

## Etapa 4: Demonstrarea funcționalității și utilității modelului de tehnologie de investigare a izolației bazată pe spectroscopia dielectrică

### Introducere

Spectroscopia dielectrică se bazează pe interacțiunea dintre câmpul electric  $E$ , polarizarea  $P$  și proprietățile materialului dielectric studiat caracterizate de susceptivitatea  $\chi$ :

$$\underline{P} = \chi \epsilon_0 \underline{E} \quad (1)$$

Susceptivitatea electrică a materialului  $\chi$  este o mărime adimensională care cumulează toate tipurile de procese de polarizare din dielectric.

În cazul unui material dielectric izotrop inducția electrică  $D$  este descrisă de ecuația (1):

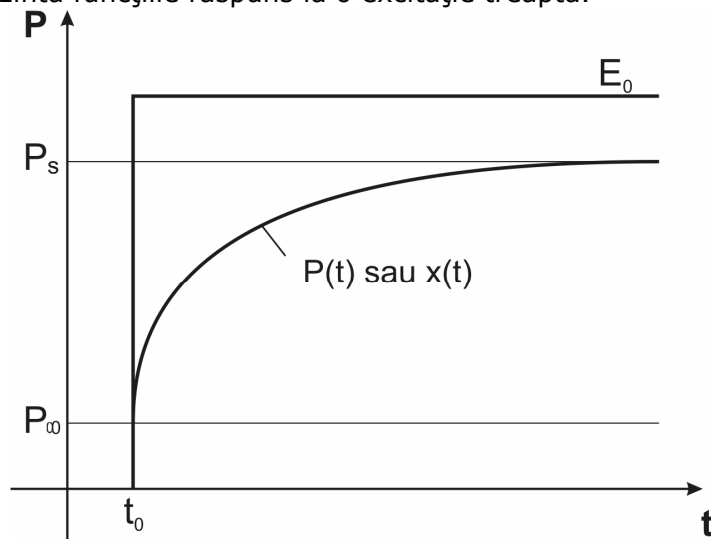
$$\underline{D}(t) = \epsilon_0 \underline{E}(t) + \underline{P}(t) = \epsilon_0 (1 + \chi) \underline{E}(t) \quad (2)$$

De remarcat este faptul că dependența de timp a vectorului polarizație nu este atât de lungă comparativ cu a vectorului câmp electric. Cu alte cuvinte diferitele procese de polarizare au diferite întârzieri raportate la momentul apariției câmpului electric.

În Fig. 1 este prezentat procesul de polarizare în domeniul timp, care, conform ecuației (1) poate fi descris de expresia:

$$\frac{P(t)}{E_0} = \epsilon_0 \chi(t) l(t) \quad (3)$$

unde  $\chi(t)$  și  $P(t)$  reprezintă funcțiile răspuns la o excitație treaptă.



**Fig.1.** Polarizarea unui dielectric sub acțiunea unui câmp electric treaptă

Notațiile din Fig. 1 au următoarea semnificație:  $P_\infty$  este polarizarea instantanee care include nu numai polarizarea electronică dar și alte procese de polarizare, foarte rapide.

Toate procesele de polarizare se stabilizează după un anumit timp la o mărime care devine polarizarea "statică":  $P_s$ .

Conform cu fig. 1 fenomenul de polarizare poate fi descris de expresia:

$$\underline{P}(t) = P_{\infty} + (P_s - P_{\infty})g(t - t_0) \quad (4)$$

unde  $g(t)$  este o funcție monoton crescătoare.

Relația (3) poate fi atunci scrisă după cum urmează:

$$\underline{P}(t) = \varepsilon_0 [\chi_{\infty} + (\chi_s - \chi_{\infty})g(t - t_0)]E_0 \quad (5)$$

Dacă introducem permitivitatea relativă  $\varepsilon = 1 + \chi$  obținem:

$$\underline{P}(t) = \varepsilon_0 [(\varepsilon_{\infty} - 1) + (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})g(t - t_0)]E_0 \quad (6)$$

Pentru a obține o relație care să descrie variația în timp a vectorului polarizare în funcție de variația în timp a vectorului câmp electric, indiferent de tipul acestei variații, se va folosi integrala Duhamel:

$$\underline{P}(t) = \varepsilon_0 \chi_{\infty} \underline{E}(t) + \varepsilon_0 \int_{-\infty}^t f(t - \tau) \underline{E}(\tau) d\tau \quad (7)$$

unde  $f(t)$  este funcția răspuns al dielectricului

$$f(t) = (\chi_s - \chi_{\infty}) \frac{\partial g(t)}{\partial t} = (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) \frac{\partial g(t)}{\partial t} \quad (8)$$

Din relația (8) se observă că  $f(t)$  este o funcție monoton descrescătoare cu dimensiunea  $1/s$  iar amplitudinea ei este legată de  $C_0$ , capacitatea geometrică a sandwich-ului format de dielectric.

Pentru analiza în domeniul frecvență  $C_0$  este capacitatea "de înaltă frecvență" a dielectricului măsurată la momentul  $t_0$  când a început măsurarea curentului.

În conformitate cu legea lui Maxwell densitatea de curent este dată de relația:

$$\underline{j}(t) = \sigma_0 \underline{E}(t) + \frac{\partial \underline{D}(t)}{\partial t} = \sigma_0 \underline{E}(t) + \varepsilon_0 \frac{\partial \underline{E}(t)}{\partial t} + \frac{\partial \underline{P}(t)}{\partial t} \quad (9)$$

Traslația din domeniul timp în domeniul frecvență poate fi făcută prin rescrierea ecuațiilor (7) și (9) folosind Transformata Laplace sau Transformata Fourier:

$$\underline{j}(p) = \sigma_0 \underline{E}(p) + \varepsilon_0 p \underline{E}(p) + \varepsilon_0 p F(p) \underline{E}(p) \quad (10)$$

pentru  $p = i\omega$  rezultă:

$$\underline{j}(\omega) = \underline{E}(\omega) [\sigma_0 + i\omega \varepsilon_0 (1 + F(\omega))] \quad (11)$$

unde  $\underline{E}(\omega)$  reprezintă Transformata Fourier a funcției răspuns dielectric  $f(t)$  sau susceptivitatea complexă.

$$\underline{\chi}(\omega) = F(\omega) = \chi'(\omega) - i\chi''(\omega) \quad (12)$$

Din ecuația (11) rezultă expresia în domeniul frecvență a densității de curent:

$$\underline{j}(\omega) = \left\{ \sigma_0 + \varepsilon_0 \omega \chi''(\omega) + i \omega \varepsilon_0 [1 + \chi'(\omega)] \right\} \underline{E}(\omega) \quad (13)$$

De remarcat că la o analiză în domeniul frecvență instrumentele folosite nu pot face o discriminare între contribuția în curent a conductivității în curent continuu  $\sigma_0$  și aceea adusă de pierderile dielectrice  $\chi''(\omega)$ .

Aceasta înseamnă că permitivitatea dielectrică relativă măsurată  $\underline{\varepsilon}_{rm}$  este diferită de permitivitatea relativă dată de expresia:

$$\underline{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) = [1 + \chi'(\omega)] - i\chi''(\omega) \quad (14)$$

Permitivitatea relativă măsurată  $\underline{\varepsilon}_{rm}$  are expresia:

$$\underline{\varepsilon}_{rm}(\omega) = \varepsilon'_{rm}(\omega) - i\varepsilon''_{rm}(\omega) = \varepsilon'_{rm}(\omega) - i \left[ \varepsilon''(\omega) + \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega} \right] \quad (15)$$

Partea reală a ecuației (15) reprezintă capacitatea obiectului încercat în timp ce partea imaginară reprezintă pierderile dielectrice și deci:

$$\tan \delta(\omega) = \frac{\varepsilon''_{rm}(\omega)}{\varepsilon'_{rm}(\omega)} = \frac{\varepsilon''_{rm}(\omega) + \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega}}{\varepsilon'_{rm}(\omega)} \quad (16)$$

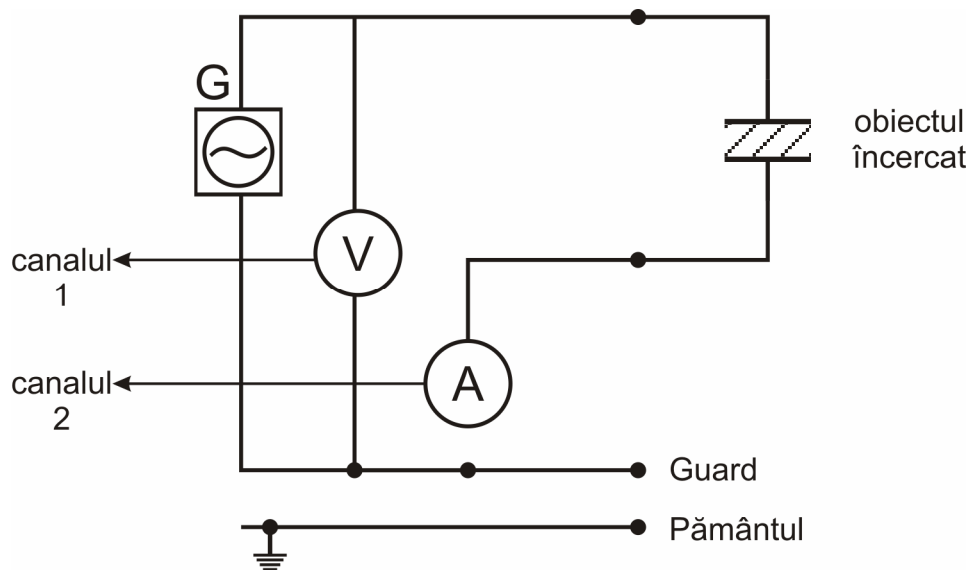
Din relația (16) rezultă că ambii termeni care prin raportul lor definesc  $\tan \delta$  sunt dependenți de frecvență ceea ce denotă că evaluarea stării izolației dielectrice a echipamentelor de înaltă tensiune folosind numai rezultatul măsurării  $\tan \delta$  la frecvența industrială nu aduce suficiente informații referitoare la gradul de îmbătrânire termică și electrică sau a conținutului de apă din izolație.

### **Tehnica de măsurare și prelucrare a rezultatelor aplicând spectroscopia dielectrică în domeniul frecvență**

Tehnica de măsurare este o generalizare a măsurării capacității și factorului de pierderi ( $\tan \delta$ ) la frecvență industrială (50/ 60 Hz). Diferența este că se execută mai multe măsurări la diferite frecvențe în locul unei singure măsurări la o frecvență fixă.

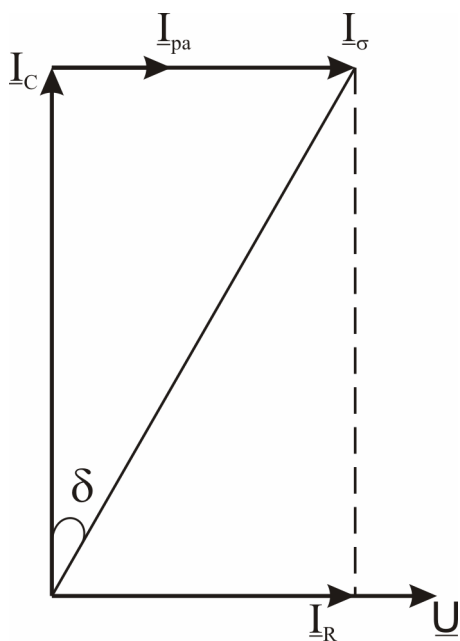
Principiul metodei poate fi descris astfel: o unitate de procesare a unui semnal digital generează o tensiune sinusoidală cu o frecvență dorită. Acest semnal este amplificat de către un amplificator intern și apoi este aplicat obiectului investigat. Tensiunea aplicată, curentul prin obiect și defazajul între cele două mărimi sunt măsurate cu mare precizie.

Schema electrică a circuitului de măsurare este prezentată în Fig. 2 unde: G este un generator de tensiune de 100 V cu frecvență variabilă discret în domeniul 0,1 mHz – 1 kHz.



**Fig.2.** Diagrama bloc a echipamentului pentru spectroscopia în domeniul frecvenței

Defazajul între tensiune și curent se determină din înregistrarea în timp a celor două mărimi (Fig. 3).



- $\underline{U}$  - tensiunea aplicată dielectricului;
- $\underline{I}_R$  - componenta activă a curentului prin dielectric;
- $\underline{I}_{pa}$  - curentul de polarizare activ;
- $\underline{I}_\sigma$  - curentul de scurgere prin conductibilitate;
- $\underline{I}_C$  - componenta capacitivă a curentului prin dielectric;
- $\delta$  - unghiul de pierderi dielectrice

**Fig.3.** Diagrama vectorială a curenților într-un dielectric supus unei tensiuni alternative

În etapa anterioară a fost realizată o bază de date care cuprinde curbele etalon ale  $\tan\delta(f)$  pentru izolația hârtie-ulei aflată în următoarele condiții:

- Izolație nouă cu diferite conținuturi de umiditate (0,5; 1; 2; 3 și 4% din greutatea inițială în stare uscată). Măsurările au fost executate pentru fiecare conținut de umiditate la temperaturile: 50, 80, 90 și 120°C;
- Izolație îmbătrânită termic la temperaturile de 80, 90, 110, 135°C și conținuturi de umiditate de 0,5; 1; 2; 3 și 4%. Măsurările au fost executate la temperaturile de 50, 80, 90 și 120°C.

Aceste investigații au fost realizate în cadrul Laboratorului de Materiale Electrotehnice al ICMET Craiova.

Pentru a facilita și a aduce un aport de precizie în compararea curbelor etalon de variație a  $\tan\delta$  funcție de frecvență cu curbele obținute din măsurarea răspunsului dielectric în domeniul frecvență de la transformatoarele de putere și măsură au fost create curbe etalon intermediare. În literatura de specialitate este folosită pentru aproximare expresia Havriliak – Negami pentru  $\epsilon'_{rm}$ :

$$\epsilon'_{rm} = A\omega^{-n} + \epsilon_{\infty} + R_e((\epsilon_s - \epsilon_{\infty})(1 + i\omega\tau)^{1-\alpha})^{-\beta} \quad (17)$$

și transformata Kramers – Kronig a expresiei Havriliak – Negami pentru  $\epsilon''_{rm}$ :

$$\epsilon''_{rm} = A\omega^{-n} \cot\left((1-n)\frac{\pi}{2}\right) + I_m((\epsilon_s - \epsilon_{\infty})(1 + i\omega\tau)^{1-\alpha})^{-\beta} + \frac{\sigma_{DC}}{\epsilon_0\omega} \quad (18)$$

Parametrii  $A$ ,  $n$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\tau$  și  $\epsilon_s$  fiind determinați folosind tehnica celor mai mici pătrate pentru aproximarea curbei virtuale cu curbele permitivităților măsurate, vecine cu cea care s-a obținut prin calcul.

$\epsilon_{\infty}$  a fost evaluată ca fiind valoarea permitivității la cea mai mare frecvență măsurată.

Curbele virtuale  $\tan\delta(f)$  pentru diferite conținuturi de umiditate și la temperaturi diferite, nedeterminate prin măsurări directe, au fost calculate în cadrul proiectului după procedura descrisă în Anexa 1.

### **Determinarea conținutului de umiditate din izolația echipamentelor cu geometrie simplă**

Sistemele de izolație folosite la echipamentele electrotehnice de tensiune înaltă diferă prin modul de aranjare a diferitelor materiale dielectrice și prin dimensiunile acestora. Am considerat că transformatoarele de măsură și cablurile de medie și înaltă tensiune se încadrează în categoria echipamentelor cu geometrie simplă pentru că distribuția câmpului electric se realizează într-un sistem de izolație omogen cu conductivitate nenulă, dar liniar, izotrop și fără polarizație electrică permanentă.

Curbele etalon pentru sistemul de izolație hârtie-ulei propriu transformatoarelor de măsură au fost determinate folosind materialele utilizate în mod curent de Divizia Aparataj a S.C. Electroputere Craiova.

Curbele etalon pentru sistemul de izolație a cablurilor de medie tensiune constând din materialul XLPE au fost determinate folosind eșantioane de izolație puse la dispoziție de firmele IPROEB Bistrița și Holding Kablovi Jagodina din Serbia.

