



Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013
Investește în oameni!

Proiect InnoRESEARCH - POSDRU/159/1.5/S/132395

Burse doctorale și postdoctorale în sprijinul inovării și competitivității în cercetare



UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI

Facultatea de Inginerie Electrica

Scoala Doctorala de Inginerie Electrica

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Accumulation and Effects of Space Charge in DC Cable Joints Insulations

Acumularea și Efectele Sarcinii Spațiale în Izolațiile Joncțiunilor Cablurilor de CC

Autor: Ing. Lucian-Viorel ȚĂRANU

Conducător de doctorat: Prof. dr. ing. Petru V. NOȚINGHER

București
2021

Cuprins

Lista de abrevieri si expresii	v
Lista de simboluri	vii
Lista de figuri	xiv
Lista de tabele	xxix
Mulumiri	xxx
Capitolul 1. INTRODUCERE	1
1.1. Transportul energiei electrice.....	1
1.2. Cabluri de energie	4
1.3. Solicitari ale izolatiilor	6
1.4. Obiectivul tezei	8
1.5. Structura tezei.....	10
Capitolul 2. JONCTIUNI PENTRU CABLURI DE ENERGIE.....	11
2.1. Introducere	11
2.2. Functii indeplinite	11
2.3. Controlul campului electric.....	12
2.4. Tipuri de jonctiuni.....	13
2.5. Diferente intre jonctiuni pentru HVAC si HVDC.....	19
2.6. Tipul de jonctiune utilizata in teza	21
Concluzii	21
Capitolul 3. SOLICITARI ALE IZOLATIILOR EXTRUDATE PENTRU JONCTIUNILE DE CABLU DE CC	22
3.1. Introducere	22
3.2. Solicitari electrice.....	23
3.3. Solicitari termice	26
3.4. Solicitari mecanice	28
3.5. Solicitari ale mediului ambiant	29
Concluzii	30
Capitolul 4. CONDUCTIA ELECTRICA IN IZOLATIILE JONCTIUNILOR DE CC	31
4.1. Introducere	31
4.2. Conductia ionica.....	32
4.3. Conductia electronica in campuri electrice uzuale.....	33
4.4. Conductia electronica in campuri electrice intense.....	35
4.5. Determinarea conductivitatii electrice	42

4.6. Determinarea permitivitatii electrice.....	45
Concluzii	46
Capitolul 5. SARCINA SPATIALA	47
5.1. Generare si acumulare	47
5.2. Masurare	49
5.3. Moduri de masurare	57
5.4. Acuratetea masuratorilor	58
Concluzii	59
Capitolul 6. EXPERIMENTARI	61
6.1. Esantioane	61
6.2. Instalatii si conditii de masurare.....	65
6.3. Repartitia esantioanelor plane pentru masuratori.....	77
Concluzii	78
Capitolul 7. REZULTATE EXPERIMENTALE	79
7.1. Microscopie optica si de baleaj electronic	79
7.2. Imbatranire termica accelerata	81
7.3. Conductivitate electrica.....	86
7.4. Permitivitate electrica.....	93
7.5. Densitatea de sarcina pentru esantioane plane	100
7.6. Densitatea de sarcina pentru esantioane cilindrice.....	146
7.7. Reducerea sarcinii spatiale	153
Concluzii	156
Capitolul 8. REZULTATE NUMERICE	158
8.1. Introducere	158
8.2. Conductivitate electrica.....	158
8.3. Calculul numeric al campului electric.....	161
8.4. Prezenta cavitatilor in izolatia jonctiunii.....	169
8.5. Rezultate.....	170
Concluzii	197
Capitolul 9. CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUTII. PERSPECTIVE	198
9.1. Concluzii generale.....	198
9.2. Contributii personale	201
9.3. Perspective	202
Anexe	i
Bibliografie	vii

Mulumiri

Doresc sa multumesc, in primul rand, domnului Prof. Petru V. Noșingher (coordonatorul tezei) pentru sprijinul acordat pe intreaga perioada a tezei, pentru recomandarile facute, pentru nenumaratele discutii purtate si sfaturi si incurajarile date, mai ales in ultima perioada. Ii sunt profund recunoscator pentru tot timpul si interesul acordat mie in acesti ani.

Sunt profund recunoscator dnei Conf. Cristina Stancu pentru toate discutiile purtate si pentru sprijinul acordat de-a lungul tezei si in cadrul proiectului PN-II-RU-TE-2014-4-0280, "Reducerea sarcinii spatiale in izolatiile compozite ale jonctiunilor cablurilor de CC de IT".

Mulumiri sincere referentilor tezei de doctorat, respectiv dnei Prof. Elena Helerea, dnului Prof. Romeo Cristian Ciobanu si dnei Conf. Cristina Stancu pentru eforturile acestora de a analiza teza si pentru sugestiile oferite pentru a o imbunatati. De asemenea, ii multumesc dlui Prof. Emil Cazacu pentru acceptul si eforturile facute pentru prezidarea sustinerii tezei.

Multe multumiri dnilor Profs. Laurențiu Marius Dumitran si Florin Ciuprina pentru asistenta oferita de-a lungul tezei si pentru discutiile referitoare la continutul acesteia.

Tin sa multumesc si dlui Prof. Gian Carlo Montanari (Bologna) pentru sansa oferita de a lucra in colectivul LIT (acum LINES) (Bologna) si pentru discutiile importante pe tema repartitiei sarcinii spatiale. Sunt recunoscator si aduc multumiri dlui Prof. Davide Fabiani (Director LIT/LINES) pentru sprijinul, intelegerea si disponibilitatea avute in perioada stagiului meu la LIT, pentru discutii avute pe tema repartitiei sarcinii spatiale, precum si pentru suportul tehnic oferit pentru sarcina spatiala si microscopie. De asemenea, multumesc dlui Dr. Fabrizio Palmieri pentru discutiile referitoare la teoria sarcinii spatiale si determinarea acesteia si pentru suportul tehnic oferit determinarii experimentale a sarcinii spatiale si a conductivitatii electrice.

