

REPARTIȚIA CÂMPULUI ELECTRIC ÎNTR-UN DIELECTRIC ÎN PREZENȚA SARCINII SPAȚIALE

Cristina Stancu¹⁾, P.V. Noțingher¹⁾

¹⁾ *Laboratorul de Materiale Electrotehnice – Universitatea Politehnica din București, Splaiul Independenței, Nr.313, 060042, București, Romania, cstancu@elmat.pub.ro*

ABSTRACT

Este bine cunoscut faptul că, sarcina spațială existentă în izolatori (generată în procesele de fabricație sau apărută în timpul funcționării acestora (injecția de la electrozi, descărcări parțiale etc.)) modifică repartiția câmpului electric. Aceasta poate conduce la creșterea valorilor locale ale lui E peste valorile la care se inițiază arborescențele electrice, care generează străpungerile izolațiilor. O sursă importantă de sarcină spațială o constituie ionii care pătrund în izolații în timpul dezvoltării arborescențelor de apă. Calculul câmpului electric este prezentat în numeroase lucrări, pentru diferite configurații ale electrozilor: plan-plan [1], ac-plan [1-2], ac-ac [1], în absența și în prezența arborescențelor electrice și de apă. În cazul arborescențelor de apă nu se ia în considerare sarcina spațială corespunzătoare ionilor, ci doar modificarea permitivității electrice. În lucrarea de față se prezintă un calcul al repartiției câmpului electric în eșantioane plane și ac-plan, în prezența sarcinii spațiale corespunzătoare arborescențelor și injectate de electrozi, considerând regimul câmpului electric, fie electrostatic, fie electrocinetic staționar.

1. INTRODUCERE

Unul din factorii importanți care conduc la scoaterea din uz a echipamentelor electrice este străpungerea sistemelor de izolație ale acestora. Străpungerea izolațiilor se produce, printre altele, datorită apariției și dezvoltării arborescențelor de apă. Arborescențele de apă se formează în special în zonele din izolații care prezintă defecte (impurități, cavități etc.) sau în cele aflate în vecinătățile electrozilor care prezintă protuberanțe și se datorează apei existente, deja, în izolațiile polimerice sau cu care izolațiile vin în contact, sub acțiunea câmpului electric. Ca urmare a existenței acestor arborescențe, câmpul electric își modifică integral repartiția (slăbește în interiorul zonelor din arborescențe și se intensifică în exteriorul acestora). Pe de altă parte, producerea arborescențelor conduce la difuzia în interiorul izolației a unor ioni (pozitivi și negativi) rezultați din disocierea sărurilor conținute în apă, care formează o sarcină spațială ce va modifica, la rândul ei, repartiția câmpului electric. Informații privind existența acestor ioni și a modului lor de repartiție, în interiorul și în exteriorul arborescențelor, sunt prezentate în [3]. Inițierea și dezvoltarea arborescențelor în eșantioane din polietilenă aflate în diferite stadii de îmbătrânire sunt prezentate în diferite lucrări, printre care [1] și [6]. Ele scot în evidență rolul decisiv al câmpului electric în formarea și dezvoltarea arborescențelor, precum și importanța pe care o prezintă caracteristicile electrolitului utilizat și structura fizico-chimică și starea de îmbătrânire a izolațiilor asupra formelor, duratelor de inițiere și a vitezelor de dezvoltare a arborescențelor.

Cercetările efectuate până în prezent referitoare la calculul repartiției câmpului electric în izolații îmbătrânite sub acțiunea apei și a câmpului electric, au fost efectuate în absența

sarcinii spațiale. În această lucrare se prezintă calculul repartiției câmpului electric în absența și în prezența arborescențelor de apă și a sarcinii spațiale aferente acestora, plecând de la rezultatele experimentale obținute de Vișata [3], privind variația concentrației de ioni din interiorul și exteriorul arborescențelor de apă.