Investigația în domeniul frecvență poate fi înțeleasă mai ușor dacă stabilim relația între curentul sinusoidal măsurat  $\underline{I}(\omega)$  și tensiunea sinusoidală măsurată  $\underline{U}(\omega)$ :

$$\underline{I}(\omega) = i\omega\underline{C}(\omega)\underline{U}(\omega) \quad (19)$$

unde  $\underline{C}(\omega)$  este capacitatea complexă:

$$\underline{C}(\omega) = C'(\omega) - iC''(\omega) \quad (20)$$

Conform fig. 3 rezultă:

$$\underline{I}_c = \omega\epsilon'_{rm}(\omega)C_0\underline{U} \text{ unde } C'(\omega) = \epsilon'_{rm}(\omega)C_0 \quad (21)$$

și

$$I_R = \omega(\varepsilon_{rm}''(\omega) + \frac{\tau_0}{\varepsilon_0\omega})C_0U \text{ unde } C''(\omega) = (\varepsilon_{rm}''(\omega) + \frac{\tau_0}{\varepsilon_0\omega})C_0 \quad (22)$$

În relațiile (21) și (22)  $C_0$  reprezintă capacitatea geometrică în vid a obiectului încercat iar  $\tau_0$  reprezintă conductivitatea obiectului încercat.

Rezultă o nouă expresie pentru factorul de pierderi dielectrice  $\tan\delta(\omega)$ :

$$\tan \delta(\omega) = \frac{I_R}{I_C} = \frac{\omega C''(\omega)U}{\omega C'(\omega)U} = \frac{C''(\omega)}{C'(\omega)} \quad (23)$$

Considerăm că momentul inițial al măsurării este acela în care se aplică o tensiune sinusoidală de frecvență mare (1kHz). În acest moment nu există fenomenul de polarizare și curentul măsurat  $I$  este dat de expresia:

$$I = \omega C_0 U \text{ din care rezultă } C_0 = \frac{I}{\omega U} \quad (24)$$

unde  $U = 100 \text{ V}$  și  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot 1000 \text{ [rad/ s]}$

Pentru oricare frecvență  $f_i = \frac{\omega_i}{2\pi}$  în care avem măsurate mărimile  $U_i$ ,  $I_i$  și  $\delta_i$  rezultă:

$$I_{c_i} = I_i \cos \delta_i = \varepsilon_{rm}'(\omega_i)C_0U \quad (25)$$

$$\varepsilon_{rm_i}' = \frac{I_i \cos \delta_i}{C_0U} \quad (26)$$

$$I_{R_i} = I_i \sin \delta_i = (\varepsilon_{rm}''(\omega_i) + \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0\omega_i})C_0U \quad (27)$$

$$\varepsilon_{rm_i}'' = \frac{I_i \sin \delta_i}{C_0U} - \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0\omega_i} \quad (28)$$

După finalizarea măsurărilor pe întregul domeniu de frecvență pentru compararea cu curbele etalon similare ale lui  $\varepsilon_{rm_i}'(\omega)$  și  $\varepsilon_{rm_i}''(\omega)$  este necesară corecția acestora cu factorul

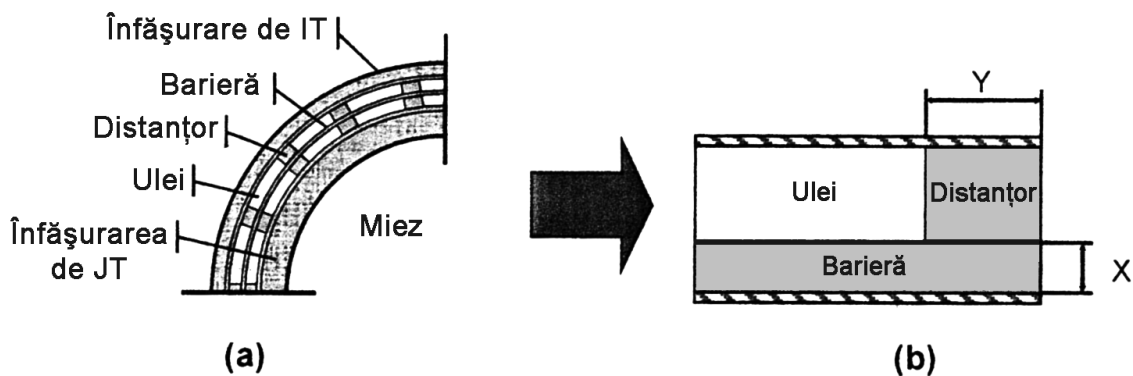
$k = \frac{C_0}{C_{etalon}}$ ,  $C_0$  este capacitatea în vid a obiectului încercat iar  $C_{etalon}$  este capacitatea în vid a

celulei de măsurare, se trasează curba  $\tan\delta$  funcție de frecvență:  $\tan \delta_i = \frac{\varepsilon_{rm_i}''}{\varepsilon_{rm_i}'}$ .

După măsurarea temperaturii sistemului de izolație la care au fost efectuate măsurările se caută în baza de date pentru temperatura declarată curba etalon care aproximează cel mai bine curba măsurată. Curba etalon indică conținutul de umiditate al sistemului de izolație investigat.

## Determinarea conținutului de umiditate din izolația transformatoarelor de putere

Transformatoarele de putere au un sistem de izolație complex compus din bariere, distanțori, izolația de hârtie a conductorilor și ulei (v. Fig. 4).



**Fig.4.** Structura de bază a sistemului de izolație a unui transformator  
a) secțiunea transversală; b) reprezentarea X-Y

Evaluarea cantității de umiditate localizată în izolația solidă a transformatorului poate fi obținută folosind așa numitul model X-Y care reprezintă volumul părților care constituie sistemul de izolație.

Izolația unui transformator constă din cilindrii concentrici din pressboard impregnat cu ulei și distanțori axiali.

Pentru simplificarea geometriei complexe a izolației transformatorului aceasta este redusă la doi parametri măsurabili și anume:

$$X = \frac{\text{grosimea totală a barierelor}}{\text{lățimea canalelor de răcire}} \qquad Y = \frac{\text{lățimea totală a distanțorilor}}{\text{lungimea canalelor de răcire}}$$

X și Y au valori în domeniul 0,2 – 0,5 respectiv 0,15 – 0,25.

În lucrarea „A Fast and Reliable Dielectric Diagnostic Method to Determine Moisture in Power Transformers. Intern.Conf. on Condition Monitoring and Diagnostics, CMD 2008, Beijing, April 21+24, 2008, paper no. 143” este descris așa numitul “Pancake Model” implementat în software-ul a trei echipamente comercializate pentru măsurarea conținutului de apă din izolația solidă a transformatoarelor în care sunt date valorile lui X și Y pentru diferite configurații geometrice ale transformatoarelor.

În cadrul proiectului au fost analizate proiectele a șapte transformatoare de putere realizate pentru firmele Electroputere și Retrasib. Proiectele au fost alese pentru transformatoarele care sunt sau urmează să fie implementate în Sistemul Energetic Național.

Pentru realizarea modelului X – Y s-au ales ca parametri rapoartele:

$$X = \frac{\text{greutatea izolației masive}}{\text{greutatea uleiului}} \qquad Y = \frac{\text{greutatea distanțorilor}}{\text{greutatea uleiului}}$$

Pentru realizarea modelului X – Y s-a ținut seama de inerția de migrare a umidității din izolația solidă din sau înspre ulei, în funcție de temperatură. În fazele anterioare au fost executate experimentări din care a rezultat că umiditatea din izolația solidă (izolația de hârtie a conductoarelor, cilindrii din pressboard, distanțori, piesele de presare a bobinelor) este dată de piesele masive de izolație a transformatorului pentru că au o inerție mărită în absorbția de umiditate când temperatura scade dar și de cedare a ei către ulei când temperatura crește.

În tabelul următor sunt date mărimile lui X și Y pentru diferite tipuri de transformatoare.

Tip transformator	X	Y
40 MVA, 110/ 20 kV	0,0972	0,0158
200/ 200/ 60 MVA, 231/ 121/ 10.5 kV	0,1028	0,0158
339 MVA, 400/ 17 kV	0,1144	0,0153

Prin introducerea parametrilor X și Y care se referă la geometria transformatorului permitivitatea sistemului de izolație  $\underline{\varepsilon}_{tot}$  are expresia:

$$\underline{\varepsilon}_{tot} = \frac{1-Y}{\frac{1-X}{\underline{\varepsilon}_{ulei}} + \frac{X}{\underline{\varepsilon}_{rm}}} + Y\underline{\varepsilon}_{rm} \quad (29)$$

în care:

$$\underline{\varepsilon}_{ulei} = 2,2 - i \frac{\sigma_{ulei}}{\varepsilon_0 \omega} \quad (30)$$

Tehnica de determinare a conținutului de umiditate este aceeași ca în cazul izolației simple.

Pentru fiecare frecvență se determină  $\varepsilon'_{rm}$  și  $\varepsilon''_{rm}$  și în final se determină  $\varepsilon'_{total}$  ca parte reală a lui  $\underline{\varepsilon}_{total}$  și  $\varepsilon''_{total}$  ca parte imaginară.

Prin raportarea lui  $\varepsilon''_{total}$  la  $\varepsilon'_{total}$  pentru fiecare frecvență se determină  $\tan\delta$  în funcție de frecvență. Curba obținută prin măsurare se compară cu curbele etalon din baza de date luând ca parametru de identificare temperatura sistemului de izolație la care s-a făcut măsurarea. Curba etalon cea mai apropiată ca formă de cea rezultată din măsurare va da conținutul de apă din izolația solidă.

### **Considerații despre evaluarea conținutului de umiditate prin folosirea analizei în frecvență a răspunsului dielectricului**

În procesul de evaluare a stării funcționale a transformatoarelor de putere și măsură precum și a cablurilor electrice măsurările clasice, periodice executate până în prezent nu permit proprietarilor trecerea la alt tip de mentenanță și anume la aceea bazată pe fiabilitate. Din motive economice și organizatorice mentenanța de tip periodic se dorește să fie înlocuită cu alt tip de mentenanță care să permită concentrarea activităților de evaluare a funcționării echipamentelor numai pe echipamentele la care au fost identificate deficiențe. Până în prezent se execută măsurări de rutină pentru verificarea rezistenței de izolație, rigiditatea dielectrică a uleiului, factorul de polarizare și factorul de pierderi dielectrice la frecvență industrială.

Dezvoltarea tehnicii de măsurare a permis integrarea în programul de evaluare a următoarelor încercări:

- a) Analiza gazelor dizolvate (DGA) în ulei care permite identificarea disfuncționalității sistemului de izolație;
- b) Analiza răspunsului în frecvență (FRA) care permite identificarea defectelor referitoare la geometria bobinelor și a legăturilor din interiorul transformatorului;
- c) Măsurarea descărcărilor parțiale care permite identificarea descărcărilor electrice de mică sau mare energie din izolație, ecrane, miez.

Pentru o diagnosticare corectă a defectului este necesar un mijloc de măsurare a umidității din izolația solidă deoarece un conținut ridicat de apă reduce drastic durata de viață a transformatorului sau cablului. Din păcate un mijloc de măsurare direct nu există și din acest motiv au fost dezvoltate metode de măsurare indirecte cum este și analiza răspunsului dielectricului în frecvență.

Proiectul a fost propus pentru perfecționarea tehnicii de măsurare existente în scopul înțelegerii software-urilor comerciale aflate pe piață și realizarea unui software personalizat pentru echipamentele realizate de firmele românești: Electroputere Craiova, Retrasib Sibiu și IPROEB Bistrița.

În acest scop au fost făcute măsurări în laborator pe eșantioane de izolație folosită curent de firmele amintite. Curbele etalon obținute au particularități față de cele prezentate în lucrările „Frequency Response of Oil Impregnated Pressboard and Paper Samples for Estimating Moisture

in Transformer Insulation, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, No. 3, July 2006, pp. 1309-1317” și „Insulation diagnosis by polarization and depolarization current measurements. 13<sup>th</sup> Int.Symp. on High Voltage Engineering, ISH 03, Deft, 2003”. De asemenea față de software-urile existente, unde măsurile X și Y practic sunt alese fără o bază reală, în modelul de calcul realizat acestea sunt alese pe baza proiectelor transformatoarelor expertizate.

Aproximațiile introduse în evaluarea conținutului de umiditate ne conduce la concluzia că rezultatul are o plajă de eroare de  $\pm 5\%$ . Acest lucru a fost făcut cunoscut specialiștilor de la Transelectrica, Electrica, Centrala Nucleară Cernavodă, etc. pentru a nu lua decizii numai din această măsurare și de a o corela cu rezultatele măsurării descărcărilor parțiale care evidențiază prin mărirea și localizarea lor față de tensiunea înaltă dacă izolația este sau nu umedă.

Evaluarea rezultatelor acestei măsurări trebuie executată de către un specialist pentru a identifica dacă:

- a) izolația solidă este umedă;
- b) izolația solidă este îmbătrânită termic;
- c) uleiul este îmbătrânit;
- d) uleiul are particole.

Acest lucru este necesar pentru că prin software nu se poate face o comparare perfectă între curbele măsurate și curbele existente în baza de date. Această comparare trebuie să fie sub controlul unui specialist. Acesta este un motiv în plus pentru implementarea în cunoștință de cauză a acestei metode de evaluare.

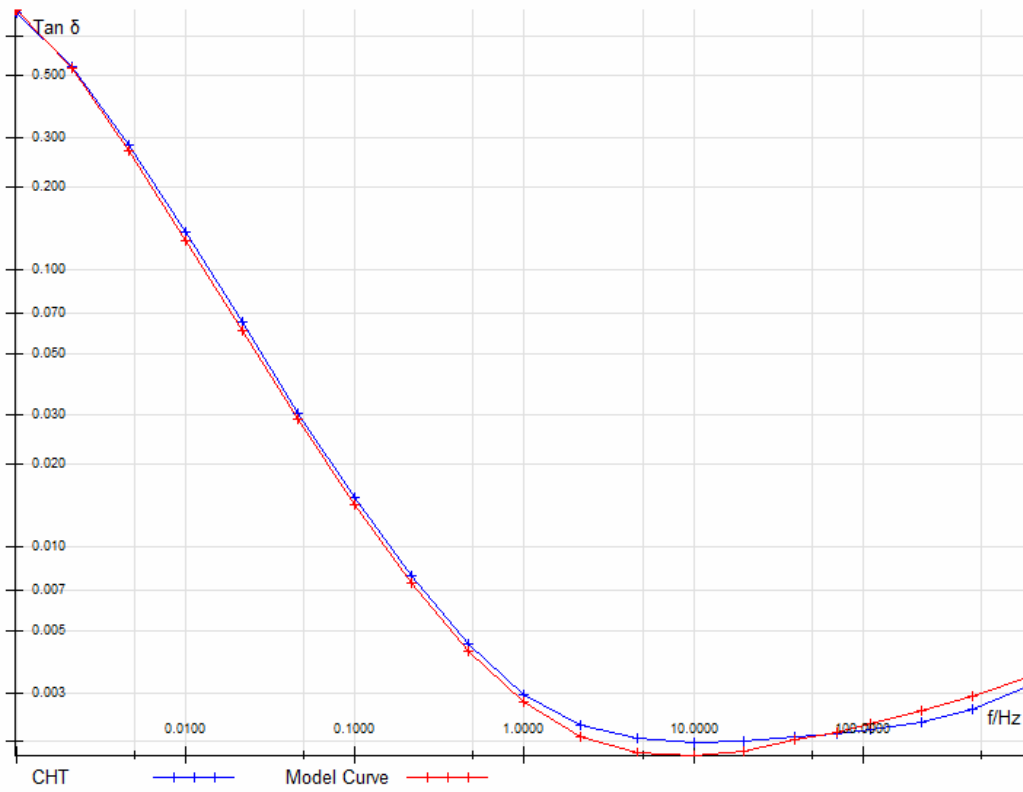
Din păcate pentru specialiștii implicați în procesul de diagnosticare și din fericire pentru cei care comercializează astfel de echipamente rezultatele metodei nu pot fi controlate printr-un proces obiectiv.