Mulumiri speciale dlui Dr. Fabrizio Negri pentru prietenia, discutiile referitoare la sarcina spatiala si pentru tot ajutorul oferit in achizitionarea si procesarea semnalului sarcinii spatiale.

Doresc sa multumesc si dlui Prof. Andrea Cavallini pentru toate discutiile referitoare la DP, asistenta tehnica privind masuratorile DP si identificarea DP in esantioane plane si cilindrice.

Mulumesc si dlui Prof. Vittorio Colombo si colectivului CIRI-MAM (Bologna) pentru accesul la microscopul SEM si dlui Prof. Andrea Sacconi (DICAM, Bologna) pentru asistenta oferita pentru masuratorile SEM si pentru discutia avuta pe tema rezultatelor obtinute.

Mulumesc dlui Ing. Antonel Pleșa, Director R&D la ICME ECAB (Cabluri) Bucuresti, pentru accesul la laboratoarele de cercetare ICME ECAB, furnizarea de materiale necesare pentru partea experimentală a tezei, sprijinul direct in realizarea unor esantioane cilindrice (cabluri) cu izolatie stratificata (EPR / XLPE) si pentru discutiile avute privind materialele polimere. De asemenea, multumesc dlui Ing. Ionel Ciobanu, Prysmian Group Romania (Slatina), pentru realizarea de esantioane cilindrice XLPE / PCV si informatiile furnizate privind acestea.

Mulumiri dnilor Prof. Radu Setnescu si Dr. Eduard Marius Lungulescu (INC DIE ICPE-CA, Bucuresti) pentru efectuarea de masuratori DSC si FTIR si pentru interpretarea rezultatelor.

Mulumesc tuturor tehnicienilor de la UPB, ICME ECAB si LIT (Bologna), pentru asistenta oferita in fabricarea esantioanelor, fara de care realizarea partii experimentale a tezei nu ar fi fost posibila. De asemenea, multumesc dlui Prof. Alexandru Mihail Morega si dnei Elena Floricău (SDIE, UPB), precum si dnelor Gaby Vasile si Carmen Dumitru (MMAE, UPB) pentru sprijinul acordat in intreaga perioada de elaboare a tezei de doctorat.

Mulumiri colegilor de la LIT (Bologna) din 2015–2016 si colegilor de la ELMAT (UPB) pentru sprijinul acordat in efectuarea experimentarilor si discutiile si prietenia acordata.

Mulumiri tuturor celor care m-au sprijinit, dar care nu au fost cuprinsi in aceste randuri.

Mulumiri speciale pentru partenera de viata Mariana Guțu si pentru parintii mei, Mircea Țăranu si Voica Țăranu, pentru intelegere, sprijin si, in special, pentru rabdare.

Rezultatele prezentate in aceasta teza de doctorat au fost obtinute cu sprijinul Ministerului Fondurilor Europene prin Programul Operational Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013, Contract nr. POSDRU/159/1.5/S/132395.

Introducere

Cresterea economica globala este, actualmente, de aproximativ +3.5 % pe an, aceasta corelandu-se in ultimii ani cu un consum mediu global de energie electrica de aproximativ +2.5 % pe an. Datorita acestor cresteri anuale semnificative ale consumului de energie electrica, se doreste ca transportul si distributia acesteia sa se realizeze cat mai eficient posibil, rezultand in cercetari active in domeniu pentru a aduce imbunatatiri liniilor de transport al energiei electrice, astfel incat acestea sa suporte o tensiune cat mai ridicata in functionare si sa transporte o putere electrica cat mai mare.

Interesul oferit cablurilor in CC ca mijloc de transport al energiei este observat, in ultimii ani, prin accentul pus pe dezvoltarea tehnologiei in CC [15] (actualmente, retele electrice utilizand cabluri in CC la tensiuni de pana la +/- 640 kV si putere instalata de pana la 3000 MW sunt disponibile comercial [16]) precum si integrarea acesteia in retelele actuale de CA. Tinand seama ca, actualmente, sursele regenerabile de energie reprezinta peste 80% din tipurile de surse de energie noi instalate in Europa (majoritatea eoliene) si de faptul ca in viitor se preconizeaza ca sursele regenerabile sa detina, global, o cota de cel putin 40% din totalul surselor de energie, transportul energiei electrice in CC prin cabluri este modalitatea de transport cea mai potrivita.

Tendinta actuala a producatorilor de cabluri este de a utiliza noi procedee tehnologice pentru a imbunatati gradul de puritate a materialului polimeric cel mai des utilizat pentru izolatiile de tip extrudat, respectiv polietilena [16], inasa si de a utiliza noi materiale termoplastice care nu necesita reticulare si care poseda proprietati de reciclabilitate [34]. In aceasta teza se prezinta rezultatele obtinute pe materiale corespunzatoare numai izolatiilor extrudate.

Deoarece tronsoanele de cabluri au o lungime finita (de regula sub 1 km), pentru acoperirea distantei dintre regiuni indepartate una fata de cealalta trebuiesc utilizate imbinari, realizate prin intermediul jonctiunilor. Se defineste astfel jonctiunea ca ansamblul fizic care leaga complet doua (sau mai multe) cabluri intre ele [40].

Jonctiunile pentru cablurile de inalta tensiune prezinta o structura mult mai complicata decat cea a cablurilor, componenta cea mai vulnerabila a acestora fiind izolatia. Pentru distante, tensiuni si putere transportata mai ridicate, in ultimii ani s-au facut eforturi mari pentru realizarea de jonctiuni cu izolatii din materiale polimere, constituite, in general, din doua straturi polimere, de regula intre polietilena reticulata – XLPE, cauciuc etilen-propilenic – EPR, cauciuc etilen-propilen diena-monomer – EPDM sau cauciuc siliconic – SiR.