2. CALCULUL CÂMPULUI ELECTRIC

2.1. Eșantioane plane

S-a considerat, pentru început, cazul eșantioanelor plane din polietilenă sau policlorură de vinil, de grosime $d = 0.5$ mm, în care s-au produs arborescențe de apă foarte dese (tip «pădure») de lungime l_a și de permitivitate relativă cunoscută și care se află sub o diferență de potențial $V_1 - V_2$ cunoscută ($V_1 = 4$ kV și $V_2 = 0$). Pe baza rezultatelor prezentate în [3] s-a considerat o variație a densității de volum a sarcinii corespunzătoare ionilor din interiorul arborescențelor de forma :

$$\rho_v = \frac{\rho_{v0}}{\varepsilon} (az^2 - bz + 0.906) \quad (1)$$

în care $a = 2 \cdot 10^7$ și $b = 8161.8$

De asemenea, s-a presupus existența unei sarcini spațiale în zonele din eșantioane aflate în exteriorul arborescențelor, de densitate variabilă. Pentru început s-a considerat o variație liniară a acesteia. Pentru efectuarea calculului (în sistemul de coordonate cartezian intensitatea câmpului electric variind doar după axa Oz – perpendiculară pe suprafața plană a eșantionului) s-a considerat regimul electrostatic al câmpului electric.

În funcție de valorile lungimilor arborescențelor și a existenței sau a inexistenței sarcinii în exteriorul lor s-au analizat trei cazuri distincte.

a. *Cazul unui singur domeniu.* Acest caz corespunde existenței unor arborescențe care s-au dezvoltat de la un electrod la altul, respectiv pentru care $l_a = d$. Plecând de la ecuația lui Poisson $\Delta V = -\rho_v / \varepsilon$, în care ρ_v este dat de relația (1), și punând condițiile pe frontiere $V_1(0) = V_1$ și $V_2(d) = 0$, se obțin expresiile potențialului $V(z)$ și a intensității câmpului electric :

$$V(z) = -\frac{\rho_{v0}}{\varepsilon} \left(a \frac{z^4}{12} - b \frac{z^3}{6} + 0.906 \frac{z^2}{2} \right) + C_1 z + C_2 \quad (2)$$

$$E(z) = \frac{\rho_{v0}}{\varepsilon} \left(a \frac{z^3}{3} - b \frac{z^2}{2} + 0.906z \right) - C_1 \quad (3)$$

b. *Cazul a două subdomenii.* Acest caz corespunde existenței unor arborescențe care s-au dezvoltat pe o distanță mai redusă, respectiv $l_a = 200$ μm . Domeniul de calcul este constituit din două subdomenii: subdomeniul 1 în care se află arborescențele și în care densitatea de volum a sarcinii spațiale este dată de relația (1) și subdomeniul 2, corespunzător zonei din eșantion fără arborescențe, fără sau cu sarcină, a cărei densitate scade liniar cu coordonata z . Punând condițiile pe frontiere ($V_1(0) = V_1$ și $V_2(d) = 0$) și de trecere $V_1(l_a) = V_2(l_a)$ și $E_1(l_a) = E_2(l_a)$ se obțin expresiile lui V și E :

$$V_1(z) = -\frac{\rho_{v0}}{\varepsilon} \left(a \frac{z^4}{12} - b \frac{z^3}{6} + 0.906 \frac{z^2}{2} \right) + C_1 z + C_2 \quad (4)$$

$$V_2(z) = C_3 z + C_4 \quad (5)$$

$$E_1(z) = \frac{\rho_{v0}}{\varepsilon} \left(a \frac{z^3}{3} - b \frac{z^2}{2} + 0.906 z \right) - C_1 \quad (6)$$

$$E_2(z) = -C_3 \quad (7)$$

c. *Cazul a trei subdomenii.* În acest caz se consideră că în zona din fața arborescențelor există un strat de sarcină spațială, a cărei densitate scade cu coordonata z , anulându-se în punctele de coordonată $z = l_s$. Domeniul de calcul este format din trei subdomenii : subdomeniul 1 – care conține arborescența și, deci, și sarcina spațială de densitate dată de relația (1) – de permitivitate $\varepsilon_1 = 3\varepsilon_2$, subdomeniul 2 – care conține sarcina spațială a cărei densitate scade linear spre 0 – de permitivitate $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ și subdomeniul 3 – fără sarcină – de permitivitate ε_3 . Cu ajutorul condițiilor pe frontiere și de trecere ($V_1(0) = V_1$, $V_3(d) = 0$, $V_1(l_a) = V_2(l_a)$, $E_1(l_a) = E_2(l_a)$, $V_2(l_s) = V_3(l_s)$, $E_2(l_s) = E_3(l_s)$) se obțin expresiile lui V și E în cele trei subdomenii :

