

Premize pentru elaborare unei metode de evaluare a stării de degradare a sistemelor de izolație ale transformatoarelor de putere pe baza curenților de absorbție/resorbție

L. M. DUMITRAN¹, L. BADICU¹, P. V. NOȚINGHER¹ și
G. TANASESCU²

¹ Universitatea POLITEHNICA București, Splaiul Independenței St., No.313, 060042,
București, România, tel. 0214029285, e-mail: dumitran@elmat.pub.ro

² Simtech International, str. Berceni, no. 8, Sector 4, București, România

REZUMAT

Creșterea siguranței în alimentarea cu energie a consumatorilor necesită în primul rând, cunoașterea stărilor de funcționare a echipamentelor electrice prezente în rețelele de transport și distribuție. Dintre acestea, transformatoarele electrice de putere prezintă o importanță deosebită. În practică, durata de viață a unui transformator de putere este limitată de durata de viață a izolației. Solicitățile permanente sau accidentale ale sistemelor de izolație ale transformatoarelor de putere (SITP) conduc la degradarea acestora, în special a hârtiei și a uleiului mineral.

Lucrarea de față prezintă unele rezultate preliminare care vor fi utilizate pentru elaborarea unei noi metode de estimare a stărilor sistemelor de izolație hârtie-ulei pe baza curenților de absorbție/resorbție. Obținerea acestora a fost posibilă în urma realizării unui proces de îmbătrânire termică accelerată a unor eșantioane de ulei mineral și carton electrotehnic la temperatura $T = 155$ °C. Pentru eșantioanele încercate s-au trasat curbele curenților de absorbție și resorbție, ale conductivității electrice (calculată pe baza acestor curenți), ale componentelor permitivității și conductivității complexe și ale conținutului de apă în funcție de durata de solicitare τ .

Din analiza rezultatelor obținute s-a constatat că între valorile proprietățile dielectrice obținute prin spectrometrie dielectrică și valorile curbelor curenților de absorbție/resorbție măsurate pe eșantioanele investigate există corelații strânse. Acest lucru indică faptul că elaborarea unei metode de evaluare a stărilor sistemelor de izolație hârtie-ulei pe baza măsurării și prelucrării curbelor curenților de absorbție/resorbție este posibilă.

I. INTRODUCERE

Creșterea siguranței în alimentarea cu energie electrică necesită cunoașterea cât mai exactă a stărilor de funcționare a echipamentelor electrice principale prezente în rețelele de transport și distribuție. În acest sens, diagnosticarea și monitorizarea on-line și off-line a acestora reprezintă un domeniu de cercetare foarte actual. Elaborarea și utilizarea unor noi tehnologii și echipamente capabile să ofere informații precise asupra stărilor de funcționare a componentelor rețelelor electrice permit elaborarea unor strategii coerente de exploatare și întreținere a acestora.

Unele dintre echipamentele cele mai importante care intră în componența rețelelor electrice sunt transformatoarele de putere (TP). Funcționarea în bune condiții a transformatoarelor depinde de starea sistemelor lor de izolație (SITP) alcătuite din produse pe baza de celuloza (hârtia și cartonul electrotehnic) și uleiul mineral (uleiul reprezentând aproximativ 75 – 80 % din întreaga masă a sistemului de izolație) [1]. În timpul exploatării, sistemul de izolație al unui transformator de putere este supus în

permanență solicitărilor electrice, termice, de mediu, etc. Cu cât nivelul de încărcare al unui transformator este mai mare cu atât temperatura acestuia se apropie de limita clasei de izolație a componentelor sistemului de izolație. Printre altele, acest fapt determină intensificarea reacțiilor chimice de degradare a uleiului și hârtiei, rezultând astfel anumiți produși de reacție care înrăutățesc proprietățile dielectrice de ansamblu ale SITP.

Uleiurile minerale folosite în sistemele de izolație ale transformatoarelor sunt amestecuri de hidrocarburi parafinice (alcani), naftenice (cicloalcani) și aromatice [2]. Așa cum se constată în cazul tuturor substanțelor organice, hidrocarburile sunt stabile numai la temperaturi joase. La temperaturi ridicate, se produce ruperea legăturilor carbon-hidrogen și carbon-carbon rezultând hidrogen (H_2), metan (CH_4), acetilenă (C_2H_2), etilenă (C_2H_4), etan (C_2H_6), etc [3]. Pe de altă parte, expunerea uleiurilor la temperaturi înalte în prezența oxigenului favorizează și producerea reacțiilor de oxidare ce conduc la formarea de hidroperoxizi din care rezultă oxizi și cetone care, în final dau naștere la radicali liberi. Astfel, sub acțiunea combinată a căldurii și a oxigenului, uleiurile minerale își schimbă culoarea, rigiditatea dielectrică, rezistivitatea și tensiunea interfacială scad, iar pierderile dielectrice și indicele de aciditate înregistrează creșteri importante [5].