Acumularea de sarcina spatiala a fost studiata intens in cablurile cu izolatie extrudata si mult mai putin in jonctiunile acestora, desi acestea se considera a fi partile cele mai vulnerabile ale unei retele de transport a energiei electrice utilizand cabluri. Astfel, masurarea cat mai exacta a sarcinii spatiale dezvoltate in izolatiile polimere ale cablurilor a constituit o tema de cercetare a numeroase colective din universitati si centre de cercetare. Aceste cercetari au culminat, in 2017, cu publicarea de catre comitetul tehnic a societatii IEEE DEIS a primului standard (IEEE 1732) care prezinta protocolul pentru efectuarea de masuratori de sarcina spatiala in CC pentru materialele utilizate la izolatia extrudata a cablurilor de energie, pana la tensiuni de 550 kV [57].

Pentru aceasta tema (actuala) de cercetare, urmatorul pas este continuarea studiilor privind acumularea de sarcina spatiala pentru accesoriile cablurilor ([30], [46]), concretizandu-se, intr-un final, cu publicarea unui standard similar cu IEEE 1732, dar pentru accesorii.

Teza vine in sprijinul indeplinirii acestui scop, si, pentru a indeplini acest lucru, stabileste **trei obiective** de urmat si **patru ipoteze** de investigat.

Teza este structurata in doua parti si contine 9 capitole; prima parte (primele 5 capitole, aprox. 60 pagini) contine analiza literaturii de specialitate si cea de-a doua parte (urmatoarele 4 capitole, aprox. 140 pagini) contine contributiile originale si concluziile.

In **Capitolul 1** se prezinta o introducere in tema, precum si obiectivele urmarite in cadrul tezei.

In **Capitolul 2** se prezinta informatii referitoare la jonctiunile de cablu cu izolatie extrudata. Se descrie structura unei jonctiuni, materialele utilizate la straturile izolatoare, se prezinta tipuri de jonctiuni si diferentele intre jonctiunile utilizate in CA si cele in CC.

In **Capitolul 3** se prezinta solicitarile care pot actiona asupra izolatiilor extrudate ale jonctiunilor, in functionare. Se discuta despre solicitarile termice, electrice si alte tipuri de solicitari care intervin si care genereaza sau intensifica procesul de acumulare de sarcina spatiala, avand ca efect degradarea jonctiunilor.

In **Capitolul 4** sunt discutate mecanismele de conductie in CC si de polarizatie electrica, respectiv metodele de determinare a conductivitatii electrice (σ) si a permitivitatii electrice (ϵ).

In **Capitolul 5** este tratata pe larg problema sarcinilor spatiale din izolatiile cablurilor si a jonctiunilor de cablu, descriind mecanismele de injectie si de transport de sarcina, precum si metodele de masurare a sarcinii spatiale. Dintre acestea, metoda PEA este prezentata in detaliu.

In **Capitolul 6** se prezinta materialele utilizate, conditiile de masurare si instalatiile de masurare utilizate in cadrul tezei.

In **Capitolul 7** sunt prezentate rezultatele experimentale privind imbatranirea termica accelerata a esantioanelor, forma interfetei pentru esantioanele stratificate (obtinuta prin microscopie) si influenta parametrilor de lucru (tensiunea electrica de pe durata masuratorii, temperatura aplicata pe durata masuratorii si durata de imbatranire) asupra proprietatilor de material studiate: conductivitate electrica, permitivitate electrica si densitate de sarcina spatiala.

In **Capitolul 8** se prezinta rezultatele numerice obtinute pentru repartitia campului electric pentru structuri bi-strat plane si cilindrice (modeland izolatia jonctiunii) si pentru un model de jonctiune, utilizand ca date de intrare valorile obtinute experimental (permitivitate, conductivitate si densitate de sarcina) in **Capitolul 7**.

In **Capitolul 9** sunt prezentate concluziile generale ale acestei teze, contributiile personale referitoare la repartitia si efectele sarcinii spatiale din jonctiunile cablurilor de energie si perspectivele pentru viitor.

Obiectivele acestei teze sunt:

- **O1.** Studiul acumularii sarcinii spatiale si determinarea repartitiei ei in izolatiile jonctiunilor cablurilor de energie
- **O2.** Studiul efectelor sarcinii spatiale, respectiv a solicitarilor electrice rezultate, sub actiunea diferitelor solicitari electrice si termice
- **O3.** Determinarea de metode pentru reducerea sarcinii spatiale

Pentru a urmari obiectivele tezei s-au investigat urmatoarele ipoteze:

- **H1.** Durata de imbatranire termica are un efect negativ asupra proprietatilor electrice ale izolatiilor jonctiunilor de cablu, care la randul lor vor influenta negativ valorile sarcinii spatiale
- **H2.** Durata de imbatranire termica are un efect negativ direct asupra acumularii si distributiei sarcinii spatiale in izolatiile jonctiunilor de cablu
- **H3.** Efectul principal al sarcinii spatiale este intensificarea solicitarilor electrice, ce conduc la degradarea izolatiilor jonctiunilor de cablu
- **H4.** Atat reducerea sarcinii spatiale, cat si a efectelor acesteia in izolatiile jonctiunilor de cablu, pot fi realizate prin imbunatatirea calitatii fabricarii izolatiei si a designului imbunatatit a jonctiunilor de cablu

Pentru a testa ipotezele de mai sus si a urmări obiectivele tezei, s-au efectuat masuratori atat pe esantioane plane, cat si pe esantioane cilindrice (in esenta, cabluri cu dubla izolatia), neimbatranite si imbatranite termic accelerat. Esantioane plane uni-strat de XLPE, EPR, EPDM si bi-strat de XLPE / EPR si XLPE / EPDM au fost realizate la ICME ECAB (Cablel), Romania. Esantioanele cu geometrie cilindrica cu izolatia EPR / XLPE au fost realizate de catre ICME ECAB (Cablel) Romania.

