

INFLUENȚA APEI ȘI A SOLICITĂRILOR TERMICE ASUPRA SPECTRULUI DIELECTRIC AL POLIETILENEI PENTRU CABLURI DE ENERGIE

Laura ANDREI și Florin CIUPRINA
Laboratorul de Materiale Electrotehnice - ELMAT,
Facultatea de Inginerie Electrică, Universitatea Politehnică București
elandrei@elmat.pub.ro, florin@elmat.pub.ro

Rezumat. Proprietățile dielectrice – partea reală și cea imaginară a permitivității – au fost analizate prin spectroscopie dielectrică, în domeniul de frecvență 10^{-2} – 10^6 Hz și în gama de temperatură 30 – 70 °C, pentru eșantioane decupate din polietilenă reticulată cu aditivi retardatori (TRXLPE) și condiționate în trei moduri diferite: mediu ambiant, imersate și menținute în apă timp de o săptămână și, apoi, solicitate termic accelerat timp de o lună. Unul dintre scopurile acestei lucrări a fost de a se arăta stabilitatea electrică a polietilenei reticulate cu aditivi-retardatori. Prin intermediul testelor de spectroscopie dielectrică a fost analizată influența celor două tipuri de solicitări (apă și căldură) asupra proprietăților dielectrice ale polietilenei pentru izolații ale cablurilor de energie de medie tensiune. Un alt scop al lucrării a fost să arate încă o dată că spectroscopia dielectrică este o unealtă performantă ce permite caracterizarea materialelor dielectrice utilizate în sistemele de izolație ale cablurilor într-o gamă largă de frecvențe și de temperaturi și, implicit, înțelegerea comportamentului acestor materiale în diferitele condiții de funcționare (variații de temperatură, umiditate sau degradare termică).

1. INTRODUCERE

Studiul de față are ca scop analizarea influenței apei și a solicitărilor termice asupra răspunsului dielectric al eșantioanelor din TRXLPE. Polietilena reticulată cu aditivi retardatori a fost aleasă pentru acest studiu datorită utilizării ei pe scară foarte largă în construcția sistemelor de izolație a cablurilor de energie [1-7]. Durata de utilizare a cablurilor de energie subterane este, de regulă, mult peste 30 ani, în tot acest timp izolațiile cablurilor fiind supuse la acțiunea apei prezente în pământ, precum și la variații mari de temperatura datorate atât modificării temperaturii solului, cât și variațiilor de temperatura a conductorului în timpul funcționării cablului [7]. În urmă solicitărilor pe care un sistem de izolație al unui cablu de energie le poate suferi în perioada de funcționare au loc transformări structurale ireversibile ce conduc la degradarea izolației, deci la îmbătrânirea acesteia, în literatură fiind numeroase articole care studiază diferite aspecte legate de durata de viață a izolațiilor polimerice ale cablurilor [7,8]. Pe de altă parte, este foarte important pentru utilizatorii de cabluri să cunoască cum și cât de mult afectează prezența apei și a modificărilor de temperatură, proprietățile dielectrice ale izolațiilor cablurilor și, deci, funcționarea acestora în timpul duratei de viață. La această întrebare încearcă să prezinte răspunsuri lucrarea de față, evident pentru câteva situații punctuale ale solicitărilor. Metodă de studiu a constatat în introducerea de eșantioane plane de TRXLPE în apă deionizată și apoi într-o etuvă la temperatura de 90 °C, iar modificările produse de aceste solicitări asupra proprietăților dielectrice a fost analizată prin teste de spectroscopie dielectrică în gama de frecvențe 10^{-2} - 10^6 Hz și la temperaturi între 30 și 70 °C, efectuate înainte și după fiecare dintre solicitări.

2. DETERMINARI EXPERIMENTALE

Eșantioanele din polietilenă reticulată cu aditivi retardatori de arborescențe de apă (TRXLPE), utilizate în cadrul determinărilor experimentale prezentate în această lucrare, au fost realizate prin presare la cald, utilizând granule polimerice furnizate de către grupul Borealis. Pentru fiecare tip de material s-au testat câte două eșantioane plane sub formă de disc cu diametrul de 40 mm. Grosimea eșantioanelor utilizate a fost de aproximativ 0,5 mm.