$$V_1(z) = -\frac{\rho_{v0}}{\varepsilon} \left(a \frac{z^4}{12} - b \frac{z^3}{6} + 0.906 \frac{z^2}{2} \right) + C_1 z + C_2 \quad (8)$$

$$V_2(z) = \frac{\rho_{v0} l_s}{\varepsilon (l_s - l_a)} \left[\left(a \frac{z^4}{12} - b \frac{z^2}{2} + 0.906 z \right) \frac{z^3}{6} \right] + C_3 z + C_4 \quad (9)$$

$$V_3(z) = C_5 z + C_6 \quad (10)$$

$$E_1(z) = \frac{\rho_{v0}}{\varepsilon} \left(a \frac{z^3}{3} - b \frac{z^2}{2} + 0.906 z \right) - C_1 \quad (11)$$

$$E_2(z) = -\frac{\rho_{v0} l_s}{\varepsilon (l_s - l_a)} \left[\left(a \frac{z^3}{3} - b z + 0.906 \right) \frac{z^2}{2} \right] - C_3 \quad (12)$$

$$E_3(z) = -C_5 \quad (13)$$

2.2. Eșantioane ac-plan.

Se consideră cazul unor protuberanțe care se modelează cu ajutorul unor electrozi aderenți de tip ac (de formă hiperboloidală sau conică) și care injectează în izolanți purtători de sarcină. Concentrația acestora depinde de valorile intensității câmpului electric E și de

caracteristicile suprafețelor de contact electrod-izolant. Pentru calculul potențialului și al intensității câmpului electric se consideră domeniul omogen D (fig. 1) cu simetrie axială, având permitivitatea electrică ε și conductivitatea σ cunoscute, mărginit de hiperboloidul de revoluție S_1 (electrodul ac) și planul S_2 (electrodul plan). Domeniul D se consideră extins până la un elipsoid S_3 , suficient de îndepărtat, astfel încât $\partial V / \partial n = 0$ în orice punct aparținând suprafeței S_3 .

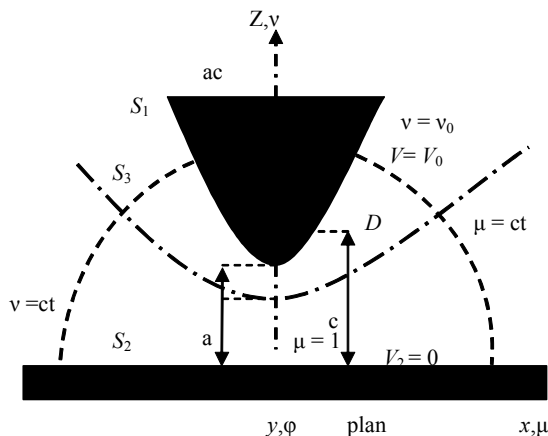


Fig. 1. Configurație ac-plan.

Pentru efectuarea calculului se adoptă un model fizic bazat pe ipotezele:

- Mediul este linear, omogen și izotrop, respectiv: $\overline{D}(P) = \varepsilon \overline{E}(P)$, $P \in D$;
- Regimul câmpului electric este cel electrocinetic staționar, respectiv: $\overline{E}(P) = -\text{grad}V(P)$, $\Delta V(P) = -\rho_v(P)/\varepsilon$, $\text{grad}V(P) \cdot \text{grad}[1/\rho_v(P)] = -1/\varepsilon$, $P \in D$;
- Condițiile pe frontieră sunt: $V(M) = V_1$, $M \in S_1$, $V(M) = V_2$, $M \in S_2$, $(dV/dn) = 0$, $M \in S_3$, $\rho_v(M) = \rho_{v0}(M)$, $M \in S_1$.