Pe aceste esantioane s-au masurat valorile proprietatilor electrice ale componentelor care realizeaza izolatiile multistrat a unei jonctiuni de CC (conductivitatea si permitivitatea electrica si densitatea de sarcina spatiala), precum si variatiile acestor proprietati cu durata de imbatranire termica accelerata in laborator.

Determinarea permitivitatii electrice si a factorului de pierderi a fost obtinuta prin spectroscopie dielectrica in Laboratorul de Materiale Electrotehnice (ELMAT), UPB, Romania. Determinarea conductivitatii electrice a fost obtinuta prin metoda curentilor de absorbtie si resorbtie in Laboratorul de Inovatie Tehnologica (LIT) (acum LIMES), Bologna, Italia si la ELMAT, UPB, Romania. Densitatea de sarcina spatiala a fost determinata prin masuratori utilizand metoda PEA in cadrul laboratorului LIT din Bologna. Degradarea esantioanelor a fost determinata prin spectroscopie in domeniul infrarosu cu transformata Fourier (FTIR) si calorimetrie cu scanare diferentiala (DSC) in cadrul Institutului National de Cercetare-Dezvoltare pentru Inginerie Electrica (INCDIE ICPE-CA), Romania. Forma interfetei esantioanelor stratificate plane a fost determinata prin metoda microscopiei optice (OM) in cadrul laboratorului ELMAT si prin metoda microscopiei electronice de baleiaj (SEM) la Centrul pentru Cercetare Industriala (CIRI), Bologna, Italia, pe esantioane pregatite la Departamentul pentru Inginerie Civila, Chimica si de Mediu (DICAM), Bologna, Italia, si carora le-a fost depus un strat de aur in vid la LIT.

Capitolul 1. Introducere

In Capitolul 1 este prezentata o introducere in tema (a carui rezumat a fost prezentat mai sus), precum si obiectivele si ipotezele urmarite in cadrul acestei teze.

Importanta transportului energiei electrice este evidentiata, pe baza nevoilor actuale si viitoare de energie electrica ale lumii, in fig. 1. Sunt discutate diferentele dintre tehnologiile transportului energiei la inalta tensiune in curent alternativ (HVAC) si in curent continuu (HVDC), precum si avantajele utilizarii cablurilor in HVDC. Sunt prezentate componentele unui cablu de energie, evidentiind stratul de izolatia si prezentand diferite tipuri de izolatii ale cablului si avantajele izolatiilor extrudate. Conceptul de imbinare a cablurilor folosind jonctiuni este introdus aici, subliniind zona de interfata dintre izolatiile cablului si a jonctiunii.

In Capitolul 1 este prezentat si un rezumat al problemelor majore la care se adreseaza in prezent cercetarile actuale din domeniu, respectiv solicitarile la care sunt supuse jonctiunile cablurilor in CC, inclusiv dependenta conductivitatii electrice de valorile campului electric si de temperatura si acumularea de sarcina spatiala in straturile izolatoare ale jonctiunilor.

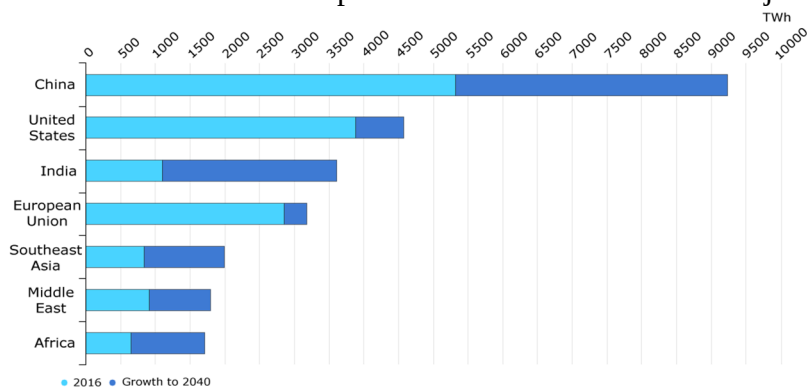


Fig. 1. Cererea de energie electrica pe regiuni, 2016 – 2040 [19]

Capitolul 2. Jonctiuni pentru cabluri de energie

In Capitolul 2 sunt prezentate functiile jonctiunilor de cablu, structura acestora, tipurile de jonctiuni de cablu cu izolatia extrudata, materialele utilizate in straturile izolatoare ale acestora si diferentele dintre jonctiunile utilizate in CA si in CC.

In acest capitol se sublinieaza importanta dezvoltarii de accesorii fiabile pentru cablurile cu izolatia extrudata, la tensiuni electrice si puteri instalate cat mai ridicate [30]. Printre functiile indeplinite de catre jonctiune, cea de control a solicitarilor electrice este discutata in detaliu. Aici, metoda de utilizare a materialelor cu proprietati neliniare de control a campului electric (materiale de tip FGM) este descrisa si i se dovedeste eficienta.

In acest capitol se prezinta si o clasificare a jonctiunilor in functie de tip, prezentand particularitatile fiecarui tip si tensiunea la care sunt instalate. Dintre acestea, cel mai instalat tip de jonctiune pentru HVDC a fost identificat a fi jonctiunea prefabricata preturnata, ce este tipul de jonctiune considerata in teza. Elementele constructive ale unei jonctiuni prefabricate preturnate dintr-o singura piesa sunt prezentate in fig. 2, evidentiind zona de interfata (fig. 2, B) intre stratul de izolatia a cablului (fig. 2, C) si stratul de izolatia a jonctiunii cablului (fig. 2, A).