În cadrul proiectului am implementat izolație solidă (pressboard) într-un autotransformator de 200 MVA știind că el va fi expertizat după 3 ani. Autotransformatorul a funcționat în stația electrică a Centralei Termoelectrice de la Ișalnița. Am recuperat mostrele de pressboard pe care le-am adus în laborator într-un vas etanș cu ulei cu umiditatea de 0,3%. Am determinat umiditatea pressboardului prin metoda coulometrică Karl – Fisher și a rezultat 2,5%. Măsurările executate anterior deschiderii ferestrei autotransformatorului pentru recuperarea mostrelor au indicat o umiditate de 0,7% în izolația solidă a autotransformatorului. Este posibil ca eșantionul să fi fost infectat cu umiditate în timpul care a trecut de la recuperare și până la introducerea în aparatul Karl – Fisher pentru titrare.

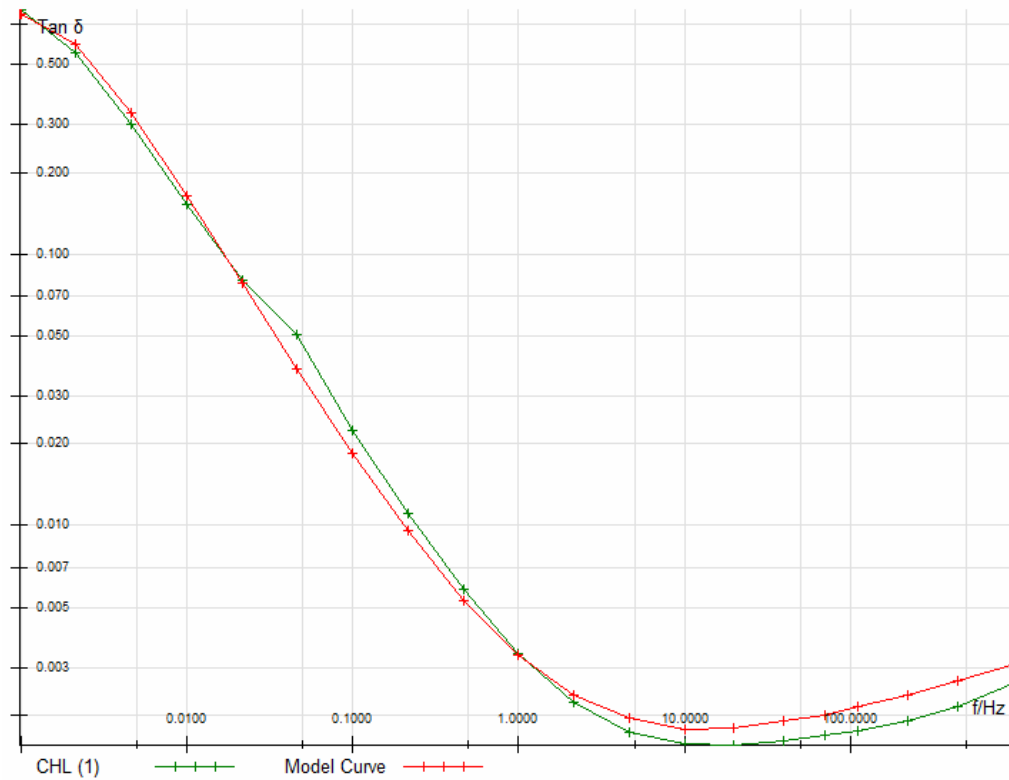
## **Executarea de măsurări spectroscopice pe transformatoare**

În cadrul proiectului au fost executate numeroase experimentări în Laboratorul de Înaltă Tensiune al ICMET pentru “finisarea” programului de apreciere a umidității din izolația solidă a transformatoarelor de putere. Deoarece nu există o metodă de referință, obiectivă, care să valideze rezultatele programului de apreciere a umidității în prima etapa s-au făcut comparații între mărirea  $\tan\delta$  obținută prin metoda descrisă în capitolele anterioare pentru frecvența de 50 Hz și cea obținută prin măsurarea acesteia cu o punte clasică Schering folosind echipamente ale firmelor Megger și Siemens. Au fost corectate curbele etalon calculate până s-a obținut o identitate a măsurărilor până la a patra cifră semnificativă, pentru  $\tan\delta$  la 50 Hz.

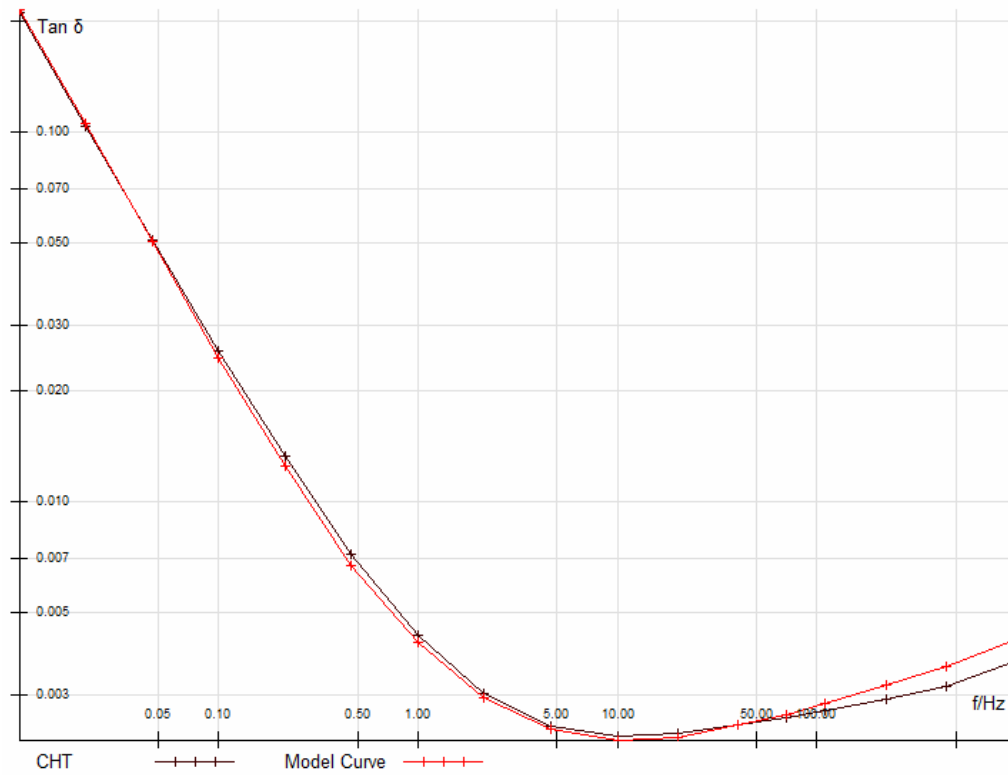
În etapa următoare au fost executate măsurări pe transformatoare noi ale firmelor Electroputere și Retrasib (v. Fig. 5, 6, 7 și 8). Aceste măsurări s-au executat la sediul firmelor respective după finalizarea procesului tehnologic de formare a izolației și înainte de începerea încercărilor de tip. Din analiza rezultatelor referitoare la umiditatea din izolația solidă se constată un plus la transformatoarele Retrasib care au beneficiat de o instalație nouă de uscarea a izolației cu vapori de cherosen. Instalația similară a firmei Electroputere se află în funcțiune de peste 30 ani și nu beneficiază de sisteme moderne de monitorizare și conducere automată a procesului de uscarea.



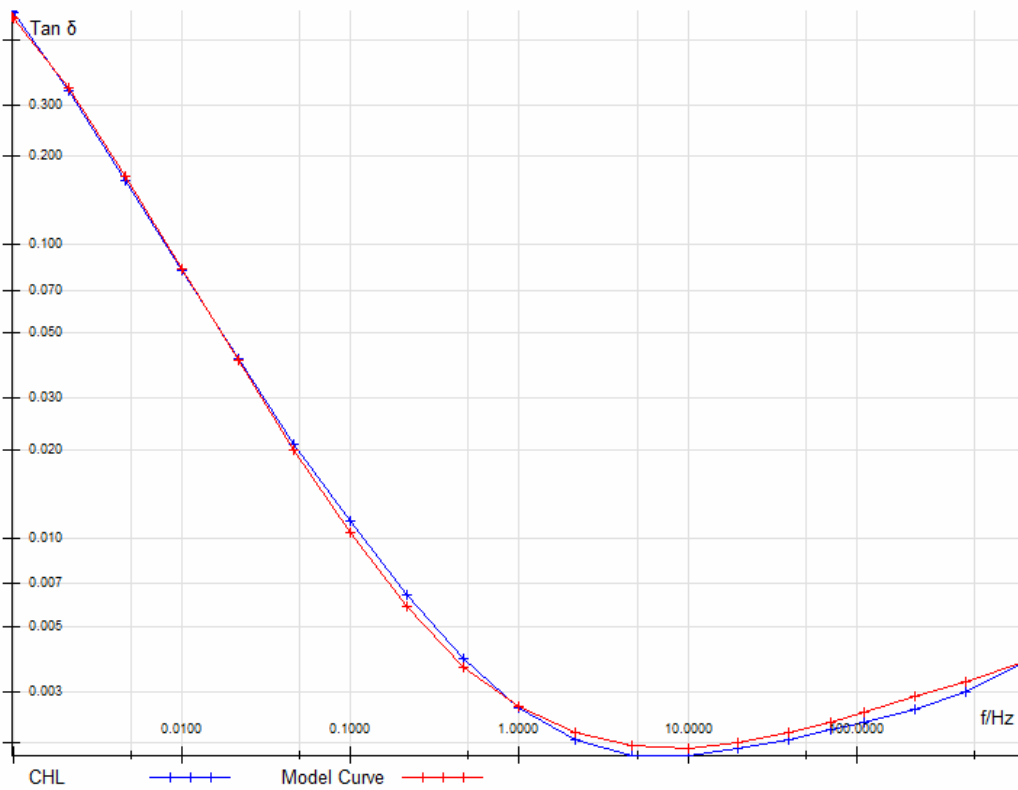
**Fig. 5.** Măsurarea umidității la transformatorul 200 MVA al RETRASIB Sibiu  
Umiditate=0.3% între înfășurările IT - JT



**Fig. 6.** Măsurarea umidității la transformatorul 400 MVA al RETRASIB Sibiu  
Umiditate=0.3% între înfășurările IT - JT

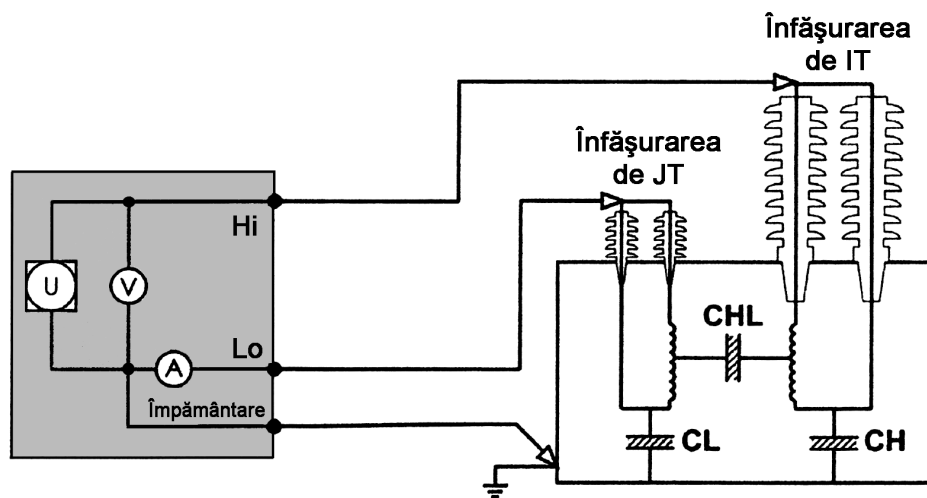


**Fig. 7.** Măsurarea umidității la transformatorul 200 MVA al ELECTROPUTERE Craiova  
Umiditate=0.5% între înfășurările IT - JT

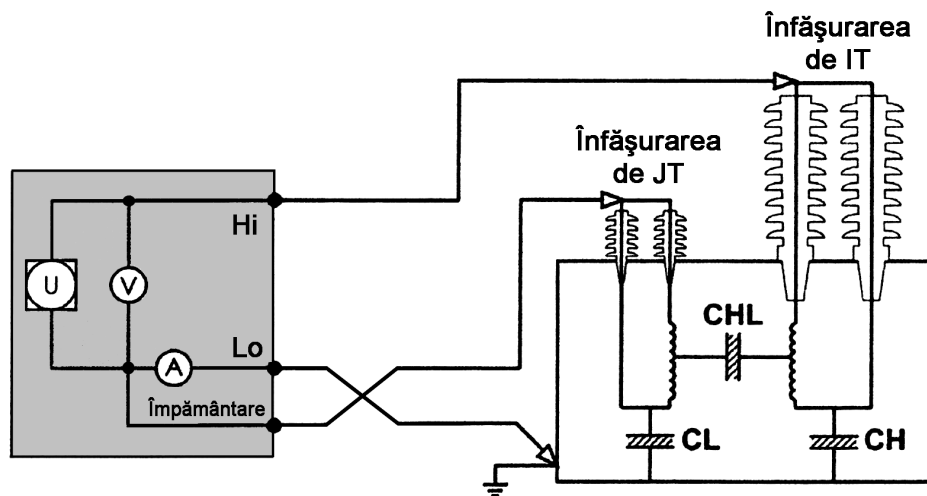


**Fig. 8.** Măsurarea umidității la transformatorul 400 MVA al ELECTROPUTERE Craiova  
Umiditate=0.8% între înfășurările IT - JT

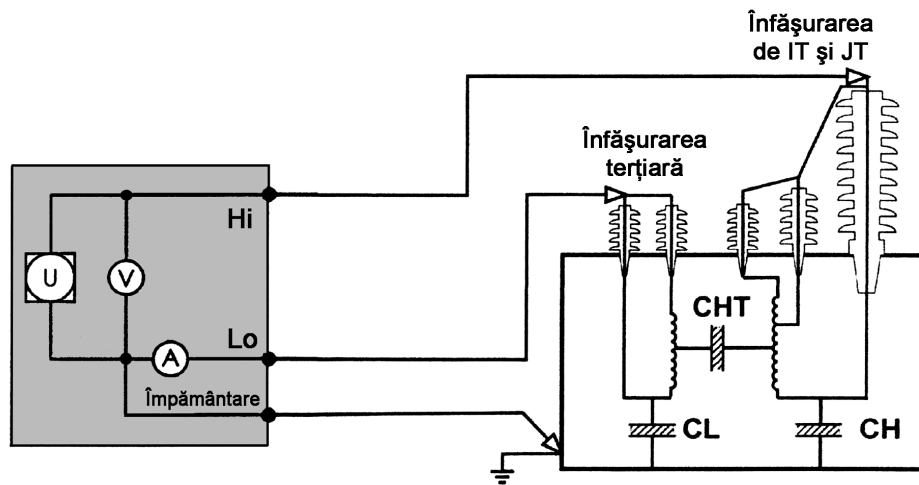
Circuitele de măsurare sunt prezentate în Fig. 9, 10 și 11.