Pentru simplificarea calculelor se utilizează sistemul de coordonate al sistemului de coordonate alungit (μ, ν, φ) , frontierele lui D reprezentând suprafețe de coordonate, respectiv:

$x = c\sqrt{(\mu^2 - 1)(1 - \nu^2)} \cos \varphi$, $y = c\sqrt{(\mu^2 - 1)(1 - \nu^2)} \sin \varphi$, $z = c\nu\mu$, unde c reprezintă distanța focală corespunzătoare rețelei de hiperboloizi și elipsoizi omofocali.

Datorită simetriei de rotație, problema determinării mărimilor V și \overline{E} se reduce la o problemă bidimensională, acestea depinzând doar de coordonatele μ și ν . Parametrii Lamé sunt

dați de relațiile: $e_\mu = c\sqrt{(\mu^2 - \nu^2)/(\mu^2 - 1)}$, $e_\nu = c\sqrt{(\mu^2 - 1)(1 - \nu^2)}$ și $e_\varphi = c\sqrt{(\mu^2 - 1)(1 - \nu^2)}$. Utilizând mărimile raportate V și E , ecuațiile anterioare se

simplifică, iar condițiile pe frontieră iau formele: $V(M) = 1$, $M \in S_1$, $V(M) = 0$, $M \in S_2$, $\partial V / \partial n = 0$, $M \in S_3$, $f(M) = f_0(M)$, $M \in S_1$, unde s-a făcut notația $f(P) = \rho_v(P)$, $P \in D$

Determinarea potențialului și a densității de volum a sarcinii electrice se face prin metoda aproximărilor successive: se consideră, la început, $f_0(P) = 0$ și se determină, prin metoda elementelor finite, soluția laplaceană $V_1(P)$, $P \in D$. Se introduce $V_1(P)$ în ecuația de ordinul I și se determină, prin metoda diferențelor finite, $f_1(P)$; apoi, din ecuația Poisson, se determină $V_2(P)$ ș.a.m.d., procesul de calcul se continuă până la obținerea soluției finale $(V_n(P), f_n(P))$, $P \in D$, soluție care satisface relațiile de mai jos :

$$\varepsilon_{nV} = \left\| \frac{V_n(P) - V_{n-1}(P)}{V_n(P)} \right\| \leq \varepsilon_V$$

$$\varepsilon_{nf} = \left\| \frac{f_n(P) - f_{n-1}(P)}{f_n(P)} \right\| \leq \varepsilon_f$$

ε_V și ε_f fiind de ordinul a 0,001.

3. REZULTATE

În figurile 2 – 4 sunt prezentate variațiile potențialului și ale intensității câmpului electric în eșantioane plane, de permitivitate relativă 2,2 și 4, pentru diferite configurații ale domeniului de calcul și pentru diferite valori ale densității de volum maxime ale sarcinii spațiale. În cazul unui singur domeniu (fig. 2) se constată că intensitatea câmpului electric scade ușor în vecinătatea electrodului de potențial înalt și crește în vecinătatea celuilalt, dar că nu există diferențe importante între valorile potențialului și ale câmpului electric pentru valori ale densității de sarcină mai mici de 10^{-3}C/m^3 . În figura 3 se poate observa că apare o variație importantă a câmpului electric în zona de trecere de la domeniul 1 la domeniul 2 și că această perturbare este cu atât mai importantă cu cât densitatea de sarcină are o valoare mai mare. În cazul existenței a trei subdomenii (fig. 4) apare un salt important al câmpului electric la interfața dintre subdomeniile 2 și 3, respectiv în punctele de coordonată $z = l_s = 250 \mu\text{m}$.

În figura 5 sunt prezentate variațiile intensității câmpului electric (E), ale potențialului (V) și ale densității de volum a sarcinii spațiale (ρ_v) în funcție de distanța față de electrodul ac. Se poate observa că, intensitatea câmpului electric se reduce în vecinătatea electrodului ac și se intensifică în vecinătatea electrodului plan, de unde se poate trage concluzia că, sarcina spațială are un pronunțat efect de ecranare.