Cauciucul etilen propilenic (EPR), Cauciucul etilen propilen diena monomer (EPDM) si Cauciucul siliconic (SiR) au fost identificate ca materiale care sunt utilizate pentru stratul de izolatia al jonctiunilor prefabricate, cu EPR si EPDM mai frecvente in HVDC si SiR in HVAC. Este discutat si interesul crescand pentru SiR pentru izolatiile jonctiunilor cablurilor in HVDC.

Concluziile Capitolului 2:

- O metoda eficienta de control al solicitarilor electrice in izolatiile jonctiunilor de CC o reprezinta folosirea materialelor FGM si a fost urmarita in legatura cu Ipoteza H4 privind reducerea sarcinii spatiale si a efectelor acestora prin design imbunatatit al jonctiunilor
- Atat EPR, cat si EPDM au fost identificate ca fiind cele mai utilizate materiale de izolatia a jonctiunilor in CC utilizand jonctiuni prefabricate preturnate, si sunt utilizate in teza
- Un studiu privitor la tipul de material cel mai potrivit pentru izolatiile jonctiunilor in contact cu izolatia cablului (XLPE) a fost urmarit in legatura cu Ipoteza H4 privind reducerea sarcinii spatiale si a efectelor acestora prin design imbunatatit al jonctiunilor

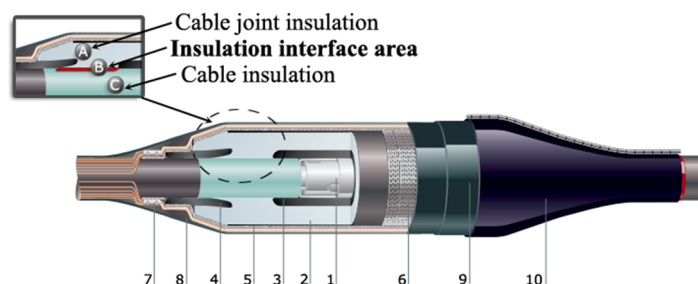


Fig. 2. Jonctiune preturnata, dintr-o singura piesa, pentru tensiunea nominala de 245 kV:

- 1- conector mecanic; 2- corp izolator din cauciuc siliconic; 3- electrod interior;
 4- deflector; 5- ecran semiconductor exterior; 6- tresa de Cupru; 7- legatura la ecranul exterior;
 8- mastic; 9- tuburi izolante; 10- protectie exterioara [92], evidentiind zona de interfata a izolatiei (B) dintre izolatia cablului (C) si izolatia jonctiunii cablului (A)

Capitolul 3. Solicitari ale izolatiilor extrudate pentru jonctiunile de cablu de CC

Acest capitol prezinta solicitarile care actioneaza asupra izolatiilor extrudate ale jonctiunilor cablurilor in functionare, durata de viata a izolatiilor acestora fiind determinata de comportamentul lor sub actiunea acestor solicitari [73]. Sunt discutate solicitarile electrice,

termice, mecanice si de mediu care intervin si care genereaza sau intensifica procesul de acumulare a sarcinii spatiale, avand ca efect degradarea jonctiunilor cablurilor.

Solicitarile electrice si efectele acestora includ Descargarile pariale (DP), Arborescente electrice si electrochimice si, in mod special, Sarcina spatiala. Sarcina spatiala (generata din procesul de fabricatie sau din functionare) influenteaza repartitia campului electric, atat pe durata aplicarii tensiunii, cat si dupa anulara tensiunii (unde poate pune in pericol operatorii cablurilor). Existenta sarcinii spatiale duce, de asemenea, la aparitia / intensificarea descarcarilor pariale si a arborescentelor electrice, crescand solicitarile electrice si ducand la o degradare prematura a izolatiei jonctiunii. Figura 3 rezuma actiunea solicitarilor electrice asupra izolatiiilor jonctiunilor cablurilor.

Printre solicitarile termice care actioneaza asupra izolatiiilor jonctiunilor a fost discutata imbatranirea termica, aratand ca aceasta duce la formarea de radicali liberi care, prin reactii succesive, determina scindarea lanturilor moleculare si aparitia produsilor de oxidare [172]. Acest lucru poate fi incetinit prin introducerea de antioxidanti in materialele izolatoare (XLPE, EPDM, EPR etc.) ale jonctiunilor. Sectiunea concluzioneaza ca imbatranirea termica a jonctiunilor cablurilor implica doua cai principale: schimbari continue ale structurii chimice si fizice a izolatiei jonctiunilor cablurilor datorita degradarii chimice, polimerizarii, depolimerizarii, difuziei etc. si efectele termomecanice cauzate de forte generate de fenomenele de expansiune si contractie.

Restul Capitolului 3 prezinta cele mai uzuale solicitari mecanice si de mediu si discuta efectele acestora asupra izolatiei jonctiunilor de cablu.

Concluziile Capitolului 3:

- Pentru izolatiiile jonctiunilor, majoritatea tipurilor de solicitari vor creste densitatea de sarcina spatiala (descargarile pariale, arborescentele electrice, prezenta aditivilor sau a impuritatilor, delaminari datorate solicitarilor termice sau mecanice etc.) care va modifica, la randul ei, repartitia campului electric in straturile izolatoare ale jonctiunii, si va conduce la o imbatranire electrica (sau termoelectrica) accelerata, degradare locala si, intr-un final, la o strapungere prematura.
- Literatura revizuita in acest capitol a indicat faptul ca un efect major al sarcinii spatiale o reprezinta cresterea solicitarilor electrice, ceea ce duce la degradarea izolatiei jonctiunilor, ce sustine Ipoteza H3. Mai mult, s-a demonstrat ca imbatranirea termica are un efect negativ asupra proprietatilor electrice ale materialelor utilizate in izolatiiile jonctiunilor (sustinand Ipoteza H1) si asupra acumularii de sarcina spatiala (sustinand Ipoteza H2).