**Fig. 9.** Măsurarea între două terminale ale transformatorului care nu sunt conectate direct la pământ



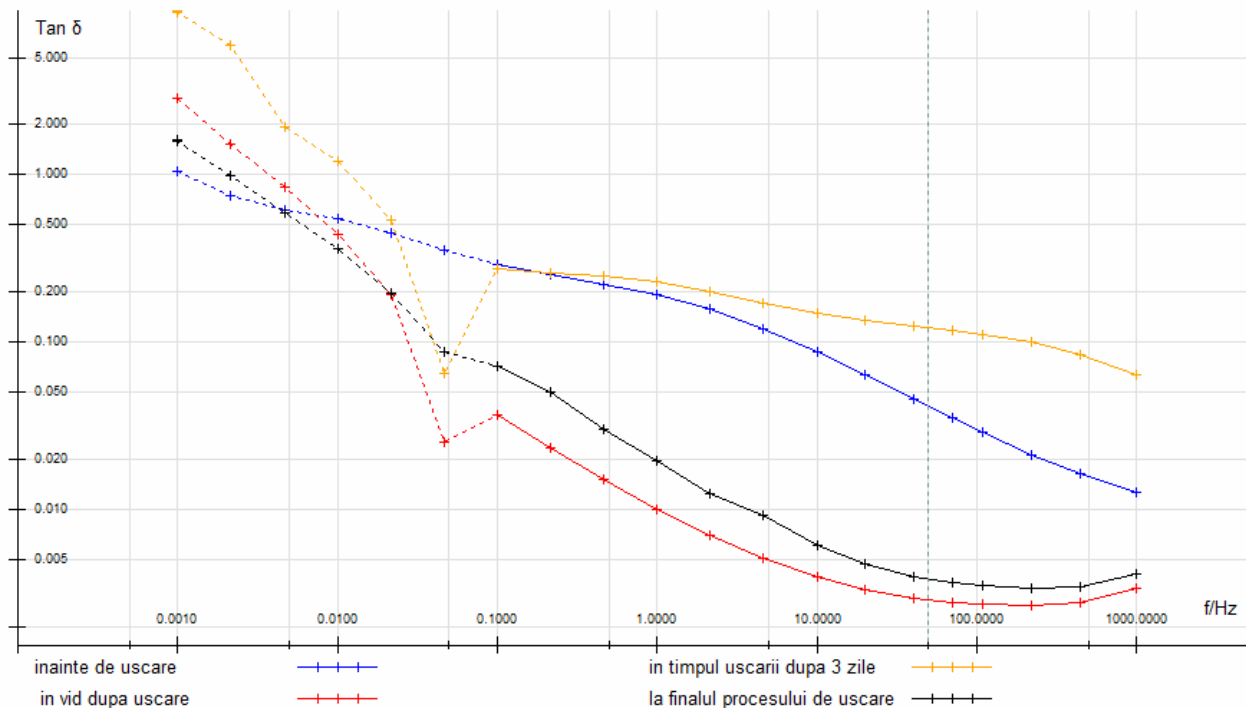
**Fig. 10.** Măsurarea între două terminale ale transformatorului dintre care una este conectată direct la pământ



**Fig. 11.** Măsurarea între două terminale ale autotransformatorului care nu sunt conectate direct la pământ

În Fig. 12 este prezentată evoluția conținutului de umiditate din izolația unui transformator de măsură de curent în timpul procesului de uscare realizat prin radiație de flux termic într-un cuptor etanș. Procedeu actual de uscare alternează perioadele de încălzire la 110°C în mediu de aer (pentru a crește eficiența procesului de radiație termică) cu cele de vidare pentru absorția umidității din izolația solidă. Echipamentul de măsurare a factorului de pierderi dielectrice funcție de frecvență a fost cuplat la transformatorul de măsură pe toată durata procesului de uscare a acestuia (v. Fig. 13).

Această măsurare a inspirat o propunere de brevet de invenție care are ca scop optimizarea duratei procesului de tratare termică a izolației și nu numai.



**Fig. 12.** Evoluția conținutului de umiditate din izolația transformatorului de curent 123 kV

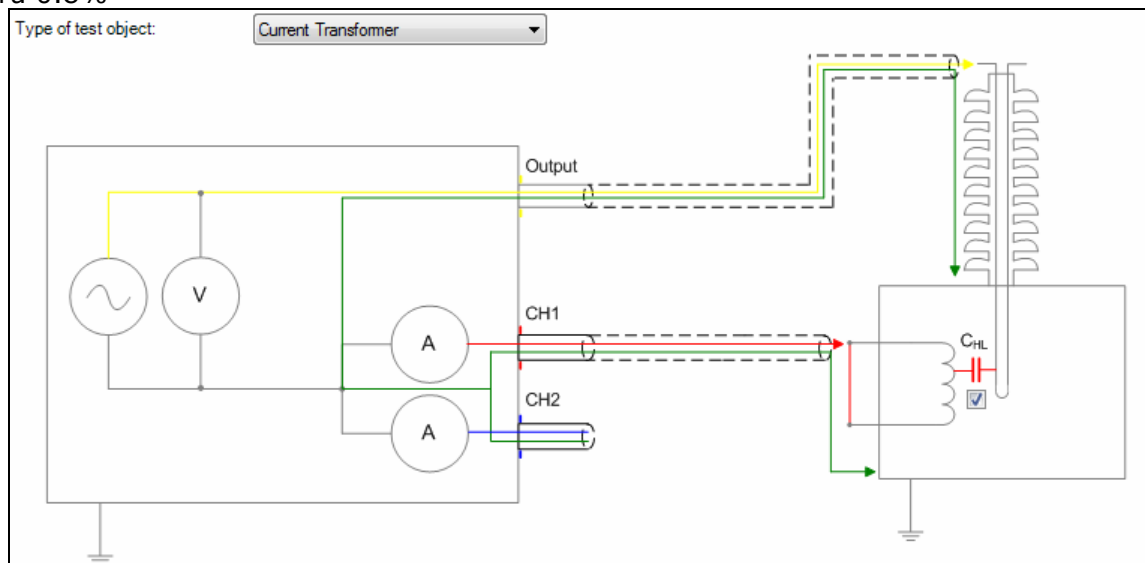
unde:

1)Albastru umiditate 4.2%

2)Galben 1.2%

3)Rosu 1%

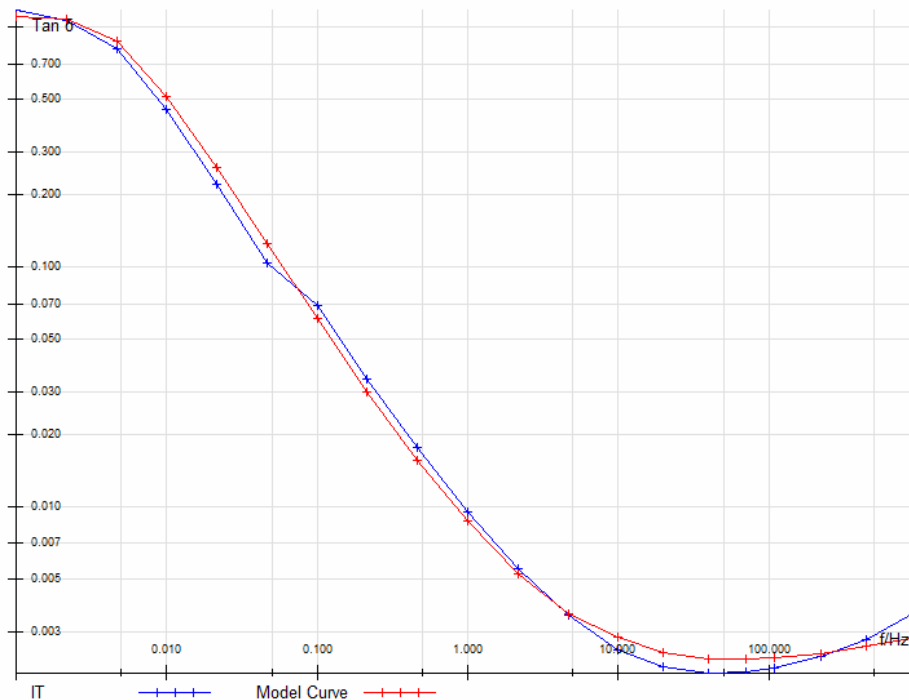
4)Negru 0.8%



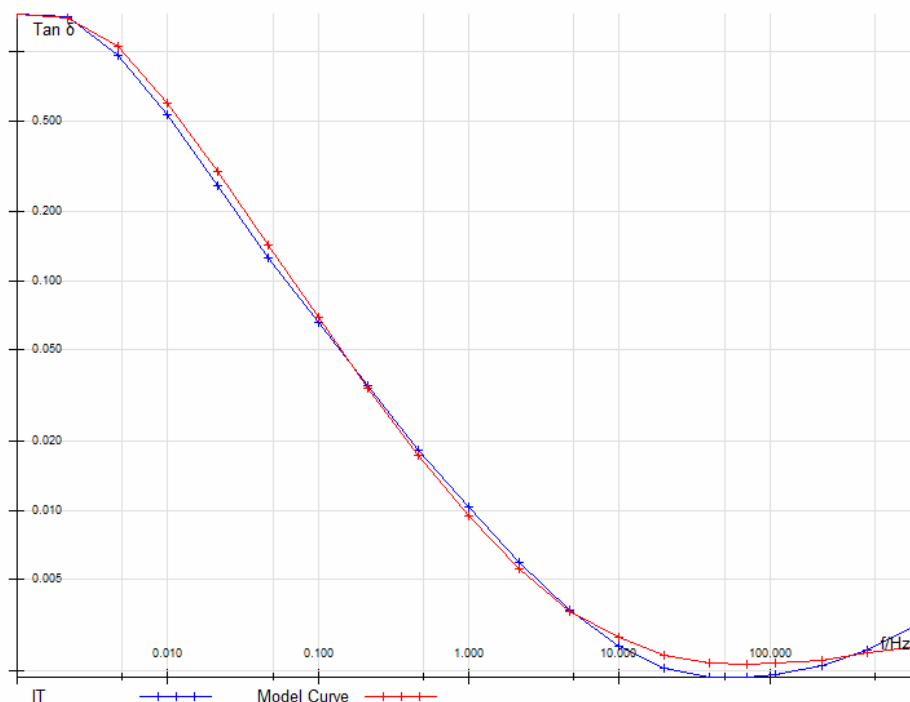
**Fig. 13.** Măsurarea factorului de pierderi dielectrice

Procedura de lucru odată consolidată a fost aplicată pentru evaluarea stării funcționale a izolației a următoarelor transformatoare aflate în exploatare:

- 200 MVA stația Bacău (v. Fig. 14);
- 200 MVA stația Roman (v. Fig. 15);
- 200 MVA stația Ișalnița;
- 250 MVA stația Suceava;
- 200 MVA stația Sărdănești.



**Fig. 14.** Măsurarea umidității la transformatorul 250 MVA al ELECTROPUTERE Craiova în Stia Bacău, Umiditate=2.2% între înfășurările IT - JT



**Fig. 15.** Măsurarea umidității la transformatorul 250 MVA al ELECTROPUTERE Craiova în Statia Roman, Umiditate=2.3% între înfășurările IT - JT

### Execuția de măsurări spectroscopice pe cabluri de medie tensiune

Standardul IEC 60502-2/ 2005 referitor la cablurile de medie tensiune precizează încercările care trebuie executate pe un cablu nou și criteriile de apreciere dacă acesta a trecut sau nu încercarea.

Am avut curiozitatea să comparăm răspunsul dielectricului cablului tip Al-XLPE/ Al foil/ PE wp 1x150/ 25 mm<sup>2</sup>, 12/ 20 kV înainte și după parcurgerea încercărilor descrise în TEST REPORT No. 43031

Din Fig. 16 rezultă că încercările mecanice, termice și electrice au influențat structura și proprietățile dielectrice ale izolației tip XLPE și totuși după criteriile de acceptare ale standardului IEC în vigoare cablul este declarat corespunzător.

Interesant este faptul că mărimea  $\tan\delta$  măsurată la 50Hz este aproape aceeași în cele 3 situații și anume:

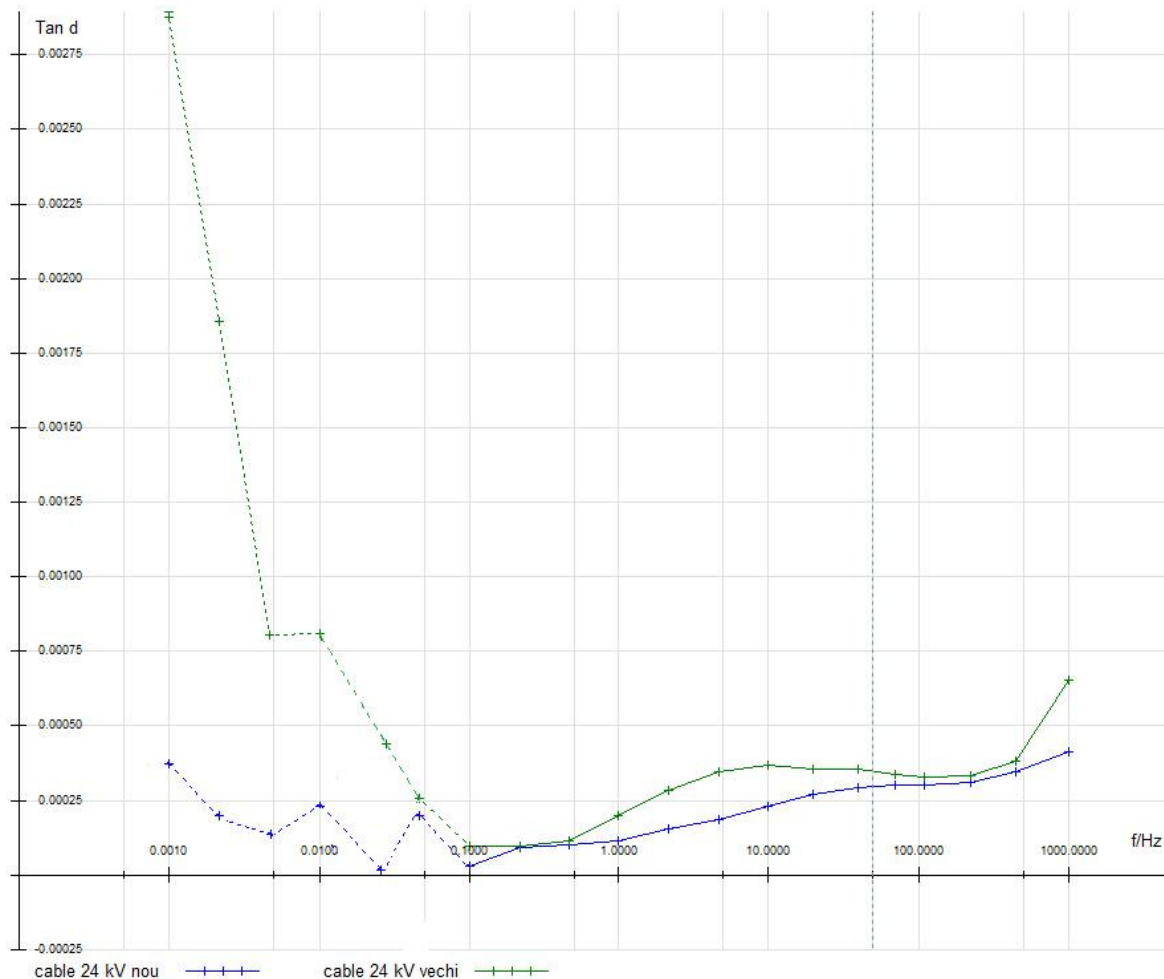
0,030% conform Test Report No. 43031 ;

0,029% conform curba cablului numit "nou" din Fig.16;

0,034% conform curba cablului numit "vechi" din Fig.16.

și totuși caracteristicile  $\tan\delta$  funcție de frecvență diferă evident înainte și după solicitările încercărilor de tip.

Investigațiile vor continua pentru a avea o bază de date experimentale necesară prezentării acestui fenomen în următoarea ședință a Comitetului Electrotehnic Internațional care va avea loc în primăvara anului viitor la Paris.



**Fig. 16.** Răspunsurile dielectricului unui cablu de medie tensiune înainte (cablu nou) și după (cablu vechi) încercările de tip

## Popularizarea rezultatelor proiectului

În urma finalizării proiectului au fost executate servicii de diagnosticare a cinci transformatoare de putere aflate în exploatare.

Procesul de diagnosticare a presupus execuția de măsurări on-site și în laborator; corelarea rezultatelor și interpretarea lor.

Au fost executate:

- analiza gazelor dizolvate în ulei;
- determinarea gradului de umiditate al uleiului;
- determinarea gradului de umiditate al izolației solide;
- măsurarea descărcărilor parțiale.

Execuția acestui serviciu a fost un bun prilej de popularizare a metodei spectroscopiei dielectrice către operatorii energetici din Moldova, Gorj și Dolj.

Tematica proiectului a permis partenerilor universitari să implice studenții în activitatea de cercetare – științifică. Au fost propuse următoarele proiecte pentru studenți:

- Proprietățile dielectrice ale izolației sintetice a cablurilor electrice (Disertație masterat la Universitatea din Craiova)
- Modelarea câmpului electromagnetic la echipamente electrice de joasă tensiune (Disertație masterat la Universitatea din Pitești)

A fost propus un brevet de invenție cu titulatura: "Metodă și sistem pentru controlul automat al procesului de stabilizare dimensională a bobinelor transformatoarelor de putere", autori: Popa Dorin și Vintilă Adrian de la ICMET Craiova, înregistrat la OSIM nr. A/ 00917/ 19.09.2011 .