Măsurările dielectrice s-au realizat în Laboratorul de Materiale Electrotehnice (ELMAT), Facultatea de Inginerie Electrică, Universitatea Politehnică din București. Pentru determinarea experimentală a părții reale a permitivității electrice (ϵ_r') și a părții imaginare a permitivității electrice (ϵ_r''), a fost utilizat un spectrometru dielectric NOVOCONTROL (Figura 1 (a)), echipat cu celulă de măsură ZGS pentru eșantioane solide și lichide (Figura 1 (b)).

Pentru efectuarea măsurărilor prin spectroscopie dielectrică s-au montat eșantioanele de TRXLPE între electrozii celei active ZGS (Figura 1 (b)), iar apoi s-au setat condițiile de măsurare cu ajutorul soft-ului WinDETA. Eșantionul de TRXLPE montat între cei doi electrozi formează un condensator căruia i se aplica o tensiune la o anumită frecvență. Această tensiune determină apariția unui curent de aceeași frecvență prin eșantionul de test. Defazajul dintre tensiunea aplicată și curentul care apare este folosit pentru determinarea mărimilor dielectrice care fac obiectul acestui studiu (ϵ_r' și ϵ_r'').



Figura 1. (a) Spectrometrul dielectric NOVOCONTROL: 1-calculator; 2-sistem MICTROTRONIC de control al temperaturii; 3-unitatea centrală Alpha-A; 4-celula de măsură ZGS; 5-celula de temperatură NOVOTHERM, (b) Eșantion TRXLPE în celula activă ZGS a spectrometrului.

Partea reală a permitivității electrice (ϵ_r') și partea imaginară a permitivității electrice (ϵ_r'') s-au determinat în gama de frecvențe 10^{-2} - 10^6 Hz, la temperaturi între 30 și 70 °C cu un pas de creștere a temperaturii de 20 °C și o menținere la temperatura de măsurare timp de 10 minute în celula de măsură a spectrometrului dielectric înainte de a se înregistra datele experimentale. Au fost testate prin spectroscopie dielectrică două eșantioane de TRXLPE sub formă de disc cu diametrul de 40 mm, media rezultatelor obținute fiind prezentată în cele ce urmează. Coeficientul de variație a fost de sub 1% pentru partea reală a permitivității, iar pentru partea imaginară de 18%, ceea ce indică o bună reprezentativitate a mediei rezultatelor pentru ambele mărimi analizate.

Așadar, pentru a se putea observa influența factorilor externi (apa și căldura) asupra comportamentului dielectric al eșantioanelor de TRXLPE s-au realizat teste de spectroscopie dielectrică în trei condiții diferite și anume:

- măsurări inițiale (Inițial) - înainte începerii procedurilor de testare a influenței factorilor externi;
- măsurări după imersarea în apă (**Umed**) - eșantioanele au fost introduse în apă deionizată pentru 163 de ore, la temperatura camerei;
- măsurări după solicitarea termică - eșantioanele au fost îmbătrânite termic într-o etuvă Caloris-ECv-100 sub jet de aer la temperatura de 90 ± 2 °C pentru 680 de ore (4 săptămâni), fiind măsurate prima dată după 163 de ore (Solicitat termic I), apoi după 493 de ore (Solicitat termic II), iar în final după 680 ore (Solicitat termic III).

3. REZULTATE ȘI DISCUȚII

Influența apei și a solicitărilor termice efectuate asupra spectrului dielectric al eșantioanelor din TRXLPE poate fi observată în figurile 2-6, unde sunt prezentate variațiile părții reale a permitivității relative complexe (ϵ_r') și ale părții imaginare a permitivității electrice (ϵ_r'') cu frecvența câmpului electric, determinate la temperaturi între 30 și 70 °C.

Analiza tuturor rezultatelor obținute are la bază faptul că spectroscopia dielectrică evidențiază fenomenele de conducție și polarizare ce au loc în eșantioanele testate la diferite frecvențe și temperaturi. Variația cu frecvența atât a părții reale ϵ_r' cât și a părții imaginare ϵ_r'' a permitivității complexe indică, pe de o parte fluctuații spațiale ale dipolilor, adică a sarcinilor electrice legate (sau cvasi-legate) care determină polarizarea electrică, iar pe de altă parte deplasarea putătorilor de sarcină (cvasi)liberi (electroni sau ioni) responsabili cu realizarea conducției electrice în eșantioanele studiate. De asemenea, spectrele dielectrice permit evaluarea acumulării sarcinilor electrice atât pe interfețele dintre diferitele regiuni omogene ale compozițiilor polimerice, ce determină polarizația interfacială sau Maxwell/Wagner, precum și pe suprafețele de contact dintre electrozi și eșantion, acestea conducând la așa numită polarizație la electrozi. Maximele variațiilor lui ϵ_r'' , corelate cu scăderi relativ bruște ale lui ϵ_r' indică dispariția unor mecanisme de polarizare, adică o relaxare dielectrică la acele frecvențe ale câmpului electric.