Ca în cazul uleiului mineral, în prezența căldurii și a oxigenului hârtia celulozică suferă un proces complex de degradare, în principal în urma producerii a trei tipuri de reacții chimice: piroliza (rezultând lanțuri moleculare scurte, CO , CO_2 , H_2O și furani), oxidarea (rezultând CO , CO_2 , H_2O și anumiți acizi) și hidroliza (ce are ca efect ruperea lanțurilor macromoleculare). Degradarea hârtiei afectează în primul rând proprietățile mecanice ale acesteia datorită reducerii drastice a gradului de polimerizare. Unul dintre dezavantajele majore ale acestei componente a SITP este higroscopicitatea crescută. La nivel molecular, celuloza (cea mai stabilă componentă a hârtiei) prezintă zone cristaline, rigide, care nu permit pătrunderea apei, dar și zone amorfe care favorizează absorbția apei. Pe de altă parte, așa cum s-a arătat mai sus, pe lângă apa care poate fi absorbită din exterior se adaugă și apa rezultată în urma reacțiilor de degradare. Prezența în structura celulozei a grupărilor $-OH$ și $-CH_2OH$ face astfel ca hârtia să fie foarte vulnerabilă la reacțiile de degradare oxidativă.

În sistemele de izolație ale TP, apa nu este însă localizată numai la nivelul hârtiei. Aceasta se regăsește și în uleiul mineral în trei stări: dizolvată, legată de moleculele de ulei și liberă. În practică, cea mai mare cantitate de apă se găsește în stare dizolvată, iar când umiditatea din ulei depășește valoarea de saturație, apare apa liberă sub formă de picături. Ținând cont de aceste aspecte, rezultă că între starea unui sistem de izolație hârtie-ulei și conținutul de apă din acesta există o strânsă dependență [5].

Evaluarea stării uleiului mineral se face prin mai multe metode printre care analiza gazelor dizolvate, măsurarea tensiunii interfaciale, determinarea concentrației de oxigen, a indicelui de aciditate, a rigidității dielectrice, a factorului de pierderi, etc [2]. Pe de altă parte, determinarea stării hârtiei celulozice, reprezentând componenta solidă a SITP se realizează pe baza determinării gradului de polimerizare, a indicelui de polarizare, a proprietăților dielectrice (factor de pierderi, permitivitate, rigiditate dielectrică, rezistivitate), prin spectroscopie în infraroșu, etc. [6]. Pe baza celor prezentate mai sus, determinarea la un moment dat a stării de ansamblu a unui sistem de izolație hârtie-ulei al unui transformator de putere este posibilă și prin determinarea conținutului de apă rezultată în urma procesului de degradare.

În lucrarea de față sunt prezentate și analizate unele rezultate experimentale referitoare la estimarea stării componentelor SITP pe baza măsurării și prelucrării curbelor de variație a curenților de absorbție/resorbție obținute pe eșantioane de hârtie și ulei mineral îmbătrânite accelerat la $T = 155\text{ }^{\circ}\text{C}$.

II. CONDUȚIA ELECTRICĂ ÎN SITP

Conductivitatea electrică σ a unui material electroizolant este determinată pe baza curentului electric care se stabilește între doi electrozi metalici aflați de o parte și de alta a acestuia și între care se aplică o tensiune electrică U . În funcție de structura fizico-chimică a materialului electroizolant, purtătorii de sarcină pot fi electronii liberi și ionii pozitivi și/sau negativi rezultați prin ionizarea atomilor proprii și/sau de impurități. Adesea, în cazul lichidelor (ca de exemplu uleiul mineral), în procesul de conducție electrică intervin și particulele solide aflate în suspensie.