Problema tehnică a brevetului a fost inspirată de o cerință mai veche a firmei Electroputere referitoare la scăderea consumului de energie termică și electrică proprii procesului tehnologic de uscare a bobinelor transformatoarelor. Echipamentul realizat a dat rezultate atât în reducerea consumului de energie termică și electrică, micșorarea duratei de eliminare a umidității cât și în obținerea dimensiunilor proiectate, a bobinelor de transformator.

## **Concluzii**

- Proiectul s-a finalizat cu realizarea unei metode de măsurare indirectă a umidității din izolația cablurilor și transformatoarelor de putere și măsură;
- Metoda de măsurare a fost adaptată materialelor folosite de firmele Electroputere Craiova, Retrasib Sibiu și IPROEB Bistrița pentru creșterea preciziei de măsurare în comparație cu software-urile care sunt comercializate pe piața internațională;
- Tehnica spectroscopiei dielectrice permite completarea listei de măsurări moderne folosite în diagnosticarea echipamentelor energetice de tensiune înaltă;
- Diagnosticarea precisă permite trecerea de la mentenanța periodică a echipamentelor energetice la mentenanța predictivă care asigură cheltuieli reduse cu personalul și serviciile de evaluare a stării funcționale;
- Această metodă de măsurare poate fi aplicată și în procesul tehnologic de realizare a transformatoarelor de măsură și putere pentru urmărirea stării izolației acestora după fiecare etapă de construcție a lor;
- Propunerea de brevet care s-a depus la OSIM București se bazează pe un model funcțional care a dat bune rezultate în ceea ce privește optimizarea costurilor și duratei proceselor de tratare și stabilizare dimensională a bobinelor transformatoarelor de mare putere;
- Diseminarea rezultatelor s-a făcut în principal prin aplicarea metodei în procesul de diagnosticare a transformatoarelor aflate în exploatare și evaluarea capabilității izolației de a parcurge cu succes încercările prevăzute pentru certificarea transformatoarelor noi;
- S-a făcut reclamă prin validarea de către practică a diagnosticării făcute.

# Anexa 1

## Determinarea unei expresii analitice pentru curbele etalon

### 1.Introducere

Raspunsul izolatiei cu cu diferite continuturi de umiditate (1%, 2%, 3%, 4%) a fost studiat in domeniul de frecventa  $10^{-4}$  -  $10^3$  Hz.

Se doreste determinarea unei relatii analitice pentru partea reala si imaginara a permitivitatii complexe  $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$  in functie de frecventa pentru diferite valori ale umiditatii la  $50^{\circ}\text{C}$ .

Raspunsul in frecventa al izolatiei pentru diferite umiditati este prezentat in Fig.1.

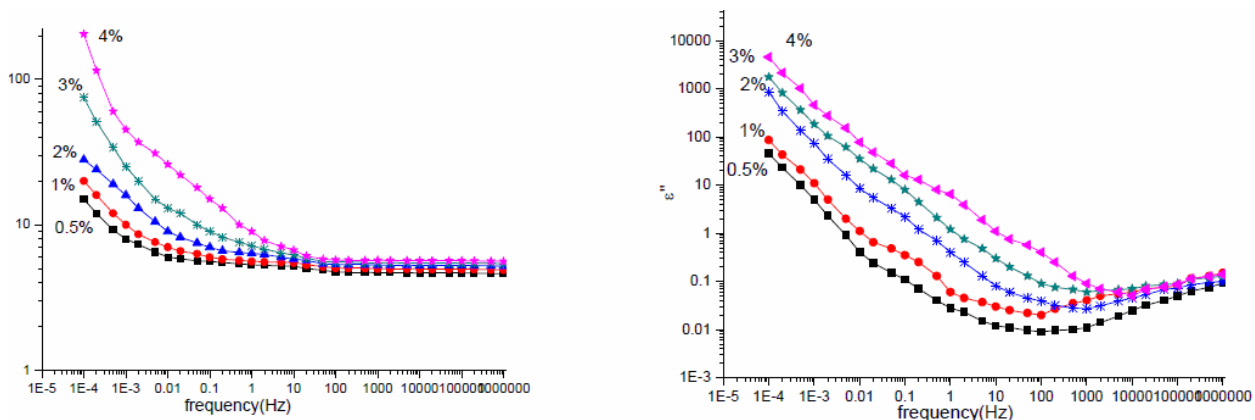


Fig.1

Se observa ca atat partea reala cit si cea imaginara a permitivitatii cresc odata cu scaderea frecventei la umiditate constanta.De asemenea ele cresc odata cu umiditatea la frecventa constanta, pregnant la frecvente mici.

### 2Modulul Curve fitting (Aproximarea curbilor)

Acest modul este o colectie de interfete grafice (GUIs) si de fisiere functie de tip m avind ca suport mediul de calcul Matlab.Principalele caracteristici ale modulului sunt:

- procesarea datelor
- aproximarea parametrica si neparametrica a datelor Se pot efectua aproximari parametrice ale datelor folosind o biblioteca de ecuatii sau o ecuatie utilizator.
- aproximare liniara cu cele mai mici patrate, aproximare neliniara cu cele mai mici patrate.
- analiza statistica pentru evaluarea calitatii aproximarii

#### 2.1Evaluarea calitatii aproximarii

Dupa aproximarea datelor cu un anumit model trebuie sa evaluam calitatea aproximarii.

Un prim pas ar fi o examinare vizuala a curbei approximate reprezentata in modulul curve fitting.

In afara de aceasta metoda modulul ofera tehnicile urmatoare atat pentru aproximari parametrice liniare cit si neliniare :

- calculul si reprezentarea reziduurilor
- calitatea statisticii aproximarii
- increderea si limitele de predictie

Aceste tehnici pot fi grupate in doua categorii : grafice si numerice.

Reziduurile si limitele de predictie sunt grafice in timp ce calitatea statisticii aproximarii si limitele de predictie sunt tehnici numerice. Tehnicile grafice sunt benefice deoarece permit vizualizarea intregului set de date si afisarea unui numar mare de relatii intre model si date.

Metodele numerice sunt focalizate pe un aspect particular al datelor si deseori concentreaza informatia intr-un singur numar.

## 2.2 Calculul si reprezentarea reziduurilor

Reziduurile unui model aproximat se definesc ca diferenta intre valorile raspuns  $y$  date si cele estimate  $y_{approx}$ , pentru fiecare valoare a datelor de intrare.

$$r = y_i - y_{i\ approx} \quad (1)$$

Presupunind ca modelul care aproximeaza datele este corect reziduurile aproximeaza erorile aleatoare.

## 2.3 Calitatea statisticii aproximarii

Dupa utilizarea metodelor grafice de evaluare a calitatii aproximarii trebuie examinata calitatea statisticii aproximarii. Modulul Curve fitting permite aceasta pentru modelele parametrice prin urmatoarele marimi :

1. suma patratelor datorate erorilor (sum of squares due to error) SSE. Se mai numeste si suma patratelor reziduurilor. Expresia SSE este:

$$SSE = \sum_{i=1}^n \omega_i (y - y_{approx})^2 = \sum_{i=1}^n r_i^2 \quad (2)$$

Daca valoarea lui SSE este apropiata de zero atunci se poate considera ca modelul de aproximare este bun.

2. R-square : Acest parametru indica eficienta aproximarii prin explicarea variatiei datelor. Altfel spus acest parametru reprezinta patratul corelatiei dintre valorile raspunsurilor si ale celor approximate. El se determina ca suma patratelor regresiei (SSR) si suma totala a patratelor (SST).

SSR se defineste ca :

$$SSE = \sum_{i=1}^n \omega_i (y - \bar{y})^2 \quad (3)$$

SST se defineste ca:

$$SST = \sum_{i=1}^n \omega_i (y_i - \bar{y})^2 \quad (4)$$

unde  $\bar{y}$  este valoarea medie.

Relatia dintre cei 3 parametri este :  $SST = SSR + SSE$ .

Pe baza acestor definitii R-square se exprima astfel :

$R\text{-square} = SSR / SST = 1 - SSE / SST$ .

R-square poate lua valori intre 0 si 1. O valoare apropiata de 1 indica o aproximare buna.

### 3. Aproximarea raspunsului in frecventa la umiditate constanta

Aproximarea se va face cu ajutorul metodei neliniare a celor mai mici patrate implementate in modulul curve fitting tool din Matlab.

Consideram curbele  $\varepsilon'(f)$  pentru  $u = 3\%$  si  $u = 4\%$ , date tabelar in Tabelul 1 si 2.

$u = 3\%$

$\varepsilon'$	70	44	16	8.8	7	6.9	6.81	6.7
f[Hz]	0.0001	0.001	0.01	0.1	1	10	100	1000

Tabel 1

$u = 4\%$ ,

$\varepsilon'$	280	70	42	15	9	7	6.92	6.87
f[Hz]	0.0001	0.001	0.01	0.1	1	10	100	1000

Tabel 2

Cele doua cazuri sunt reprezentate in Fig.2.

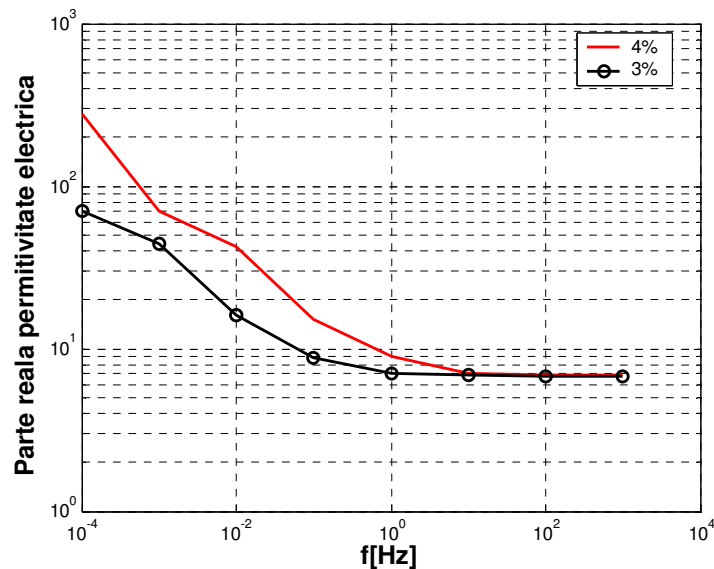


Fig.2

Pentru generarea curbelor intermediare, corepunzatoare altor valori ale umiditatii, s-au folosit expresii analitice de tip putere de forma:

$$\varepsilon' = a \cdot f^b + c \quad (5)$$

Expresia analitica pentru curba intermediara corepunzatoare umiditatii  $u = 3.5\%$  s-a obtinut prin mediarea valorilor din Tabelele 1 si 2 si aplicarea algoritmului neliniar al celor mai mici patrate, obtinindu-se expresia :

$$\epsilon' = 1.665 \cdot f^{-0.5} + 6.86 \quad (6)$$

Valorile obtinute pentru coeficienti corespund unor limite de incredere de 95.5 %.

Se observa o valoare maxima foarte scazuta a reziduurilor :  $|r| = 2 \cdot 10^{-14}$  ceea ce indica o buna aproximare. De asemenea  $SSE = 6.967 \cdot 10^{-27}$  si  $R\text{-square} = 1$ .

Reprezentarea celor 3 curbe , corepunzatoare umiditatilor 3%, 3.5% si 4% este prezentata in Fig.3.

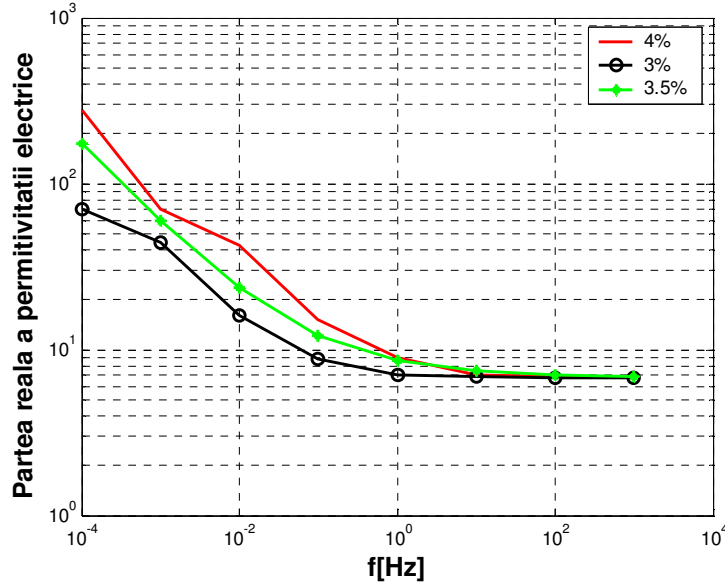


Fig.3

Aplicind acelasi algoritm s-a aproximat curba pentru umiditate 3.75%, aceasta fiind reprezentata in Fig.4.

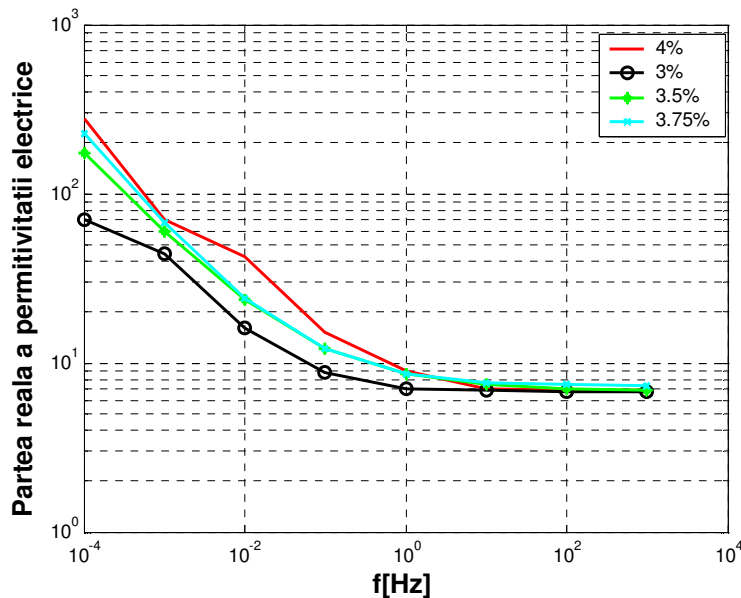


Fig.4

Acelasi algoritm s-a aplicat si pentru partea imaginara a permitivitatii electrice  $\epsilon''$ .

#### 4. Bibliografie

1. C. Ekanayake, S. Gubanski, A. Graczkowski, K. Walczak, "Frequency response of oil impregnated pressboard and paper samples for estimating moisture in transformer insulation", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 21, no. 3, pp. 1309-1317, July 2006.
2. T. K. Saha, R. Middleton, A. Thomas, "Understanding frequency & time domain polarisation methods for the insulation condition assessment of power transformers", IEEE Xplore, 978-1-4244-4241-6/09/\$25.00 ©2009 IEEE, pp. 1-8.
3. R. Mohamed, P. L. Lewin, "Frequency domain modelling of high voltage transformers using a nonlinear least square estimation technique", Proceedings of the 16th International Symposium on High Voltage Engineering, Copyright © 2009 SAIEE, Innes House, Johannesburg, ISBN 978-0-620-44584-9, Paper A-53, pp. 1-6.
4. Jalal M. Abdallah, "Investigating the transformer operating conditions for evaluating the dielectric response", World Academy of Science, Engineering and Technology 75 2011, pp. 1235-1245.
5. M. Koch, S. Tenbohlen, M. Kruger, A. Kraetge, "A Comparative Test and Consequent Improvements on Dielectric Response Methods", 15th ISH 27-31 August 2007 Ljubljana, Slovenia, pp. 1-6.
6. M. Jaya, T. Leibfried, "Dielectric modelling and diagnosis of the oil-paper insulation system in power transformers", pp. 1-6.
7. Matlab, Documentatie Module Curve fitting, Statistics, Copyright The MathWorks Inc.
8. H. Gavin, "The Levenberg-Marquardt method for nonlinear least squares curve-fitting problems", Duke University, 2011.