Astfel, având în vedere aceste considerente, curbele obținute după testele prin spectroscopie dielectrică în starea inițială, după imersarea în apă și după solicitările termice se pot desprinde următoarele:

- Atât la eșantioanele în starea inițială, cât și după fiecare dintre solicitări, valorile lui ϵ_r' scad cu creșterea temperaturii de măsură, datorită agitației termice care îngreunează orientarea dipolilor odată cu creșterea temperaturii. Se remarcă, de asemenea o stabilitate a valorilor permitivității reale cu frecvența în gama 1-10⁴ Hz, la fiecare dintre temperaturile de măsură.
- Valorile permitivității imaginare ϵ_r'' scad cu până la două ordine de mărime odată cu creșterea temperaturii de măsură de la 30 la 70 °C, ceea ce arată că funcționarea la temperaturi mai mari are loc cu diminuarea pierderilor dielectrice, aspect extrem de important în exploatarea cablurilor. Această scădere a valorilor ϵ_r'' cu creșterea temperaturii se menține atât după imersarea în apă cât și după solicitările termice. O

explicație a diminuării valorilor permitivității imaginare din gama $1-10^4$ Hz la temperaturi mari este aceea că, la frecvențe din vecinătatea celor industriale, acumularea de sarcini pe diferitele interfețe din compoundurile TRXLPE este îngreunată de intensificarea agitației termice, ceea ce reduce considerabil polarizarea interfacială.

- O creștere a părții imaginare a permitivității relative odată cu scăderea frecvenței, coroborată cu creșterea părții reale a permitivității pe măsura scăderii frecvenței se remarcă în spectrele de la temperatura de 30°C , indiferent de solicitarea la care au fost supuse eșantioanele, ceea ce indică o polarizare la electrod datorată acumulării unor sarcini electrice la interfața electrod-eșantion. Prezența apei din cazul eșantioanelor umede amplifică aceasta polarizare și determină intensificarea conducerii electrice, așa cum reiese din creșterea mai accentuată a lui ϵ_r'' de la frecvențe joase (Figura 3).
- Un maxim accentuat se remarcă în curba de variație a lui ϵ_r'' în regiunea frecvențelor înalte, $10^5 - 10^6$ Hz. Acest maxim evidențiază o relaxare dielectrică, posibil datorată unor grupări polare provenite de la aditivii retardatori și fixate lateral pe lanțurile principale ale polietilenei și/sau moleculelor de apă absorbite în timpul procesului de fabricație [6]. După imersarea în apă a eșantioanelor, maximum de la frecvențe mari devine mai larg, ceea ce înseamnă că apa are rol de plastifiant dând posibilitatea dipolilor să se orienteze mai mult după frecvența câmpului electric. În urma solicitărilor termice consecutive imersării în apă acest maxim redevine mai ascuțit, ceea ce arată că o parte din moleculele de apă sunt eliminate și valorile ϵ_r'' redevin apropiate de cele din starea inițială.
- Pe măsură ce durata de solicitare termică se mărește, creșterea valorilor părții imaginare a permitivității relative odată cu scăderea frecvenței devine din ce în ce mai importantă. Aceasta arată o creștere a numărului de sarcini mobile, posibil ca urmare a unei oxidări termo-oxidative mai accentuate odată cu mărirea duratei de solicitare termică a eșantioanelor de TRXLPE.