Experimental se constată că valoarea conductivității electrice a unui lichid impur este întotdeauna mai mare decât valoarea conductivității aceluiași lichid purificat. Purtătorii de sarcină care participă la fenomenul de conducție sunt ionii rezultați în urma procesului de disociere a impurităților din lichid. Fenomenul de disociere a moleculelor de impurități depinde de structura microscopică a lichidului dar și de valoarea temperaturii și a permitivității acestuia [7].

Conductivitatea electrică σ a unui material electroizolant în care se găsesc n specii de purtători de sarcină este exprimată cu ajutorul următoarei relații matematice:

$$\sigma = \sum_{j=1}^n N_j q_j M_j, \quad (1)$$

în care N_j , q_j și M_j reprezintă concentrația, sarcina electrică, respectiv mobilitatea purtătorilor de sarcină de tip j . În cazul conducției ionice, atât în cazul lichidelor cât și în cazul solidelor electroizolante, mobilitatea ionilor din specia j (M_j) se poate exprima cu ajutorul relației [7]:

$$M_j = \frac{K_j \cdot D_j}{T}, \quad (2)$$

în care $D_j = A_j \exp(-B_j/T)$ este coeficientul de difuzie, A_j , B_j și K_j sunt constante corespunzătoare speciei de ioni j și T reprezintă temperatura materialului [7].

Așa cum rezultă din relațiile (1) și (2) creșterea concentrației și a mobilității purtătorilor de sarcină are drept consecință creșterea valorii conductivității electrice. De asemenea, acțiunile câmpului, radiațiile, temperatura, etc. determină modificări sensibile ale mobilității ionilor ceea ce determină variații importante ale valorilor conductivității electrice.

În cazul sistemelor de izolație hârtie-ulei, fenomenul de conducție electrică prezintă unele particularități specifice mediilor bifazice. Conducția predominantă este cea ionică, purtătorii de sarcină provenind atât în urma fenomenului de disociere a impurităților conținute de ulei, cât și în urma proceselor de degradare a hârtiei și uleiului. Mobilitatea ionilor de conducție este sensibil diferită în cele două componente ale izolației, coeficientul de difuzie în ulei fiind superior aceluia din hârtie. De asemenea,

fenomenul de conducție este influențat și de modificările locale ale câmpului electric datorate în principal sarcini electrice separate la interfețele dintre cele două medii.

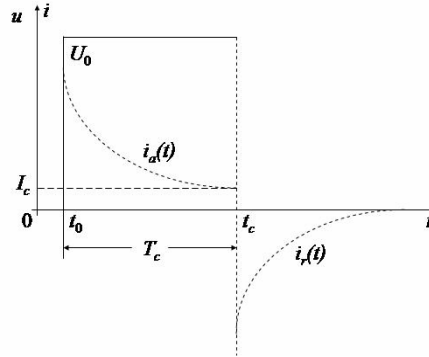


Fig. 1. Variația în timp a curenților de absorbție $i_a(t)$ și de resorbție $i_r(t)$.

Considerând doi electrozi plani între care este dispus un material electroizolant, la aplicarea tensiunii $U_0(t) = U_0\delta(t)$, prin material va trece un curent $i_a(t)$ (Fig. 1) [8]:

$$i_a(t) = i_i(t) + i_p(t) + i_{ss}(t) + i_c(t), \quad (3)$$

în care $i_i(t)$ reprezintă curentul de încărcare al condensatorului, $i_p(t)$ este curentul de polarizare, $i_{ss}(t)$ reprezintă componenta curentului corespunzătoare sarcinii spațiale localizată în material și $i_c(t)$ este curentul de conducție (componenta corespunzătoare regimului permanent) [8].

Dacă la momentul $t = t_c$ cei doi electrozi sunt conectați în scurtcircuit, poate fi măsurat curentul de resorbție $i_r(t)$:

$$i_r(t) = i_d(t) + i_{dp}(t) + i'_{ss}(t), \quad (4)$$

în care $i_d(t)$ este curentul de descărcare al condensatorului, $i_{dp}(t)$ este curentul de depolarizare și $i'_{ss}(t)$ reprezintă curentul corespunzător sarcinii spațiale.