RESEARCH-DEVELOPMENT AND TESTING NATIONAL  
INSTITUTE FOR ELECTRICAL ENGINEERING

## ICMET CRAIOVA

200746 Craiova, B-dul Decebal Nr. 118A

Certificat de înmatriculare: J 16/312/1999; Cod de înregistrare fiscală RO3871599  
Phone: 0351 - 404888. 0351 - 404889; Fax 0251 - 415482. 0351 - 404890; www.icmet.ro. e-mail:market@icmet.ro

### HIGH VOLTAGE DIVISION - HVD

High Voltage Laboratory - HVL  
Phone: 0351 - 402425; e-mail:lit@icmet.ro



## TEST REPORT No. 43031 / 24.06.2011

1. CUSTOMER: HOLDING KABLOVI A.D. FKS-POWER CABLES  
FACTORY JAGODINA

Gine Pajevic 14, 35000 Jagodina Serbia

2. MANUFACTURER: HOLDING KABLOVI A.D. FKS-POWER CABLES  
FACTORY JAGODINA

Gine Pajevic 14, 35000 Jagodina Serbia

3. TESTED PRODUCT : MV cable type Al-XL PE/Al foil / PEwp1x150/25mm<sup>2</sup> 12/ 20 kV

4. REFERENCE STANDARD: IEC 60502-2 / 2005

#### 5. TESTS PERFORMED:

- I - Bending test
- II - Partial discharge test after bending test
- III - Measurement of capacitance and tan  $\delta$ 
  - III.1 - Measurement of capacitance and tan  $\delta$  at room temperature
  - III.2 - Measurement of capacitance and tan  $\delta$  at 95<sup>0</sup>C to 100<sup>0</sup>C
- IV - Heating cycle test
- V - Partial discharge test after heating cycle test
- VI - Lightning impulse test followed by applied voltage test
  - VI.1 - Lightning impulse test
  - VI.2 - Applied voltage test
- VII - Applied voltage for 4 h

6. TEST DATE: (31.05,01÷08,22,23.06).2011

7. TEST RESULTS: The product passed the tests.

8. The report contains: 17 pages.

9. The test report is edited in 4 copies, copy no.1 remain in laboratory and copies 2, 3 and 4 are sent to the customer.

**HEAD OF HV DIVISION**

Eng. PĂTRU Ion

**HEAD OF HV LABORATORY**

Eng. BADEA Ion

#### WARNINGS

1. Results refer to the tested product only.
2. Publication or reproduction of the contents of this report in any other form unless its complete photocopying is not allowed without writing approval of Division to which laboratory belongs.
3. All signatures of the present report are original ones.



HVD

<b>Content</b>	<b>Page</b>
➤ Identification of the test product .....	3
➤ Technical characteristics established by manufacturer .....	3
➤ Tests program .....	3
➤ Responsible for test .....	3
➤ Opinions and interpretation (if necessary).....	3
➤ Present at the test.. .....	3
➤ Bending test.....	4
➤ Partial discharge test after bending test .....	4
➤ Measurement of capacitances and $\tan \delta$ at room temperature.....	5
➤ Measurement of capacitances and $\tan \delta$ at $95^{\circ}\text{C}$ to $100^{\circ}\text{C}$ .....	5
➤ Heating cycle test.....	6
➤ Partial discharge test after heating cycle test.....	7
➤ Lightning impulse test followed by applied voltage test .....	8
➤ Oscillograms.....	9÷13
➤ Applied voltage test .....	14
➤ Applied voltage test for 4 h.....	15
➤ Photos.....	16
➤ Technical description and constructional characteristics .....	17,18



**1. Identification of the test product:**

Type : Al-XLPE/AL foil/PEwp 12/20 (24) kV

Serial number: -

Technical description and constructional characteristics: pages 17,18

Contract //order: 705.2 / 7592 / 29.04.2011 // 21642/ 23.05.2011

Product receipt date: 27.05.2011

Product condition when receipt: New

**2. Technical and constructive characteristics:**

- nominal service voltage  $U_0 / U$  : 12 / 20 kV;
- conductor section: 150 mm<sup>2</sup>;
- nominal cross-section area of copper screen: 25 mm<sup>2</sup>;
- nominal thickness of outer sheath : 2.0 mm;
- overall diameter of completed cable : 35 mm approx;

**3. Test program:**

- I – Bending test
- II – Partial discharge test after bending test
- III – Measurement of capacitance and  $\tan \delta$ 
  - III.1 – Measurement of capacitance and  $\tan \delta$  at room temperature
  - III.2 – Measurement of capacitance and  $\tan \delta$  at 95°C to 100°C
- IV – Heating cycle test
- V – Partial discharge test after heating cycle test
- VI – Lightning impulse test followed by applied voltage test
  - VI.1 – Lightning impulse test
  - VI.2 – Applied voltage test
- VII – Applied voltage for 4 h

- 4. Responsibles for tests :** Eng. Nicoară T. (I,II,V)  
Eng. Ștefan D. (III)  
Tech. Temelie A. (IV)  
Eng. Badea I. (VI.1)  
Eng. Macovei Gh.(VI.2,VII)

**5. Opinions and interpretation (if necessary):**

**6. Present at the test :**



HVD

### I - BENDING TEST

1. Reception product date: 27.05.2011
2. Test date: 31.05.2011
3. Atmospheric conditions:  $p = 1005$  mbars;  $t = 20.5$  °C;  $h = 69$  %.
4. Test standard: IEC 60502 – 2 / 2005, clause 18.1.3
5. Test procedure:

For the test it was used a test cylinder with 1m diameter.

The cable sample was bended on the test cylinder in one direction at ambient temperature. After that the cable sample was unwound and bended again, but in reverse direction without axial rotation.

This cycle of operations was done three times.

### II - PARTIAL DISCHARGE TEST AFTER BENDING TEST

1. Reception product date: 27.05.2011
2. Test date: 31.05.2011
3. Atmospheric conditions:  $p = 1005$  mbars;  $t = 20.5$  °C;  $h = 69$  %.
4. Test standard: IEC 60502 – 2 / 2005, clause 18.1.4
5. Equipment and apparatus used (see also photo 1 from the page no. 15):
  - Test transformer 350 kVA / 350 kV, serial no. 3 – 1963.
  - Coupling capacitor no. 2: 500 pF/300 kV.

#### AC measuring system:

- High voltage compressed gas capacitor type MCF 75/350P, no.853889.
- Low voltage arm type H90, no.898939.
- Digital peak voltmeter type MU9, no.892204.

(Calibration Certificate DKD-K-18701, no.161/06.2008).

*Measuring uncertainty for the alternating voltage is  $\pm 1.2$  %.*

*The reported uncertainty is an expanded uncertainty, based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor  $k = 2$ , providing a level of confidence of approximately 95 %.*

#### PD measuring system:

- Measuring impedance type LDM – 5/U no. 735 35 131.
- Measuring instrument type LDS – 6, no.21543181.  
(Calibration Certificate DKD – K – 15601 no. 000273 / 19.08.2009)
- Calibrator type PET 2-1 no. 893534.  
(Calibration Certificate DKD – K – 18701 no. 265/28.04.2011)
- Calibration charge of the PD measuring circuit: 5 pC.

*Measuring uncertainty for the PD level is:  $0.5$  pC +  $0.04q$  (pC)*

*The uncertainty stated is expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor  $k = 2$ . The value of measurand lies within the assigned range of values with probability of 95 %.*

### 6. Measurement results:

Pre-stressing voltage [kV]	Time [s]	PD measuring voltage [kV]	PD level [pC]
$2 \times U_0 = 2 \times 12 = 24$	10	$1.73 \times U_0 = 1.73 \times 12 \approx 20.8$	2

**Note:** Background noise level : 2 pC.

**7. Conclusion.** The tested object passed the test.



HVD

### III - MEASUREMENT OF CAPACITANCE AND TAN $\delta$

#### III.1 - MEASUREMENT OF CAPACITANCE AND TAN $\delta$ AT ROOM TEMPERATURE

1. Product receipt date: 27.05.2011
2. Test date: 31.05.2011
3. Atmospheric conditions: p = 1005 mbars; t = 20.5 °C; h = 69 %.
4. Test standard: IEC 60502-2 / 2005, subclause 18.1.5 (at room temperature)
5. Measuring voltage : 10 kV
6. Temperature of tan  $\delta$  measurement: 20.5<sup>0</sup>C.
7. Test results:

Voltage test [kV]	Capacitances [pF]	tg $\delta$ [%]
2	3739	0.07
10	3740	0.09

#### 5. Measuring and testing system used for C + tg $\delta$ :

- Automated set of instruments for capacitance and tan  $\delta$  type DELTA, manufacturer Megger (USA).  
(Calibration Certificate no.03.03 – 107 / 2008)

*Measuring uncertainty is  $\pm 0.3$  % (for the capacity) and  $\pm 0.02$  % (for tan $\delta$ ).*

*The reported uncertainty is an expanded uncertainty, based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor k = 2, providing a level of confidence of approximately 95 %.*

10. Conclusion: The tested object passed the test.

#### III.2 - MEASUREMENT OF CAPACITANCE AND TAN $\delta$ AT 95<sup>0</sup>C TO 100<sup>0</sup>C

1. Product receipt date: 27.05.2011
2. Test date: 01.06.2011
3. Atmospheric conditions: p = 1007mbars; t = 21 °C; h = 60 %.
4. Test standard: IEC 60502-2 / 2005, subclause 18.1.5
5. Temperature of tan  $\delta$  measurement: 96<sup>0</sup>C.
6. Test results:

Voltage test [kV]	Capacitances [pF]	tg $\delta$ [%]
2	3372	0.03
10	3374	0.05

#### 7. Measuring and testing system used for C + tg $\delta$ :

- Automated set of instruments for capacitance and tan  $\delta$  type DELTA, manufacturer Megger (USA).  
(Calibration Certificate no.03.03 – 107 / 2008)

*Measuring uncertainty is  $\pm 0.3$  % (for the capacity) and  $\pm 0.02$  % (for tan $\delta$ ).*

*The reported uncertainty is an expanded uncertainty, based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor k = 2, providing a level of confidence of approximately 95 %.*

8. Conclusion: The tested object passed the test.



IV – HEATING CYCLE TEST

1. Product receipt date: 27.05.2011
2. Test date: 01.06.2011 – 08.06.2011
3. Reference standards: IEC 60502-2 clause 18.1.6
4. Atmospheric conditions:  $t = 17.6\text{ }^{\circ}\text{C} - 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $h = 45\% - 51\%$
5. Used equipment: – Current source type LET - 4000 – RD series 106278, manufacturer Euro SMC SA SPANIA.  
– Digital thermometer type AD 025V21S-3TR.

6. Mode of operation:

A cable specimen with a length of 15 m subjected previously to bending test, DP test, C + tan delta test was placed in the test circuit (photo 4, 5 and 6 from page 15) and subjected to heating cycle test.

An identical cable series connected with the tested cable was used to measure the temperature on the conductor.

The product was prepared by the manufacturer.

The operation temperature of the tested cable was 90°C.

The cable was heated by passing current through it until the cable reached a temperature with at least 5°C higher than the maximum core temperature in normal operation but not exceeding 10°C.

Each heating cycle had a duration of 8 hours: 2 hours - heating and 2 hours maintaining a temperature of 95°C ÷ 100°C and 4 hours – natural cooling.

The specimen subjected to 20 cycles of current passing through cable (heating, maintenance, cooling) was monitored and recorded according to the following table.

DATE	CYCLE No.	HOUR	TEMPERATURE	DATE	CYCLE No.	HOUR	TEMPERATURE			
01.06.2011	1	14	26.7 °C	05.06.2011	11	22	27.8 °C			
		14+16	heating			22 - 24	heating			
		16 + 18	96.5 + 98.3 °C			24 - 2	95.8 + 98.3 °C			
		18 -22	natural cooling			2 - 6	natural cooling			
	2	22	28.3 °C		12	6	26.4 °C			
		22 - 24	heating			6-8	heating			
		24 -2	96.5 + 98.5			8-10	95.4 + 98.6 °C			
		2 - 6	natural cooling			10 -14	natural cooling			
		02.06.2011	3			6	26.5 °C	13	14	27.6 °C
						6-8	heating		14+16	heating
8-10	96.3 + 97.7 °C			16 + 18	95.8 + 98.3 °C					
4	10 -14		natural cooling	14	18 -22	natural cooling				
	14		27.2 °C		22	28.4 °C				
	14+16		heating		22 - 24	heating				
5	16 - 18		96.5 + 98.7 °C	15	24 -2	94.4 + 97.3 °C				
	18 -22		natural cooling		2 - 6	natural cooling				
	22		27.2 °C		06.06.2011	6	27.4 °C			
	22 - 24		heating			6-8	heating			
	24 -2	96.5 + 98.3 °C	8-10			95.4 + 97.3 °C				
	2 - 6	natural cooling	10 -14			natural cooling				
03.06.2011	6	6	27.5 °C	16		14	26.4 °C			
		6-8	heating			14+16	heating			
		8-10	96.4 + 99.3 °C		16 + 18	96.6 + 98.3 °C				
	7	10 -14	natural cooling	17	18 -22	natural cooling				
		14	26.9 °C		22	27.4 °C				
		14+16	heating		22 - 24	heating				
	8	16 + 18	95.4 + 96.2 °C	18	24 -2	95.4 + 99.3 °C				
		18 -22	natural cooling		2 - 6	natural cooling				
		22	26.4 °C		07.06.2011	6	26.4 °C			
		22 - 24	heating			6-8	heating			
24 -2		95.6 + 97.3 °C	8-10			95.4 + 99.3 °C				
2 - 6		natural cooling	10 -14			natural cooling				
04.06.2011	9	6	27.3 °C	19		14	26.8 °C			
		6-8	heating			14+16	heating			
		8-10	95.8 + 98.7 °C		16 + 18	96.3 + 98.3 °C				
		10 -14	natural cooling		18 -22	natural cooling				
	10	14	26.7 °C	20	22	26.4 °C				
		14+16	heating		22 - 24	heating				
		16 + 18	95.4 + 99.3 °C		24 -2	95.4 + 99.3 °C				
		18 -22	natural cooling		2 - 6	natural cooling				



HVD

## V- PARTIAL DISCHARGE TEST AFTER HEATING CYCLE TEST

1. Product receipt date: 27.05.2011
2. Test date: 15.06.2011
3. Atmospheric conditions:  $p = 1028$  mbar;  $t = 20.4$  °C;  $h = 65.4$  %.
4. Test standard: IEC 60502 – 2 / 2005. clause 18.1.6
5. Equipment and apparatus used (see also photo 1 from the page no.15):
  - Test transformer 350 kVA / 350 kV, serial no. 3 – 1963.
  - Coupling capacitor no. 2: 500 pF/300 kV.

### AC measuring system:

- High voltage compressed gas capacitor type MCF 75/350P, no.853889.
- Low voltage arm type H90, no.898939.
- Digital peak voltmeter type MU9, no.892204.

(Calibration Certificate DKD-K-18701, no.161/06.2008).

*Measuring uncertainty for the alternating voltage is  $\pm 1.2$  %.*

*The reported uncertainty is an expanded uncertainty. based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor  $k = 2$ . providing a level of confidence of approximately 95 %.*

### PD measuring system:

- Measuring impedance type LDM – 5/U no. 735 35 131.
- Measuring instrument type LDS – 6, no.21543181.  
(Calibration Certificate DKD – K – 15601 no. 000273 / 19.08.2009)
- Calibrator type PET 2-1 no. 893534.  
(Calibration Certificate DKD – K – 18701 no. 265/28.04.2011)
- Calibration charge of the PD measuring circuit: 5 pC.