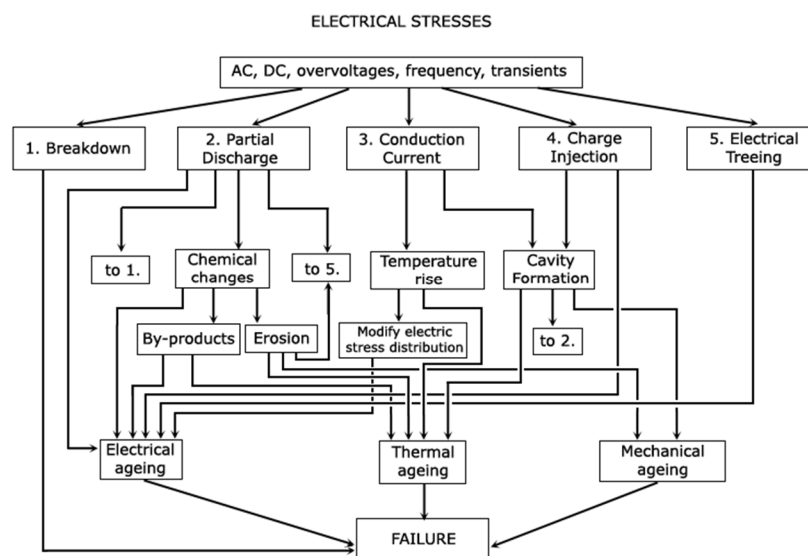


Fig. 3. Actiunea solicitarilor electrice asupra izolatiei jonctiunilor de cablu [132]

Capitolul 4. Conductia electrica in izolatiile jonctiunilor de CC

In Capitolul 4 sunt analizate mecanismele de conductie si de polarizatie electrica, respectiv metodele de determinare a conductivitatii electrice (σ) si a permitivitatii electrice (ϵ).

Conductia electrica in izolatiile jonctiunilor depinde de morfologia materialului si de natura, concentratia si mobilitatea purtatorilor de sarcina, respectiv ionii si electronii / goluri.

Conductia ionica este evidentiata ca fiind prezenta in izolatiile jonctiunilor, iar mecanismele sale sunt prezentate la diferite temperaturi si valori ale campului electric (de la temperaturi obisnuite la ridicate, si pentru camp electric redus la ridicat, de peste 100 kV/mm).

Conductia electronica este, de asemenea, evidentiata in izolatiile jonctiunilor, atat in campuri electrice reduse si medii ($E < 10^7$ V/m), cat si intense ($E > 10^7$ V/m). Pentru valorile reduse si medii se discuta existenta capcanelor, oferind o clasificare a acestora in capcane de mica adancime (< 0.6 eV, corespunzatoare defectelor structurii moleculare a polimerului) si capcane adanci (> 1 eV, corespunzatoare iregularitatilor chimice din polimer) [200].

Se discuta ca aceste stari localizate (capcane) sunt locuri unde pot fi captati purtatorii de sarcina; daca un purtator de sarcina (ex. un electron) este captat, acesta nu poate iesi decat daca primeste o energie suficienta, egala cu adancimea capcanei sau egala cu diferenta dintre capcana si cea alaturata. Existenta capcanelor ce capteaza purtatori de sarcina reduce, in general, concentratia de purtatori de sarcina care participa la conductie sau le reduce mobilitatea, provocand acumulari locale de sarcina spatiala care genereaza un camp electric local care, pe langa campul electric produs de aplicarea tensiunii, poate provoca degradarea materialului.

Pentru conductia electronica in campuri electrice intense s-a aratat ca, pe langa prezenta si intensificarea fenomenelor care apar in campuri electrice joase si medii, sub actiunea campurilor intense exista mecanisme noi care sunt limitate (sau controlate) de electrozi (injectia de sarcina la interfata intre dielectric si electrod) si de volumul izolatiei (migrarea sarcinii in interiorul dielectricului). Consecinta lor este o imbatranire prematura sau o degradare locala a materialului.

Printre mecanismele de injectie a sarcinii, injectiile Schottky si Fowler-Nordheim sunt tratate mai detaliat, oferind valori pentru expresiile densitatilor de curent. Printre mecanismele de transport al sarcinii, efectul Poole-Frenkel, conductia de tip Hopping si Conductia limitata de sarcina spatiala sunt prezentate mai detaliat, oferind valori pentru expresiile densitatilor de curent sau a conductivitatilor acestora.

Determinarea conductivitatii electrice (care caracterizeaza starea de conductie) poate fi realizata utilizand metode empirice, prin diverse formule de calcul, sau experimental, folosind metoda curentilor de absorbtie / resorbtie.

Pentru determinarea empirica sunt prezentate diverse formule in care conductivitatea depinde de valorile campului electric si / sau de temperatura. Dintre acestea, expresia din ec. (4.36) a fost propusa de catre autor si a fost folosita ulterior in teza:

$$\sigma(E, T) = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{k_B \cdot T}\right) \frac{\sinh((a \cdot T + b) \cdot \ln|E|)}{|E|^\alpha} \quad (4.36)$$

unde A , E_a , a , b si α sunt constante de material, k_B este constanta lui Boltzmann si T este temperatura termodinamica.

Pentru determinarea experimentală, metoda curentilor de absorbtie / resorbtie (utilizata in teza) este prezentata pe larg, si se deduce expresia conductivitatii electrice.

Determinarea permitivitatii electrice (care caracterizeaza starea de polarizare electrica) este prezentata prin intermediul metodei spectroscopiei dielectrice folosind analiza in frecventa.