Dacă $i_i(t) = i_d(t)$, $i_p(t) = i_{dp}(t)$ și $i_{ss}(t) = i'_{ss}(t)$, curentul de conducție $i_c(t)$ poate fi exprimat cu ajutorul relației :

$$i_c(t) = i_a(t) - i_r(t) = I_c \quad (5)$$

și conductivitatea electrică a materialului σ_0 poate fi calculată cu ajutorul expresiei:

$$\sigma_0 = \frac{I_c}{U_0} \cdot \frac{d}{S}, \quad (6)$$

în care d este distanța dintre electrozi și S reprezintă aria comună a celor doi electrozi. În general, cum $i_p(t) \neq i_{dp}(t)$ și $i_{ss}(t) \neq i'_{ss}(t)$ conductivitatea este calculată pe baza relației:

$$\sigma_{cc}(t) = \frac{i_a(t) - i_r(t)}{U_0} \cdot \frac{d}{S} \quad (7)$$

și are două componente:

$$\sigma_{cc}(t) = \sigma_0 + \sigma_v(t), \quad (8)$$

în care σ_0 este componenta invariabilă în timp și $\sigma_v(t)$ este componenta variabilă în timp care tinde la zero pentru intervale de timp mari.

În cazul în care între cei doi electrozi se aplică o tensiune variabilă în timp de forma $U(t) = U\sqrt{2} \sin(\omega t)$, se obține conductivitatea complexă $\underline{\sigma}$:

$$\underline{\sigma} = \sigma' + j\sigma'' = \omega\varepsilon_0\varepsilon_r'' + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r' \quad (9)$$

$$\sigma' = \omega\varepsilon_0\varepsilon_r'' \quad (10)$$

$$\sigma'' = \omega\varepsilon_0\varepsilon_r' \quad (11)$$

în care σ' , σ'' , ε_r' și ε_r'' reprezintă părțile reale, respectiv imaginare ale conductivității și permitivității complexe, ω este pulsația tensiunii aplicate și ε_0 reprezintă permitivitatea vidului.

III. EXPERIMENTĂRI

Studiul experimental a fost realizat pe eșantioane de unei mineral NYNAS și carton electrotehnic cu grosimea de 0,5 mm dispuse împreună într-o incintă închisă ermetic. Eșantioanele au fost îmbătrânite termic la temperatura $T = 155$ °C, durata de îmbătrânire τ fiind cuprinsă între 0 și 750 h. Măsurarea curenților de absorbție/resorbție a fost realizată cu ajutorul unui electrometru Keithley 6517 și o celulă de măsură de concepție proprie prevăzută cu electrod de gardă și ecran electromagnetic. Pentru măsurarea curenților de absorbție, între electrozii celulei a fost aplicată tensiunea continuă $U_0 = 300$ V. Durata unei măsurători a fost de 120 min (60 de minute pentru $i_a(t)$ și 60 min pentru $i_r(t)$).

Conductivitatea electrică complexă și permitivitatea relativă complexă pentru fiecare eșantion de ulei și hârtie au fost determinate cu ajutorul unui spectrometru dielectric NOVOCONTROL [1]. În acest caz, tensiunea de măsură a avut valoarea de 1 V în timp ce frecvența câmpului electric a variat între 1 mHz și 10 MHz.

IV. REZULTATE ȘI DISCUȚII

Curbele de variație în timp a curenților de absorbție/resorbție pentru eșantioanele de carton impregnat și ulei mineral sunt prezentate în figurile 2 – 5. Se constată că atât în cazul eșantioanelor de carton cât și în cazul acelor de ulei mineral valorile curenților $i_a(t)/i_r(t)$ cresc odată cu durata de îmbătrânire τ .

Pe baza curbelor $i_a(t)/i_r(t)$ obținute experimental și cu ajutorul relației (7) au fost determinate valorile conductivității electrice a eșantioanelor îmbătrânite termic corespunzătoare intervalelor de timp $t = 60, 600$ și 3600 s de la aplicarea, respectiv, anularea tensiunii U_0 . Curbele de variație a conductivității electrice în curent continuu

(σ_{cc}) în funcție de durata de îmbătrânire termică τ pentru eșantioanele încercate sunt prezentate în figurile 6 și 7.

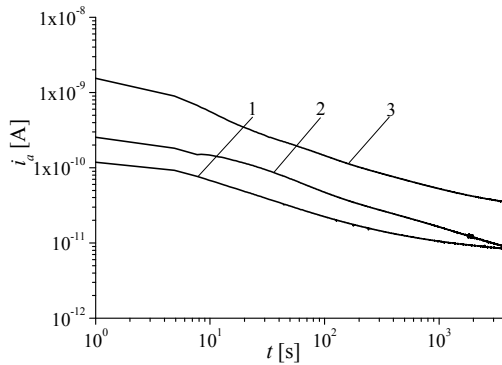


Fig. 2. Variația în timp a curenților de absorbție pentru eșantioane de carton impregnat (1 - $\tau = 0$ h, 2 - $\tau = 450$ h, 3 - $\tau = 750$ h).