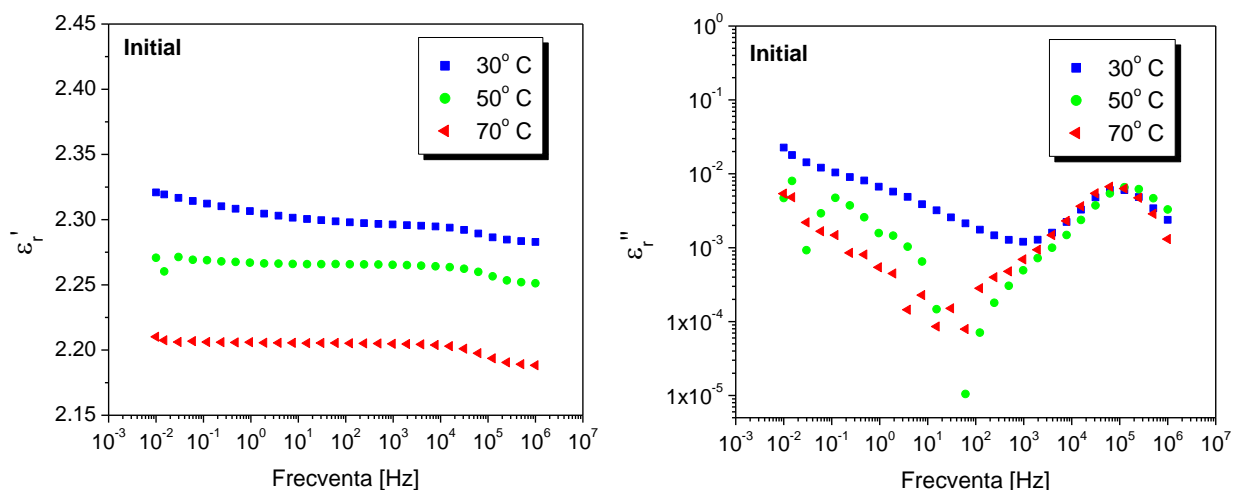


Fig. 2. Variația cu frecvența pentru ϵ_r' și ϵ_r'' pentru eșantioanele de TRXLPE în starea inițială, la diferite temperaturi.

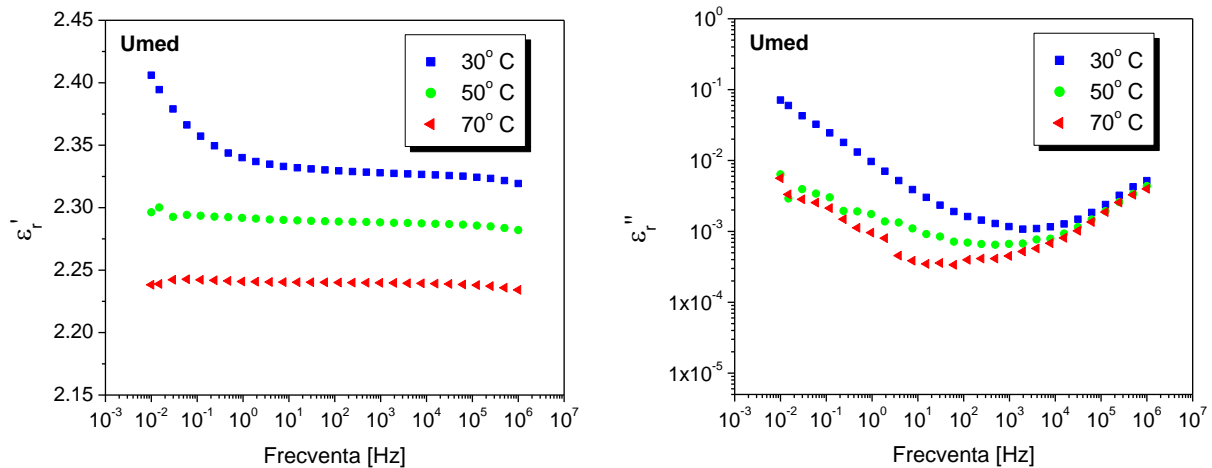


Fig. 3. Variația cu frecvența pentru ϵ_r' și ϵ_r'' pentru eșantioanele de TRXLPE umede, la diferite temperaturi.