Concluziile Capitolului 4:

- Modificarile pe care le sufera materialele izolatoare in timpul imbatranirii se reflecta in valorile conductivitatii electrice. Aceasta urmareste Ipoteza H1 care sustine ca imbatranirea termica are un efect negativ asupra proprietatilor electrice ale izolatiilor jonctiunilor.
- Permitivitatea electrica poate fi utilizata ca un marker pentru evaluarea starii de imbatranire a esantioanelor, urmarind Ipoteza H1.
- In cazul izolatiilor jonctiunilor cablurilor, deoarece exista interfete unde sarcina spatiala se separa (pe baza raportului dintre permitivitatea si conductivitatea partilor omogene ce separa interfata) poate exista o densitate superficiala de sarcina care produce un camp electric suplimentar. O crestere a sarcinii spatiale datorita existentei acestei sarcini superficiale sustine Ipoteza H1.

Capitolul 5. Sarcina spatiala

In Capitolul 5 problema sarcinilor spatiale din izolatia cablurilor si a jonctiunilor de cablu este tratata extensiv, descriind mecanismele de injectie si transport de sarcina, precum si metode de masurare a sarcinii. Dintre acestea, metoda PEA este descrisa mai detaliat.

Sarcina spatiala este definita aici ca o acumulare de sarcini electrice libere (ce sunt susceptibile a se deplasa), de semn pozitiv si negativ, continute intr-un material dielectric fara a tine seama de sarcinile electrice de semne opuse care se anuleaza reciproc [231]. Sarcina spatiala acumulata depinde de structura chimica a dielectricului, de temperatura, campul electric aplicat, durata de masurare, natura electrozilor etc.

Repartitia acestor sarcini spatiale (fig. 4, *a*) modifica repartitia campului electric E (fig. 4, *b*) prin crearea unui camp electric intern suplimentar care, adaugandu-se la campul aplicat E_{app} (definit ca raportul intre tensiunea aplicata, U_{app} , si grosimea esantionului, g), poate conduce, in anumite zone, la aparitia unor valori ale campului electric superioare aceleia pentru care izolatia s-a dimensionat, contribuind, astfel, la accelerarea proceselor de degradare a izolatiei, respectiv la o strapungere prematura a acesteia [247].

Sarcinile spatiale se grupeaza in sarcini extrinseci (injectate de la electrozi) si intrinseci (generate din defectele introduse in procesele de fabricare sau survenite pe durata exploatarei), si sunt clasificate in functie de unde se acumuleaza in dielectric, respectiv in vecinatatea electrozilor, in volumul esantionului, la interfete etc.

Sarcinile care se acumuleaza in vecinatatea electrozilor sunt clasificate in homosarcini si heterosarcini. Sarcini de acelasi semn cu polaritatea tensiunii electrice de la interfata, acumulate pe o distanta Δx langa electrozi, se numesc *homosarcini*, si arata ca injectia / extractia de sarcina este mecanismul dominant. Efectul lor este de scadere a intensitatii campului electric aplicat la electrod si intensificarea acestuia in interiorul materialului.

Sarcini de semn contrar cu polaritatea tensiunii electrice de la interfata, acumulate pe o distanta Δx langa electrozi, se numesc *heterosarcini* si au ca efect cresterea intensitatii campului electric la interfetele dielectric-electrod si o reducere a acestuia in volumul materialului. Heterosarcini pot fi generate de catre ionizarea speciilor chimice / impuritatilor prezente in material, mecanismul dominant fiind transportul de sarcina electrica.

Printre cele mai utilizate metode de masurare a sarcinii electrice, metoda Pulsului electro-acustic (PEA) poate fi utilizata cu succes pentru esantioane plane, cilindrice, cabluri sau jonctiuni de cablu [252]. Aceasta consta in utilizarea unei excitatii de origine electrica (impulsuri de tensiune de scurta durata) care genereaza o unda de presiune care se propaga in material, determina o deplasare locala a sarcinilor electrice interne prezente in acesta si este detectata de catre un senzor piezoelectric. Semnalul obtinut in circuitul exterior are o forma care depinde de distributia sarcinii electrice, si, prin tratamentul sau numeric, repartitia densitatii de sarcina poate fi determinata.

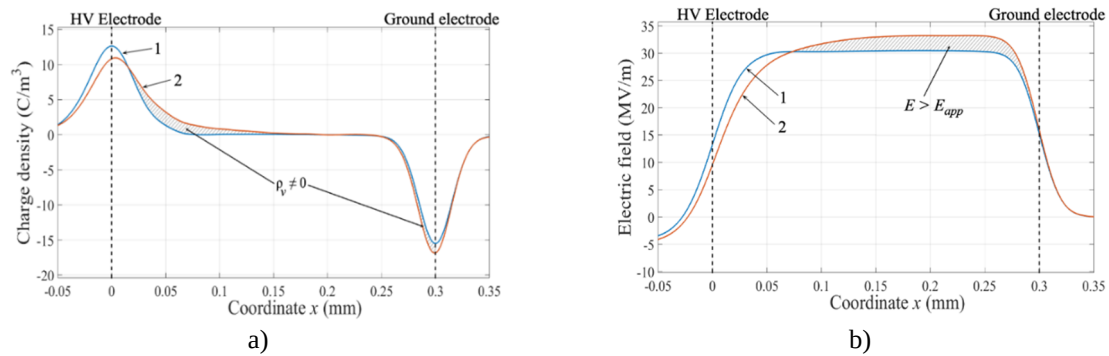


Fig. 4. Variatia densitatii de sarcina (a) si a intensitatii campului electric (b) cu coordonata x , pentru esantioane plane XLPE, la $t = 1$ s (1) si 3600 s (2) dupa aplicarea tensiunii ($E_{app} = 30$ kV/mm)

Deoarece rezultatele repartitiei densitatii de sarcina difera in functie de valoarea filtrului Gaussian (din tratamentul matematic descris mai sus), Capitolul 5 prezinta si rezultatele unui studiu privind influenta ordinului filtrului Gaussian. Alegerea unui ordin pentru filtrul Gaussian care sa fie adecvat pentru deconvolutia tuturor semnalelor obtinute experimental este o provocare, printre altele, si datorita faptului ca rezultatele obtinute depind si de amplitudinea semnalului electric de la intrare: un semnal cu o amplitudine mai ridicata, provenit fie de la un esantion incarcat cu sarcina, fie de la o tensiune electrica aplicata mai mare, accepta o valoare mai ridicata a ordinului filtrului pana sa apara componentele de inalta frecventa in rezultatul deconvolutiei, pe cand acelasi ordin al filtrului Gaussian dar aplicat unui semnal cu o amplitudine mai joasa produce un rezultat incarcat cu componente de inalta frecventa.