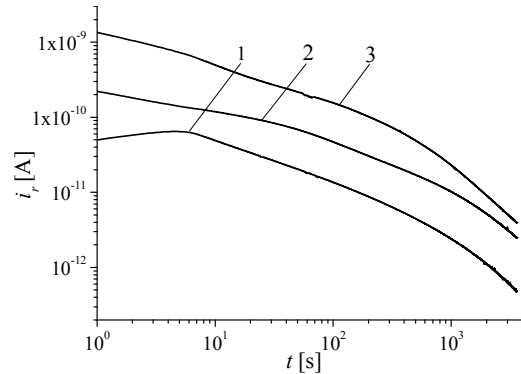


Fig. 3. Variația în timp a curenților de resorbție pentru eșantioane de carton impregnat (1 - $\tau = 0$ h, 2 - $\tau = 450$ h, 3 - $\tau = 750$ h).

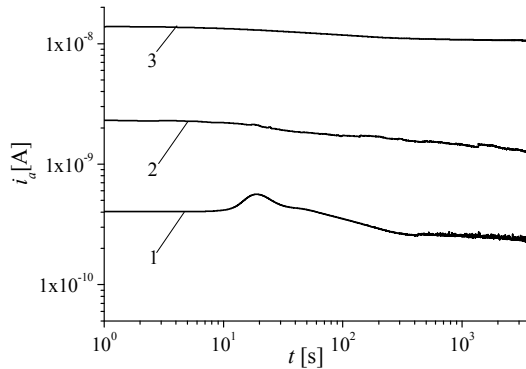


Fig. 4. Variația în timp a curenților de absorbție pentru eșantioane de ulei NYNAS (1 - $\tau = 150$ h, 2 - $\tau = 300$ h, 3 - $\tau = 600$ h).

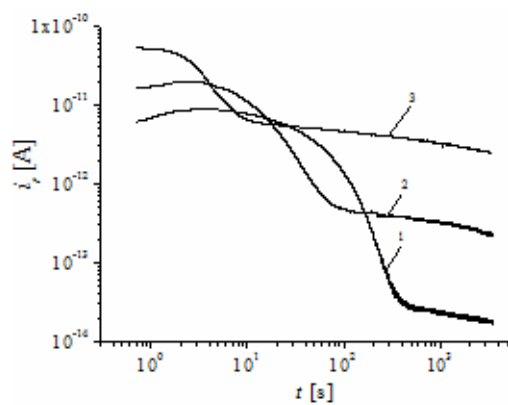


Fig. 5. Variația în timp a curenților de resorbție pentru eșantioane de ulei NYNAS (1 - $\tau = 150$ h, 2 - $\tau = 300$ h, 3 - $\tau = 600$ h).

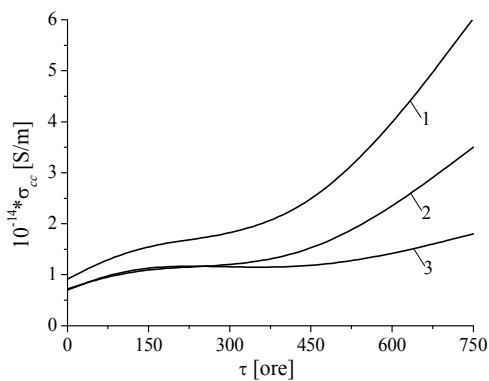


Fig. 6. Variația conductivității electrice σ_{cc} în funcție de durata de îmbătrânire pentru eșantioanele de carton impregnat (1 - $t = 60$ s, 2 - $t = 600$ s, 3 - $t = 3600$ s).

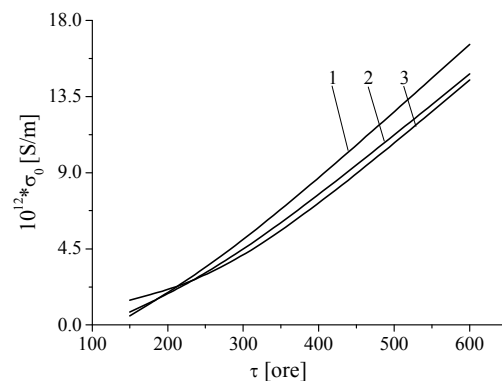


Fig. 7. Variația conductivității electrice σ_{cc} în funcție de durata de îmbătrânire pentru eșantioanele de ulei NYNAS (1 - $t = 60$ s, 2 - $t = 600$ s, 3 - $t = 3600$ s).

