V. Notingher, „Dielectric Properties of Pressboard Insulation Aged in the Presence of Vegetable Transformer Oil”, 11th International Conference on Solid Dielectrics (ICSD), Bologna, June 30 - July 4, 2013, pp. 549 - 552

- [3] L.E. Lundgaard, W. Hansen, D. Linhjell, T.J. Painter, "Aging of Oil Impregnated Paper in Power Transformers", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 19, No. 1, 2004, pp. 230-239.
- [4] L.V. Badicu, „Diagnosticarea și monitorizarea sistemelor de izolație ale transformatoarelor de putere”, Teză de doctorat, UPB, București, 2011.
- [5] A. Ciuriuc, „Degradation and Lifetime Estimation of Vegetable oil for Power Transformers”, Ph D Thesis, University Politehnica of Bucharest, Bucharest, 2015.
- [6] N. Li, J. Li, L. Yang, R. Liao, "Effect of Acidic Substances on Thermal Life of Vegetable Oil-paper Insulation", International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2014), 8-11 September 2014, Poznan, Poland, Paper B-4-1.
- [7] M. Hemmer, R. Badent, T. Leibfried, "Electrical properties of vegetable oil – impregnated paper insulation", 2003 Ann. Rep. Conf. on Elec. Insul. and Diel. Phen., 19-22 October 2003, pp. 60-63.
- [8] N. Azis, Z.D. Wang, "Acid Generation Study of Natural Ester", XVII International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August 22-26, 2011.
- [9] M.A.G. Martins, "Vegetable Oils, an Alternative to Mineral Oil for Power Transformers – Experimental Study of Paper Aging in Vegetable Oil Versus Mineral Oil", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 26, No. 6, 2010, pp. 7-13.
- [10] K.J. Rapp, C.P. McShane, J. Luksich, "Interaction Mechanisms of Natural Ester Dielectric Fluid and Kraft Paper", IEEE Int. Conference on Dielectric Liquids, 26 June-1 July 2005, pp. 393-396.
- [11] S. Yao, J. Li, L. Li, R. Liao and J. Zhou, "Comparison Analysis to Thermal Aging Properties of Vegetable and Mineral Insulating Oils", International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2014), 8-11 September 2014, Poznan, Poland, Paper A-4-1.
- [12] N. Li, J. Li, L. Yang, R. Liao, "Effect of Acidic Substances on Thermal Life of Vegetable Oil-paper Insulation", International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2014), 8-11 September 2014, Poznan, Poland.
- [13] M-L Coulibaly, C. Perrier, A. Beroual, M. Marugan, „Thermal aging of Paper and Pressboard in Mineral and Ester Oils under Air and Nitrogen Atmospheres”, IEEE Int. Conf. on Cond. Monit. and Diagn., 23-27 September, Bali, Indonesia, 2012, pp. 343-346.
- [14] S. Tenbohlen, M. Koch, „Aging performance and Moisture Solubility of Vegetable Oils for Power Transformers”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 25, No. 2, 2010, pp. 825-830.
- [15] L. Yang, R. Liao, C. Sun, H. Sun – „Study on Influence of Natural Ester on Thermal Ageing Characteristics of Oil-paper in Power Transformer”, 2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application, Chongqing, China, 2008, pp. 437-440.
- [16] L.E. Lundgaard, W. Hansen, S. Ingebringtsen, D. Linhjell, M. Dahlund, „Aging of Kraft Paper by Acid Catalyzed Hydrolysis”, 2005 IEEE Int. Conference on Dielectric Liquids, 2005, pp. 381-384.
- [17] P.V. Notingher, L.M. Dumitran, A. Ciuriuc, M. Vihacencu, „Utilizarea uleiurilor vegetale pentru transformatoarele de putere”, Lucrarile Simpozionului ACTUALITĂȚI ȘI PERSPECTIVE ÎN DOMENIUL MAȘINILOR ELECTRICE (SME'13), Editia a IX-a, Bucuresti, 31 Octombrie, 2013, Lucrarea L 6, ISSN: 1843-5912.
- [18] R. Setnescu, L. V. Badicu, L. M. Dumitran, P. V. Notingher, T. Setnescu, "Thermal Lifetime of Cellulose Insulation Material evaluated by an Activation Energy Based Method", Cellulose, Vol. 21, Iss. 1, 2014, pp. 823-833.
- [19] L. V. Badicu, B. Gorgan, L. M. Dumitran, P. V. Notingher, "Oil Impregnated Paper Condition Assessment Using Time Spectroscopy Method", Proc.of 7th Int. Symp.ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING (ATEE 2011), Bucharest, 12-14 May, 2011, pp. 177-182.
- [20] H. P. Gasser, C. Krause, M. Lashbrook, R. Martin, "Aging of Pressboard in Different Insulating Liquids", Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), 26-30 June, Trondheim, Norway, 2011, pp.1-5.
- [21] C. P. McShane, K. J. Rapp, J. Corkran, "Aging of Paper Insulation in Natural Ester Dielectric Fluid", Proc. Of 2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conf., Atlanta, 2001, vol. 2, pp. 675-679.