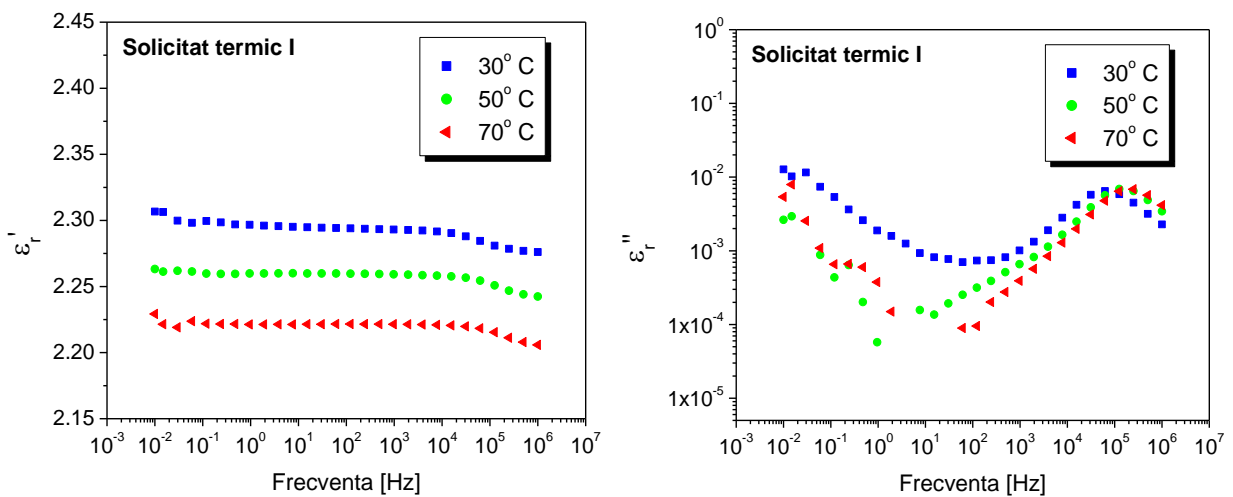


Fig. 4. Variația cu frecvența pentru ϵ_r' și ϵ_r'' pentru eșantioanele de TRXLPE după prima solicitare termică, la diferite temperaturi.

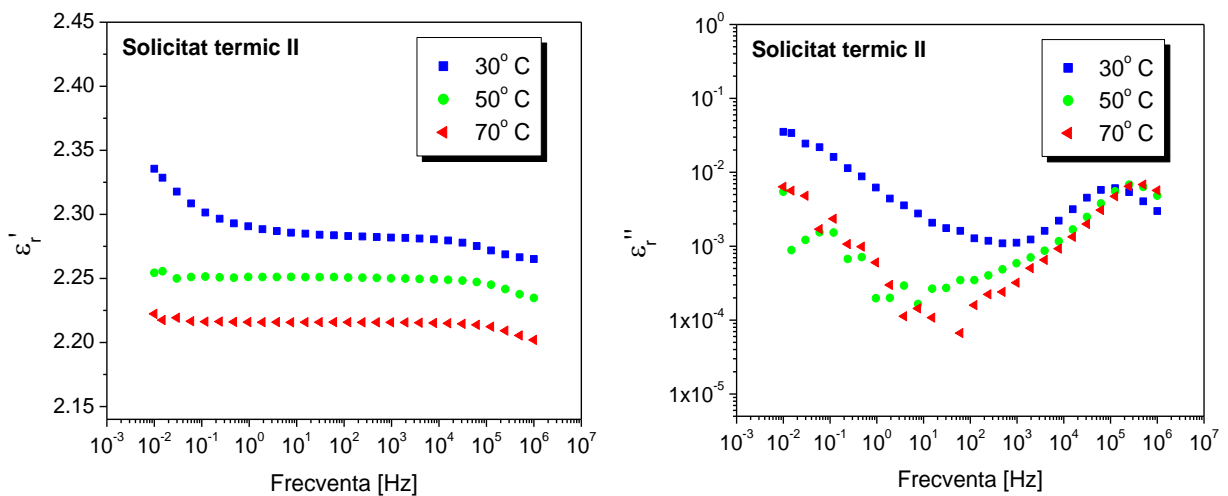


Fig. 5. Variația cu frecvența pentru ϵ_r' și ϵ_r'' pentru eșantioanele de TRXLPE după a II-a solicitare termică, la diferite temperaturi.