Cum era de așteptat, odată cu creșterea duratei de îmbătrânire sunt înregistrate creșteri sensibile ale conductivității electrice în curent continuu pentru ambele componente ale sistemului de izolație, fapt datorat, în principal creșterii concentrației purtătorilor de sarcină.

În figurile 8-11 sunt prezentate variațiile componentelor permitivității și conductivității complexe în funcție de durata de îmbătrânire. Se observă că atât în cazul cartonului cât și în cazul uleiului mineral ϵ_r' , ϵ_r'' , σ' și σ'' înregistrează creșteri sensibile în funcție de τ .

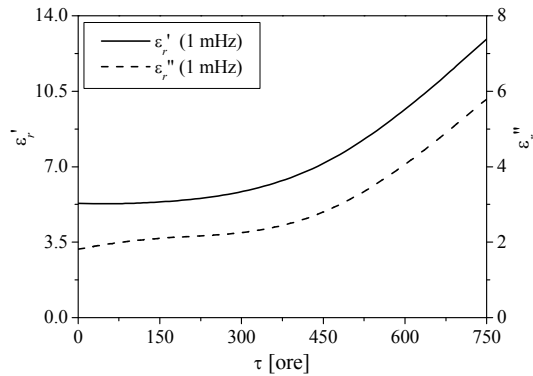


Fig. 8. Variația componentelor permitivității relative complexe a cartonului în funcție de durata de îmbătrânire ($f = 1 \text{ mHz}$, $U = 1 \text{ V}$).

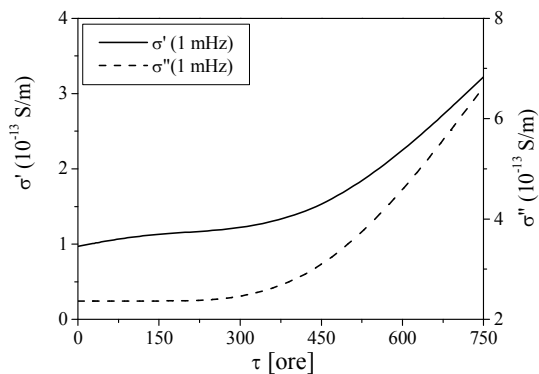


Fig. 9. Variația componentelor conductivității complexe a cartonului în funcție de durata de îmbătrânire ($f = 1 \text{ mHz}$, $U = 1 \text{ V}$).

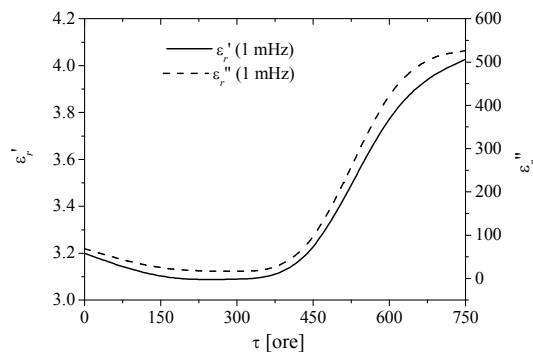


Fig. 10. Variația componentelor permitivității relative complexe a uleiului NYNAS în funcție de durata de îmbătrânire ($f = 1 \text{ mHz}$, $U = 1 \text{ V}$).

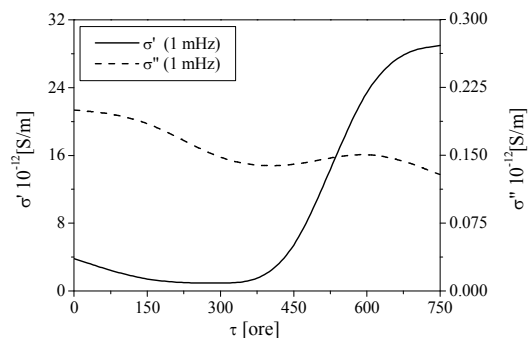


Fig. 11. Variația componentelor conductivității complexe a uleiului NYNAS în funcție de durata de îmbătrânire ($f = 1 \text{ mHz}$, $U = 1 \text{ V}$).