*Measuring uncertainty for the PD level is:  $0.5$  pC +  $0.04q$  (pC)*

*The uncertainty stated is expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor  $k = 2$ . The value of measurand lies within the assigned range of values with probability of 95 %.*

### 6. Measurement results:

Pre-stressing voltage [kV]	Time [s]	PD Measuring voltage [kV]	PD level [pC]
$2 \times U_0 = 2 \times 12 = 24$	10	$1.73 \times U_0 = 1.73 \times 12 \approx 20.8$	2

**Note:** Background noise level : 2 pC.

**7. Conclusion.** The tested object passed the test.



HVD

## VI – LIGHTNING IMPULSE TEST FOLLOWED BY APPLIED VOLTAGE TEST

### VI.1- LIGHTNING IMPULSE TEST

1. **Product receipt date:** 27.05.2011
2. **Test date:** 22.06.2011
3. **Atmospheric conditions:**  $p = 1008 \text{ mbar}$ ;  $t = 22.7 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $h = 48.6 \%$ ;
4. **Test standard:** IEC 60502 – 2 / 2005, clause 18.1.7 and IEC 60230 / 2000, section 2, clause 6.
5. **Test voltage:**

Full wave [kV]	Wave form T1/T2 [μs]
125	(1÷5) / (40÷60)

### 6. Equipment and apparatus used:

6.1. High – voltage impulse generator 4.2 MV, no. 5 – 1197 with following parameters:

- Stage number: I 1 (1 x 1)
- Equivalent charge capacity:  $C_s = 0.576 \mu\text{F}$
- Equivalent serial resistance:  $R_s = 70.5 \Omega$
- Equivalent parallel resistance:  $R_p = 115 \Omega$

6.2. Measuring system consists of:

- Capacitive divider. dividing ratio:  $k_{\text{div}} = 345.8$
- Digital measuring system. TR – AS 100 – 10 / 4. serial no. 241. channel 3  
(Calibration Certificate 152 – DKD – K – 18701 / 02.08).

*Measuring uncertainty for the lightning impulse voltage is: 1.8%*

*The uncertainty stated is expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor  $k = 2$  providing a confidence level of 95 %.*

### 7. Test conditions:

The test was performed on the test specimen with a length of 15 m after heating it for 4 hours so that core temperature  $96^\circ\text{C}$  ( $6^\circ\text{C}$  above the usual cable operation temperature).

Ten negative impulses and ten positive impulses were applied between core and shielding (see photo 2 from pg. 15).

The test voltage level was 125 kV.

After the lightning impulse voltage test the cable specimen was subjected to the power frequency voltage test at environment temperature for 15 minutes.

The test voltage value was  $42 \text{ kV}_{\text{r.m.s}}$  ( $3.5U_0 = 3.5 \times 12$ ).

**Note.** No breakdown occurred.

8. **Test result:** The product passed the test.



HVD

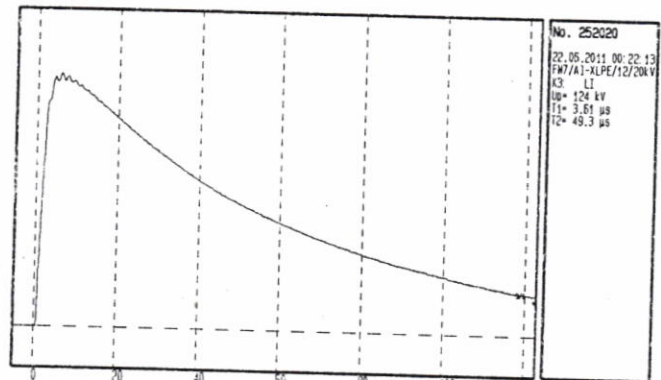
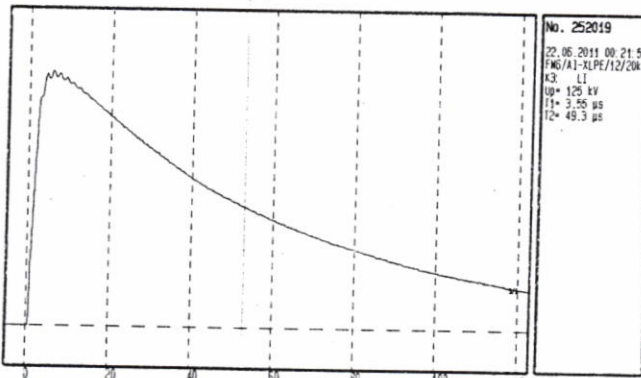
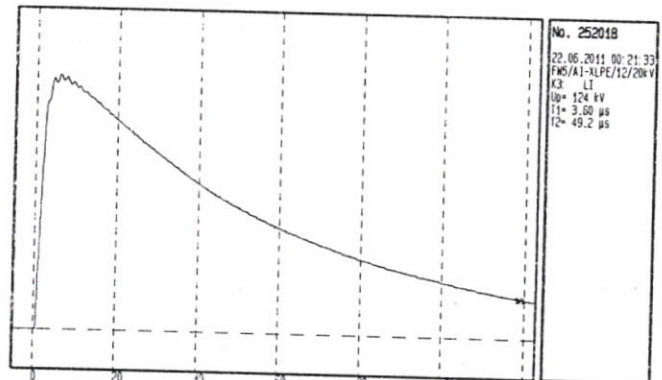
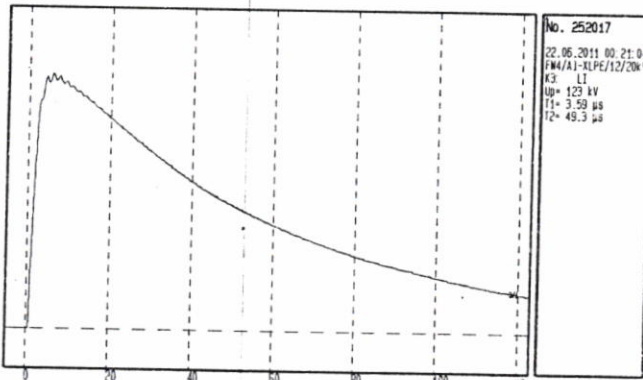
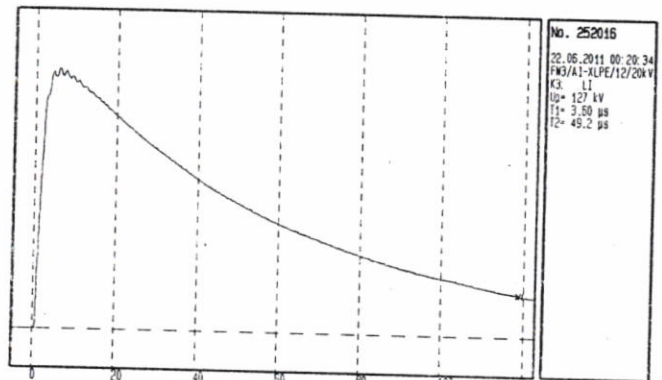
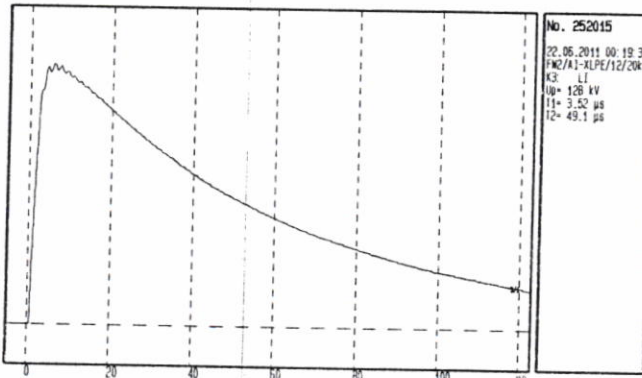
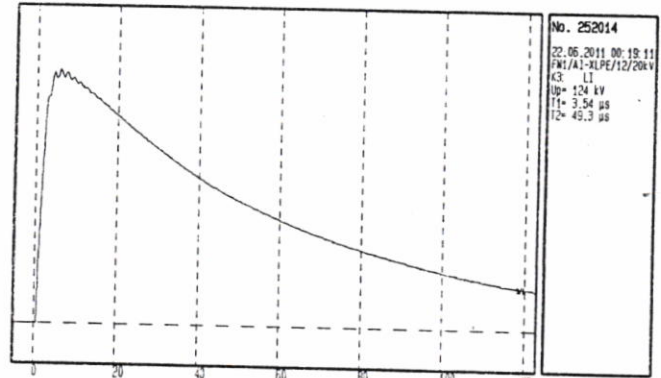
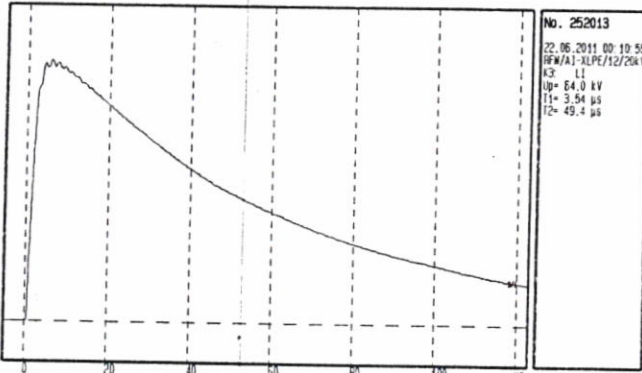
Recorded oscillograms					
No.	Up [kV]	T1 [ $\mu$ s]	T2 [ $\mu$ s]	Tc [ $\mu$ s]	Step / Phase / Winding
252013	+ 64.0	3.54	49.4		RFW/Al-XLPE/12/20kV
252014	+ 124	3.54	49.3		FW1/Al-XLPE/12/20kV
252015	+ 128	3.52	49.1		FW2/Al-XLPE/12/20kV
252016	+ 127	3.60	49.2		FW3/Al-XLPE/12/20kV
252017	+ 123	3.59	49.3		FW4/Al-XLPE/12/20kV
252018	+ 124	3.60	49.2		FW5/Al-XLPE/12/20kV
252019	+ 125	3.55	49.3		FW6/Al-XLPE/12/20kV
252020	+ 124	3.61	49.3		FW7/Al-XLPE/12/20kV
252021	+ 123	3.60	49.2		FW8/Al-XLPE/12/20kV
252022	+ 125	3.60	49.1		FW9/Al-XLPE/12/20kV
252023	+ 125	3.61	49.0		FW10/Al-XLPE/12/20kV
252024	- 63.5	3.51	53.3		RFW/Al-XLPE/12/20kV
252025	- 124	3.46	53.3		FW1/Al-XLPE/12/20kV
252026	- 124	3.39	53.0		FW2/Al-XLPE/12/20kV
252027	- 124	3.42	53.2		FW3/Al-XLPE/12/20kV
252028	- 123	3.44	53.3		FW4/Al-XLPE/12/20kV
252029	- 124	3.32	53.0		FW5/Al-XLPE/12/20kV
252030	- 124	3.45	52.9		FW6/Al-XLPE/12/20kV
252031	- 125	3.41	53.0		FW7/Al-XLPE/12/20kV
252032	- 125	3.41	53.1		FW8/Al-XLPE/12/20kV
252033	- 124	3.40	53.2		FW9/Al-XLPE/12/20kV
252034	- 124	3.42	53.1		FW10/Al-XLPE/12/20kV

Notes: 1. Up-peak value of testing voltage; T1 – front; T2 – tail; FW-full wave 100%.

2. Wave forms of voltage impulse during the tests were inside of the limits prescribed by the test norms.

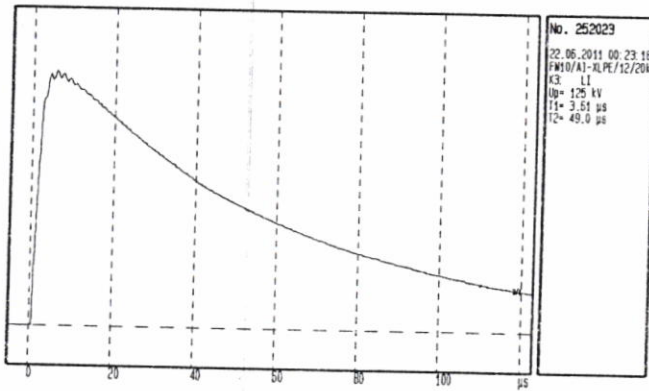
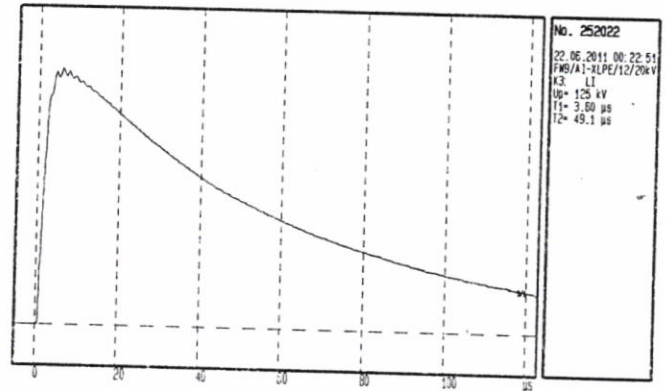
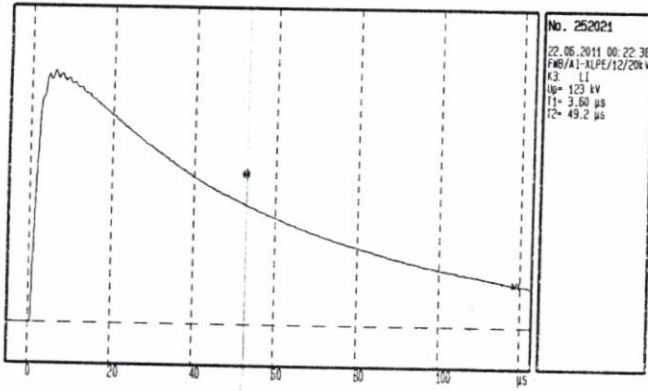