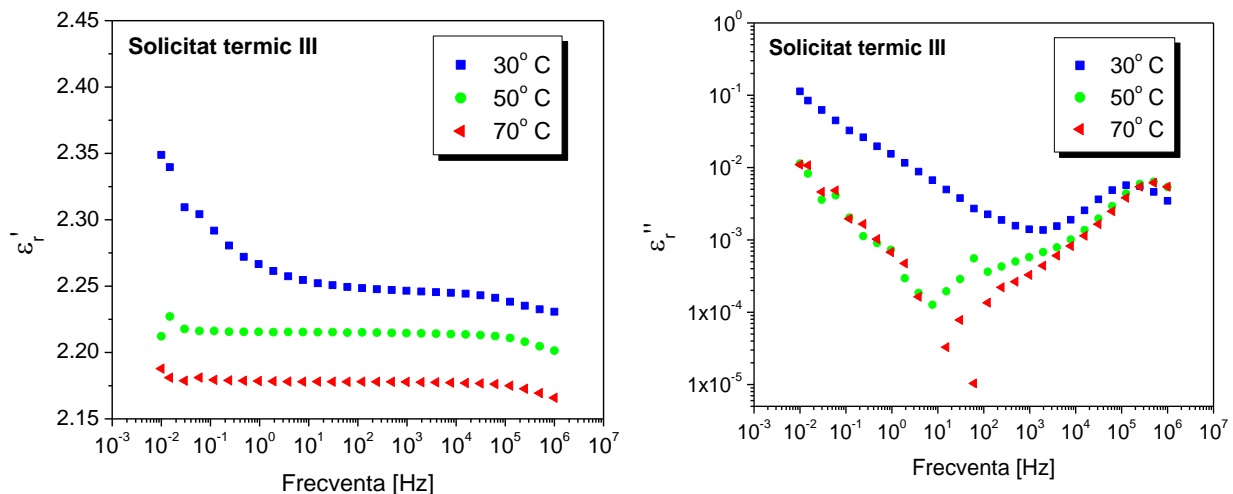


Fig. 6. Variația cu frecvența pentru ϵ_r' și ϵ_r'' pentru eșantioanele de TRXLPE după a III-a solicitare termică, la diferite temperaturi.

4. CONCLUZII

Rezultatele obținute în cadrul acestui studiu arată o influență importantă a temperaturii de măsură atât asupra părții reale cât și asupra părții imaginare a permitivității complexe a eșantioanelor de TRXLPE analizate, indiferent de tipul solicitării. Astfel, valorile lui ϵ_r'' din gama $1-10^4$ Hz scad cu până la două ordine de mărime odată cu creșterea temperaturii de măsură de la 30 la 70 °C, ceea ce arată diminuarea pierderilor dielectrice în timpul funcționării cablurilor la temperaturi mai mari. Prezența apei din cazul eșantioanelor umede amplifică polarizarea la electrod și determină intensificarea conducerii electrice din TRXLPE, mărind astfel pierderile dielectrice. Solicitățile termice conduc la eliminarea moleculelor de apă și spectrele dielectrice revin la valori apropiate de cele inițiale. Pe măsură ce durata de solicitare termică se mărește, creșterea valorilor părții imaginare a permitivității relative odată cu scăderea frecvenței devine din ce în ce mai importantă.

BIBLIOGRAFIE

- [1] F. Ciuprina, PhD Thesis, POLITEHNICA Univ. of Bucharest, 1997.
- [2] S. Nilsson, T. Hjertberg, A. Smedberg, B. Sonerud, "Influence of Morphology Effects on Electrical Properties in XLPE", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 121, pp. 3483-3494, 2011.
- [3] L. Castellani, F. Peruzzotti, A. Zaopo, P.L. Cinquemani, S. Foulger, J.C. Filippini, V. Lachevre, "Evaluation of Materials for WTR-insulated Power Cables", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 7, No. 6, pp. 818-824, 2000.
- [4] T. Blythe, D. Bloor, *Electrical Properties of Polymers*, Cambridge University Press, 2005.
- [5] F. Kremer, A. Schönhal, *Broadband dielectric spectroscopy*, Springer, 2003.
- [6] D.K. Das-Gupta, P.C.N. Scarpa, "Polarization and Dielectric Behavior of ac-aged polyethylene", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 3, No. 3, pp. 366-374, 1996.
- [7] I.A. Metwally, „The Evolution of Medium Voltage Power Cables”, *IEEE Potentials*, vol. 31, nr. 3, pp. 20 - 25, 2012.
- [8] J.C. Fothergill, S.J. Dodd, L.A. Dissado, T. Liu, U.H. Nilsson, "The Measurement of Very Low Conductivity and Dielectric Loss in XLPE Cables: A Possible Method to Detect Degradation Due to Thermal Aging" *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 18, No. 5, pp. 1544-1553, 2011.