Interpretarea corectă a acestor rezultate în vederea stabilirii stării izolației hârtiei prezintă însă dificultăți importante datorate, mai ales, fenomenelor specifice mediilor bifazice (solid-lichid). Deși uleiul și cartonul sunt supuse împreună aceluiași solicitări termice, datorită structurilor chimice diferite, cinetica reacțiilor de degradare produse la nivelul celor două componente diferă, rezultând astfel produși de reacție cu valori ale mobilității foarte diferite. În esență, ionii, radicalii liberi și moleculele cu dimensiuni reduse pot difuza relativ ușor în și din ulei, fiind prezenți deopotrivă la nivelul celor două componente al sistemului de izolație. Prin urmare, acești produși influențează fenomenele de conducție și polarizare electrică, atât în cazul cartonului cât și al uleiului mineral și deci, pot determina variații importante ale valorilor conductivității σ_{cc} și $\underline{\sigma}$, respectiv

permitivității eșantioanelor studiate așa cum se observă în figurile 6-11. De asemenea, creșterea concentrației purtătorilor de sarcină se datorează și fenomenului de disociere a impurităților prezente în ulei, fenomen favorizat de temperaturile ridicate.

Pe de altă parte, lanțurile macromoleculare fracturate, compușii grei și radicalii liberi cu structură spațială ramificată, foarte puțin mobili, rezultați mai cu seamă în urma reacțiilor de degradare a celulozei sunt cu precădere localizați în componenta solidă a SITP. Mobilitatea extrem de scăzută a acestora face ca influența lor asupra fenomenelor de conducție și polarizare să fie relativ scăzută. Prin urmare, este de așteptat ca formarea acestor produși să nu afecteze proprietățile electrice ale izolației hârtie-ulei (dar să determine înrăutățirea drastică a caracteristicilor mecanice ale hârtiei).

V. CONCLUZII

Rezultatele prezentate demonstrează faptul că atât în cazul hârtiei cât și în cazul uleiului mineral, valorile tuturor factorilor de diagnostic considerați cresc odată cu durata de îmbătrânire termică. Acest lucru indică posibilitatea ca pe baza prelucrării și analizei curbelor de variație a curenților de absorbție/resorbție, să se evalueze stările izolațiilor hârtie-ulei utilizate în cazul transformatoarelor de putere. În plus, în acord cu observațiile făcute, în viitor se urmărește ca determinarea stărilor SITP să se realizeze numai pe baza curenților de absorbție/resorbție măsurați pe eșantioane de ulei mineral. Acest lucru ar oferi posibilitatea monitorizării on-line a izolației transformatoarelor din rețelele de transport și distribuție a energiei electrice.

Mulțumiri

Rezultatele prezentate în lucrare au fost obținute în cadrul Proiectului MIDMIT CNMP 22080/2008 și Programului Operațional Sectorial – Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013, Contract POSDRU 89/1.5/S/62557 și Contract POSDRU 5159.

Bibliografie

- [1] L.V. Badicu, P.V. Notingher, L. M. Dumitran, G. Tanasescu, D. Popa *Use of Dielectric Spectroscopy to Estimate the Condition of Cellulose-Based Insulation*, Journal of Electrical and Electronics Engineering, vol. 2, no. 1, pp 7 – 12, 2009.
- [2] C. D. Nenitescu, *Organic Chemistry*, vol II, Editura Didactica si Pedagogica, Bucharest 1980.
- [3] L. Hamrick *Dissolved Gas Analysis for Transformers* Winter 2009-2010 Neta World.
- [4] T.O. Rouse, *Mineral Oil in Transformer*, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 14, No. 3. pp. 6 – 16, 1998.
- [5] Y. Du, M. Zhan, B.C. Lesieutre, A.V. Mamishev and S.R. Lindgren, *Moisture Equilibrium in transformer Paper-Oil Systems*, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 15, No. 1. pp. 11 – 20, 1999.
- [6] T. K. Saha, *Review of Modern Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers*, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 10, No. 5. pp. 903 – 917, 2003.
- [7] P.V. Notingher, *Materiale* Bucuresti, Romania, Pintech, 2002.
- [8] A. Bouaicha, and I. Fofana, *Dielectric Spectroscopy Techniques as Quality Control Tool: A Feasibility Study*, IEEE Electrical Insulating Magazine, vol. 25, no. 1, pp. 6 – 14, 2009.