- [22] K. J. Rapp, J. Luksich, "Review of Kraft Paper/Natural Ester Fluid Insulation System Aging", Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), 26-30 June, Trondheim, Norway, 2011, pp.1-4.
- [23] W.J. McNutt, "Insulation Thermal Life Considerations for Transformer Loading Guides", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, no. 1, pp. 392-401, 1992.
- [24] K. Miyagi, E. Oe, N.Yamagata, "Evaluation of Aging for Thermally Upgraded Paper in Mineral, J. of Int. Council on Electrical Engineering", Vol. 1, No. 2, pp. 181-187, 2011.
- [25] T.A. Prevost, "Thermally Upgraded Insulation in Transformers", Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, pp.120-125, 2005.
- [26] C.P. McShane, G.A. Gauger, G.A., Luksich, J. "Fire Resistant Natural Ester Dielectric Fluid and Novel Insulation System for Its Use", IEEE/PES Transmission & Distribution Conference, April 12-16, 1999, New Orleans, USA, pp. 1-5, 1999.
- [27] P.V.Notingher, Materiale pentru electrotehnica, Vol. 1, Ed. POLITEHNICA PRESS, 2005.
- [28] C.P. McShane, J.L. Corkran, K.J. Rapp, J. Luksich, "Aging of paper insulation retrofilled with natural ester dielectric fluid", 2003 Ann.Rep. Conf.on Elec. Insul. and Diel. Phen., pp.124-128, 2003.
- [29] A. J. Kachler, I. Höhle, "Aging of Cellulose at Transformer Service Temperatures. Part 1: Influence of Type of Oil and Air on the Degree of Polymerization of Pressboard", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 21, No. 2, pp. 15-21, 2005.
- [30] A.M. Emsley, R. J. Heywood, M. Ali, and X. Xiao, "Degradation of Cellulosic Insulation in Power Transformers. Part 4. Effects of Aging on the Tensile Strength of Paper", IEE Proc. Sci. Meas. Technol., Vol. 147, No. 6, pp. 285-290, May 2000.
- [31] M. Ali, C. Eley, A.M. Emsley, R. Heywood, X. Xaio, "Measuring and Understanding the Ageing of Kraft Insulating Paper in Power Transformers", IEEE Elec.Ins. Mag., Vol. 12, No. 3 pp. 28- 34, 1996.
- [32] H.-Z. Ding, Z. D. Wang, "On the Degradation Evolution Equations of Cellulose", Cellulose, Vol.15, pp.205-224, 2008.
- [33] L. E. Lundgaard, W. Hansen and S. Ingebrigtsen, "Ageing of Mineral Oil impregnated Cellulose by Acid Catalysis", IEEE Trans. on Diel.and Electrical Insulation Vol. 15, No. 2, pp. 540-546, 2008.
- [34] S. L. Madorsky, V. E. Hart, S. Straus, "Thermal Degradation of Cellulosic Materials", Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol. 60, No.4, pp. 343-349, 1958.
- [35] R. M. Morais, W. A. Mannheimer, M. Carballeira, J. C. Noualhaguet, "Furfural Analysis for Assessing Transformer Insulation", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 6 No. 2, pp. 159-162, 1999.
- [36] ***IEEE C57.91, "IEEE Guide for Loading Mineral Oil-Immersed Transformers", 1995.
- [37] M. Kazmierski, Life Management of Transformers, In: Transformers: Analysis, Design, and Measurement (Edited by X.M. Lopez-Fernandez), CRC Press, Boca Raton, 2013.
- [38] ***IEC 60216-1, "Electrical insulating materials - Thermal endurance properties - Part 1: Ageing procedures and evaluation of test results", 2013.
- [39] ***IEC 60216-8, "Electrical insulating materials - Thermal endurance properties - Part 8: Instructions for calculating thermal endurance characteristics using simplified procedures", 2013.
- [40] P.V.Notingher, L.M.Dumitran, S.A. Busoi, C. Stancu, E. Balescu, „Estimarea starii de imbatranire a izolatiilor masinilor electrice cu ajutorul curentilor de absorbtie/resorbtie, Lucrarile Simpozionului "ACTUALITATI SI PERSPECTIVE IN DOMENIUL MASINILOR ELECTRICE", 2-3 septembrie, Bucuresti, CD-ROM, Paper L1, pp. 1-6, 2008.
- [41] I. Fofana, H. Hemmatjou, M. Farzaneh, E. Gockenbach, H. Borsi, "Polarization and Depolarization Current Measurements of Oil impregnated Paper insulation System under Thermal Runaway", Proc. of the Int. Conference on Solid Dielectrics (ICSD 2010) 4-9 iulie, Potsdam, Germany, pp. 1-4, 2010.
- [42] A.M. Emsley, G.C. Stevens, "Review of Chemical Indicators of Degradation of Cellulosic Electrical Paper Insulation in Oil-filled Transformers", IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology, Vol. 141, Issue 5, pp. 324-334, 1994.
- [43] M.C. Area, H. Cheradame, "Paper Aging and Degradation: Recent Findings and research Methods", BioResources, Vol. 6, Nr.4, pp. 5307-5337, 2011.

**ACTUALITATI SI PERSPECTIVE
IN DOMENIUL MASINILOR ELECTRICE**



SME '16 EDITIA a - XII - a

**Biblioteca Centrala a UPB
11 noiembrie 2016**