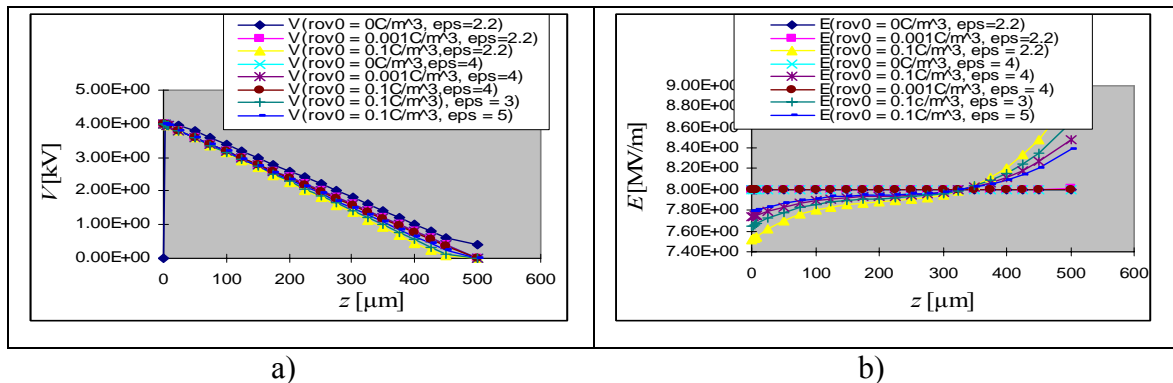


Fig. 2. Variația potențialului V (a) și a intensității câmpului electric E (b) în funcție de coordonata z , în cazul existenței unui singur subdomeniu.

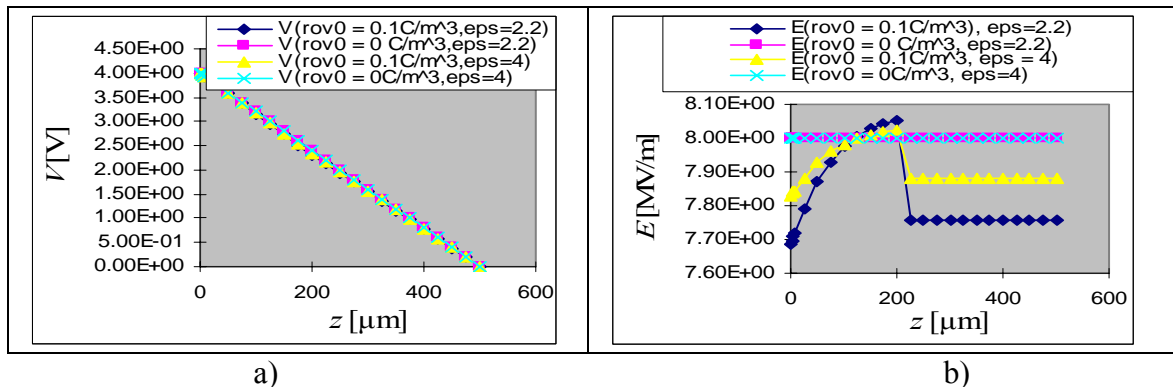


Fig. 3. Variația potențialului V (a) și a intensității câmpului electric E (b) în funcție de coordonata z , în cazul existenței a două subdomenii.