HVD



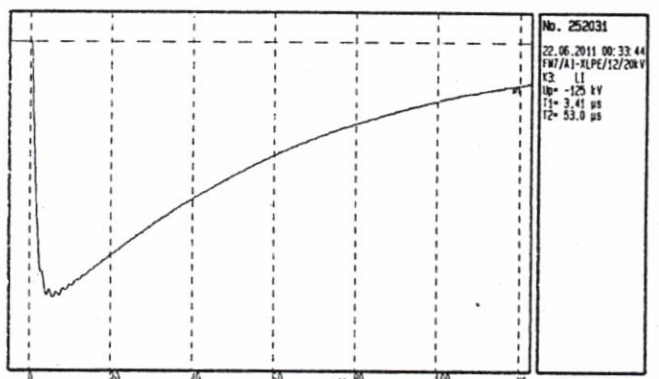
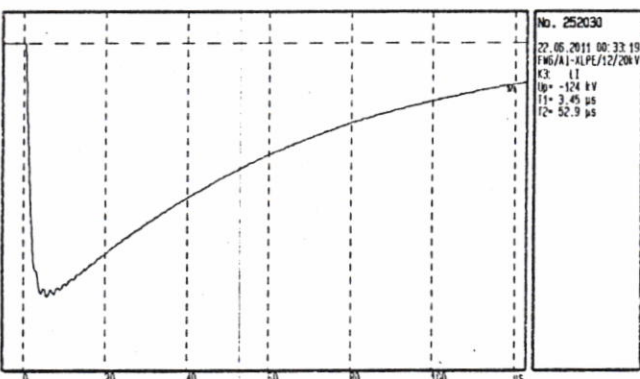
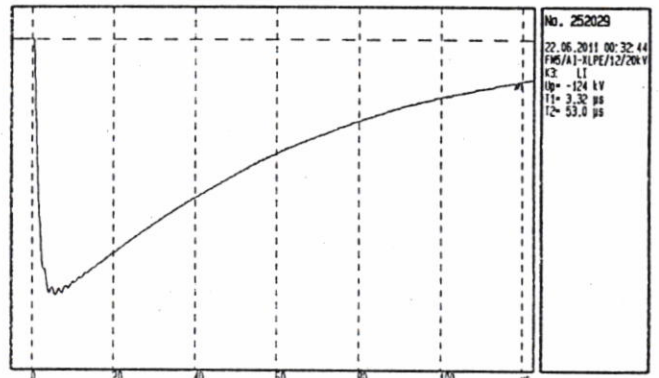
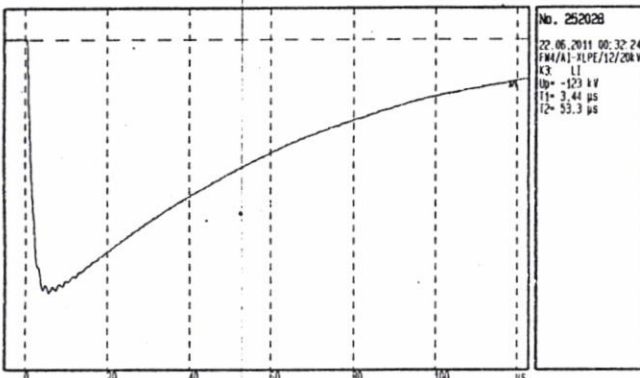
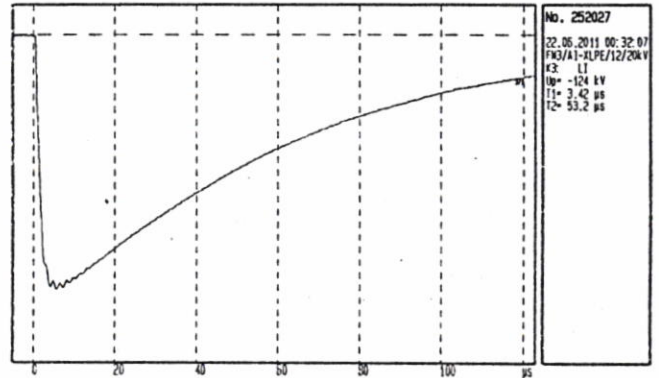
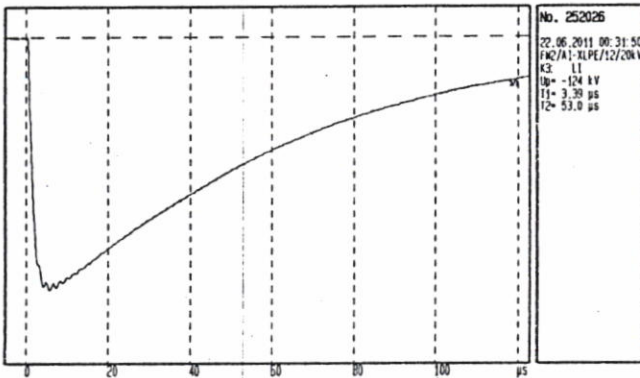
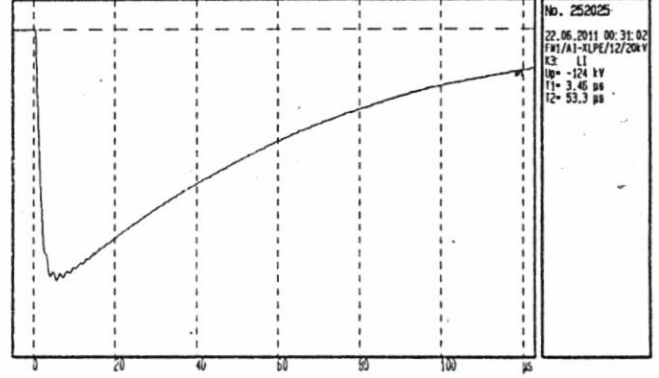
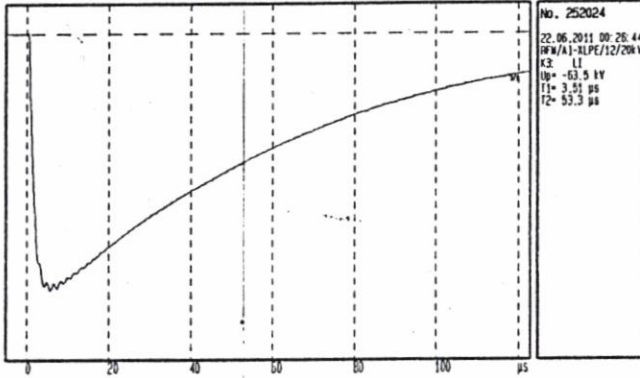


HVD



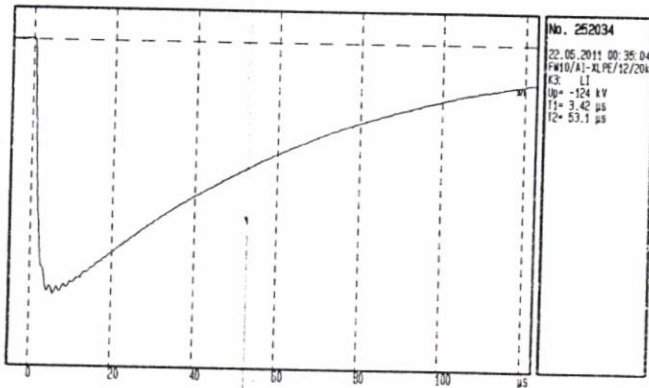
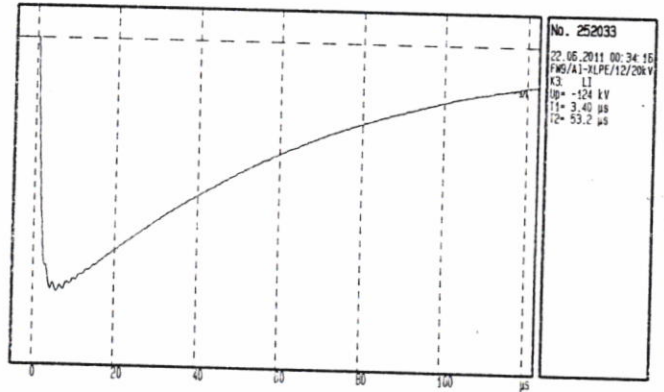
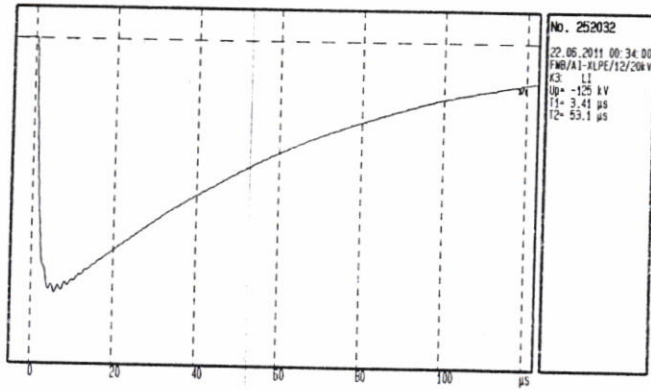


HVD





HVD



**VI.2 – APPLIED VOLTAGE TEST**

1. **Product receipt date:** 27.05.2011
2. **Test date:** 23.06.2011
3. **Test standard:** IEC 60502 – 2 / 2005, clause 18.1.7; IEC 60230
4. **Atmospheric conditions:** p = 1006 mbars; t = 23°C; h = 56 %
5. **Equipment used:** - Test transformer 350 kVA / 350 kV no.3 – 1963;  
- 350 kV capacitive divider consisting of: high voltage arm type MCF 75 / 350P, no.853889 and low voltage arm type H90, no.898939 + peak digital voltmeter type MU9, no.892204.  
(Calibration Certificate DKD-K-18701, no.161/06.2008)

Measuring uncertainty is  $\pm 1.2\%$ .

The reported uncertainty is an expanded uncertainty, based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor  $k = 2$ , providing a level of confidence of approximately 95 %.

**6. Test parameters:**

Voltage [kV]	Frequency [Hz]	Time [min]
$3.5 \times U_0 = 42$	50	15

**Note.** No breakdown occurred.

**7. Test result:** The product passed the test.

**VII - APPLIED VOLTAGE TEST FOR 4 H**

1. **Product receipt date:** 27.05.2011
2. **Test date:** 23.06.2011
3. **Atmospheric conditions:** p = 1006 mbars; t = 23°C; h = 56 %
4. **Test standard:** IEC 60502 – 2 / 2005, clause 18.1.8
5. **Equipment used:** - Test transformer 350 kVA / 350 kV no.3 – 1963;  
- 350 kV capacitive divider consisting of: high voltage arm type MCF 75 / 350P, no.853889 and low voltage arm type H90, no.898939 + peak digital voltmeter type MU9, no.892204.  
(Calibration Certificate DKD-K-18701, no.161/06.2008)

Measuring uncertainty is 1.2 %.

The reported uncertainty is an expanded uncertainty, based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor  $k = 2$ , providing a level of confidence of approximately 95 %.

**6. Testing parameters:**

Voltage [kV]	Frequency [Hz]	Time [hours]
$4 \times U_0 = 48$	50	4

**Note.** No breakdown occurred.

**7. Test result:** The product passed the test.

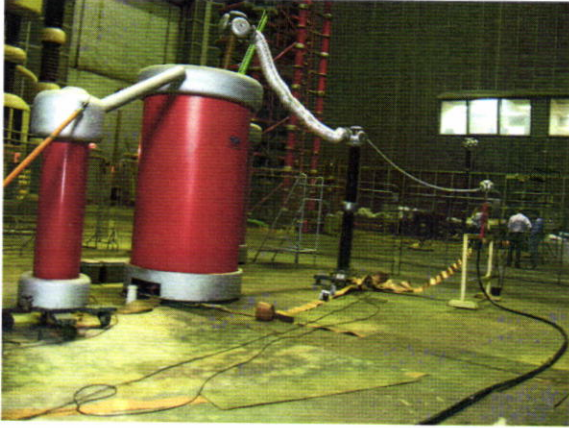


Photo 1



Photo 2

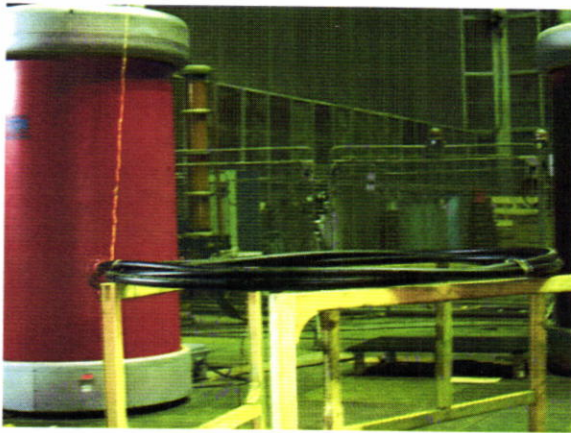


Photo 3

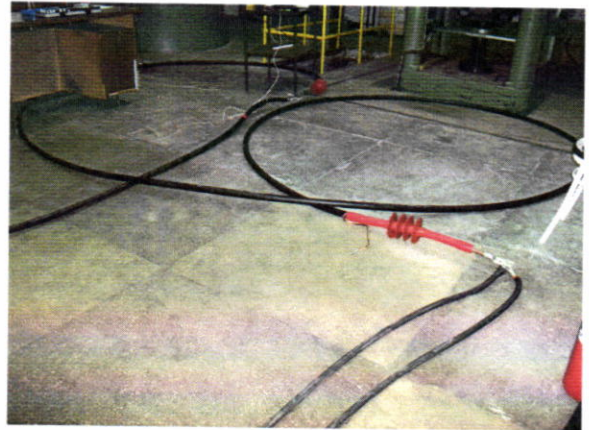


Photo 4

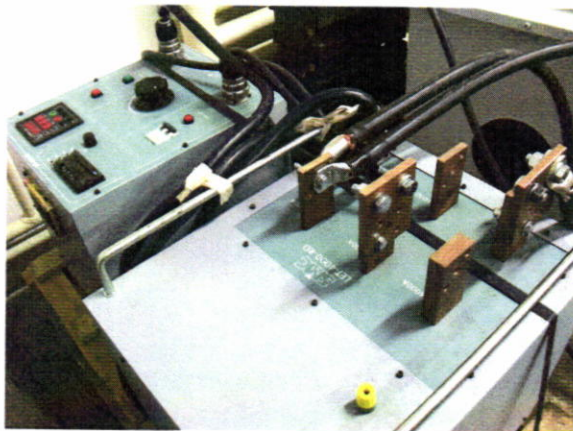


Photo 5



Photo 6



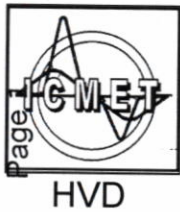
HOLDING COMPANY "KABLOVI" a.d.  
FKS-POWER CABLES FACTORY  
JAGODINA - SERBIA

IEC 60502-2

MAX S. (FL) 2Y

HD 620 - S 2; 2010

Part 10-C



TEST REPORT NO. 43031

**TECHNICAL DESCRIPTION OF MEDIUM VOLTAGE CABLE:  
Al-XLPE/Al foil/PEwp 12 / 20 (24) kV ; single-core**

The cable core shall be made of aluminium circular stranded compacted conductor, conductor screen of extruded semi-conducting cross-linked polyethylene layer (SC XLPE), insulation of cross-linked polyethylene (XLPE), insulation screen of extruded semi-conducting cross-linked polyethylene layer (SC XLPE).

The cable core shall be screened with metallic screen consisting of single concentric layer of annealed copper wires helically applied. Over screen all be wrapped insulating swellable tape with gap in counter helix and laminated aluminium-copolymer foil longitudinally applied with overlap. The cable shall be oversheathed with extruded black high-density polyethylene.

**STANDARD:** The cable shall be manufactured and tested in accordance with IEC 60502-2/2005 + HD 620 S1/1996 Part 5 Section K + A3/2007 and our technical data of May 19, 2011 Water penetration test shall be done in acc. with IEC 60502-2/05 point 19.22 Anex F.

**NOTES:**

- 1) The conductor screen (SC XLPE), insulation (XLPE) and insulation screen (SC XLPE) shall be extruded in single operation;
- 2) The extruded semi-conducting XLPE insulation screen shall be firmly bonded to the insulation;
- 3) The cross-linking process shall be Dry Cure Method by Nitrogen, which gives the cable excellent electrical, thermal and mechanical properties;
- 4) The swellable tape protect the cable against the penetration of water in longitudinal direction in copper screen area;
- 5) The aluminium-laminated copolymer tape protects the cable against the penetration of water in radial direction and aluminium part of tape is in electrical contact with copper screen.
- 6) The cable shall be delivered wound on non-returnable wooden drums;
- 7) An amount not exceeding the 20% of the total may be delivered in random lengths, but not shorter than 100 m;
- 8) The following text shall be embossed or printed on surface of the oversheath (for example):  
Al-XLPE/Al foil/PEwp 1 x 150/25 mm<sup>2</sup> 12/20 kV FKS-SERBIA and year of manufacture or according to buyer's requirement
- 9) Meter marking if required.

Code F-01.09.01(e)

May 19, 2011



Technical sector Manager

*Nikola Milojević*

Nikola Milojević, B.Sc.EE



HOLDING COMPANY "KABLOVI" a.d.  
FKS-POWER CABLES FACTORY  
JAGODINA - SERBIA



HVD

**CONSTRUCTIONAL CHARACTERISTICS OF CABLE TYPE:**  
**AI-XLPE/AI foil/PEwp 12/20(24) kV**

Description	Unit	Details
1. Standard to which cable confirms		
2. Cable Type	-	IEC 60502-2/2005 + HD 620 S1:1996 Part 5 Section K + A3/2007
3. Nominal service voltage $U_0/U$	-	AI-XLPE/AI foil/PEwp
4. Conductor material	kV	12/20
5. Conductor size	-	Aluminium
6. Minimum thickness of extruded SC conductor screen	mm <sup>2</sup>	150
7. Nominal thickness of XLPE insulation	mm	0.3
8. Minimum thickness of extruded SC insulation screen	mm	5.5
9. Nominal cross-section area of copper screen	mm	0.3
10. Thickness of swellable tape, approx.	mm <sup>2</sup>	25
1. Thickness of aluminium in Al-copolymer foil	mm	0.3 - 0.35
2. Nominal thickness of outer sheath	mm	0.2
3. Overall diameter of completed cable, approx.	mm	2.0
4. Delivery length per reel (+/- 5%), approx.	mm	35
5. Weight of conductor per 1000 m of cable, approx.	m	1000
6. Weight of copper screen, approx.	kg/km	395
7. Weight of completed cable per 1000 m, approx.	kg/km	105
8. Gross mass of full cable reel, approx.	kg/km	1195
9. Flange diameter of cable reel	kg	1445
10. Diameter of sides of cable drum	mm	1600
1. Core diameter of cable drum	mm	1600
2. Width of cable reel	mm	700
	mm	1030



Technical sector Manager  
*Nikola Milojević*  
Nikola Milojević, B.Sc.EE