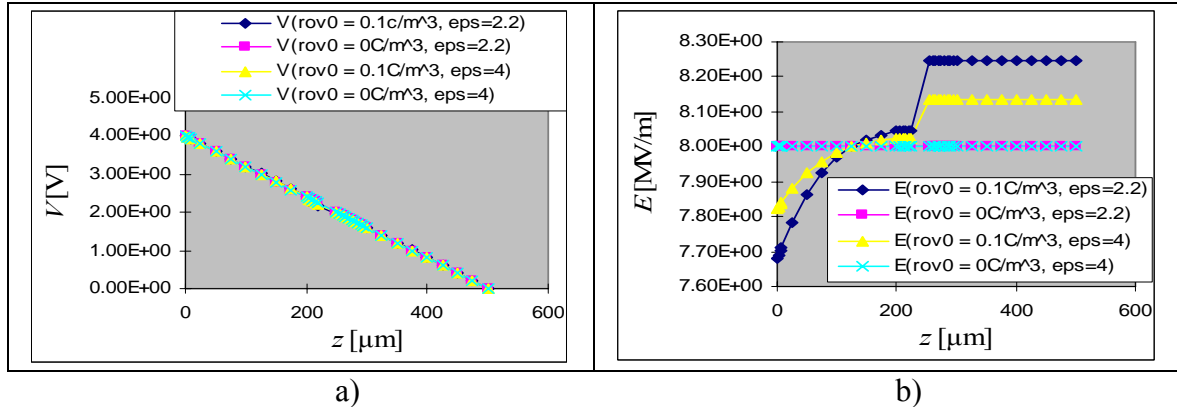


Fig. 4. Variația potențialului V (a) și a intensității câmpului electric E (b) în funcție de coordonata z , în cazul existenței a trei subdomenii.

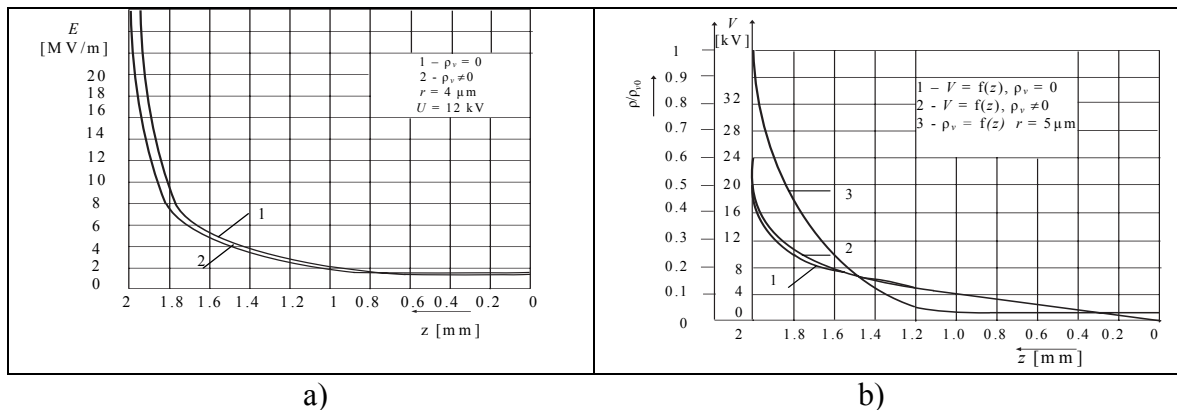


Fig. 5. Variația intensității câmpului electric (a), a potențialului electric și a densității de sarcină (b), în funcție de coordonata z .

4. CONCLUZII

În cazul electrozilor plani, calculele numerice au arătat că, cu cât valoarea permitivității electrice a eșantionului studiat este mai mare, cu atât perturbația introdusă de prezența sarcinii spațiale, asupra intensității câmpului electric, este mai mică. În cazul configurației ac-plan, densitatea de sarcină are valori maxime în vecinătatea electrodului injectant și scade foarte repede cu μ și v . Datorită configurației speciale a electrozilor, V și E prezintă variații mult mai mari decât în cazul electrozilor plani în vecinătatea acului (fig.5) Aceste variații se accentuează în cazul existenței unei injecții de sarcină: potențialul crește, iar intensitatea câmpului electric se reduce considerabil (față de cazul $\rho_v = 0$).

BIBLIOGRAFIE

- [1] Radu I., "Comportarea unor materiale electroizolante în câmpuri electrice intense", Teză de doctorat, București, 1997.
- [2] Noșingher P., "Contribuții privind studiul solicitărilor materialelor electroizolante din mașinile electrice", Teză de doctorat, București, 1983.
- [3] Vișata O.I., "Influence des arborescences d'eau sur les propriétés diélectriques des polymères", Teza de doctorat, CNRS/UJF-UPB, 2001.
- [4] Noșingher P., C.D.Ioan, "A numerical method for computing the electrical stress in dielectrics", seria "Electrotehnică și Energetică", vol. 3, 1978.
- [5] Noșingher P., Radu I., Filippini C., "Computation of the electric field in insulation with water trees", seria "Electrotehnică și Energetică", vol.4, 2000.
- [6] Ciuprina, F., «Contribuții privitoare la problemele de conducție electrică în materiale electroizolante » Teză de doctorat, București, 1997.