Acest studiu a luat in considerare un interval cuprins intre 2 si 50 pentru valoarea filtrului Gaussian si a studiat influenta sa pentru esantioane de XLPE ($g = 0.3$ mm) si EPR ($g = 0.5$ mm) supuse unui camp electric aplicat scazut si ridicat ($E_{app} = 2 \dots 10$ kV/mm). Variatia densitatii de sarcina pentru esantioane XLPE este prezentata in fig. 5 cu distanta, adimensional, si cu decalaj pe ordonata, si in fig. 6 la pozitia electrodului de pamant, cu valori raportate la maximul lor. Tinand cont de inrautatarea rezolutiei in zona electrodului de inalta tensiune (vezi §5.2.5), de faptul ca esantioanele studiate in cadrul tezei au proprietati acustice diferite (fiind, astfel, medii diferite, cu pierderi de semnal electric, atat reduse, cat si ridicate), ca au fost masurate atat la valori reduse, cat si ridicate ale tensiunii electrice si de faptul ca rezolutia totala a semnalului electric pentru valoarea de 5 pentru filtrul Gaussian este acceptabila pentru toate cazurile considerate, se alege aceasta valoare ca valoare de compromis utilizata pentru toate determinarile prin deconvolutie a semnalului electric efectuate in cadrul tezei.

Deoarece semnalul electric obtinut dupa aplicarea tratamentului numeric este variabil in timp si nu in spatiu, este prezentata procedura de calibrare pentru densitatea de sarcina, atat pentru geometrie plana, cat si pentru geometrie cilindrica.

Deoarece undele acustice sunt atenuate si dispersate pe masura ce parcurg medii cu pierderi (cum sunt esantioanele utilizate), semnalul detectat de un senzor positionat la un capat al esantionului nu corespunde direct distributiei in esantion. In fig. 7 sunt prezentate efectele atenuarii si dispersiei (fig. 7, curba 1), comparativ cu semnalul electric ideal (fig. 7, curba 2), pentru un esantion XLPE (fig. 7, a) si EPR (fig. 7, b). Se observa ca semnalul electric este mai atenuat si dispersat in esantioane care au o structura chimica mai amorfa (EPR versus XLPE).

Interfata dintre cele doua straturi in cazul esantioanelor multi-strat este o zona in care unda electro-acustica sufera reflexii, prezentandu-se o metoda pentru a determina daca reflexiile interfereaza cu rezultatul obtinut.

Exista doua metode de masurare a densitatii de sarcina spatiala folosind PEA: sub tensiune aplicata (Voltage-ON) si in absenta tensiunii aplicate (Voltage-OFF). Masuratorile Voltage-ON sunt utilizate pentru determinarea repartitiei si dinamicii densitatii de sarcina in timp, datorita fenomenelor de injectie si de transport de sarcina (discutate Capitolul 4), iar

masuratorile Voltage-OFF sunt utilizate pentru determinarea densitatii sarcinii spatiale prezente in esantion in absenta sursei de inalta tensiune, prezenta in capcanele corespunzatoare iregularitatilor fizice si chimice.

Pentru masuratorile Voltage-OFF, termenul $\rho_{v,avg}$ este introdus ca valoarea reziduala a densitatii de sarcina, sau, valoarea medie a densitatii de sarcina, si este folosit pentru a compara, din punct de vedere al acumularii de sarcina spatiala, diferite tipuri de materiale sau chiar acelasi tip de material dar supus unor conditii de testare diferite. Este calculat prin ec. (5.19) [261]:

$$\rho_{v,avg}(t_{0,voff}) = \frac{1}{x_d - x_0 - 2 \cdot x_\delta} \cdot \int_{x_0+x_\delta}^{x_d-x_\delta} |\rho_v(t_{0,voff}, x)| dx, \quad (5.19)$$

unde $t_{0,voff}$ reprezinta un moment al achizitiei semnalului in modul de masurare Voltage-OFF (ales intre 1 ... 10 secunde dupa inceputul masuratorii in Voltage-OFF), x_0 si x_d reprezinta coordonatele pozitiei electrozilor de HV si de pamant si x_δ reprezinta o distanta egala cu 3 % din grosimea esantionului, pentru a exclude valorile din imediata vecinatate a electrozilor.

Exista erori la masurarea sarcinii spatiale. Printre acestea, Capitolul 5 mentioneaza erori de aproximare si erori de detectare a semnalului. Erorile de aproximare sunt generate de utilizator (masurarea dimensiunilor esantioanelor etc.) si sunt generate de comprimarea grosimii esantionului atunci cand este introdus in celula de masurare. Se considera ca acestea din urma sunt mai mari (pana la 15 %) in cazul esantioanelor elastice (cauciucuri EPR si EPDM) si mai mici (≈ 5 %) in cazul esantioanelor termorigide (XLPE). Aceste erori influenteaza valoarea reala a campului electric aplicat de sursa de inalta tensiune. Erorile datorate comprimarii esantioanelor au fost ignorate, grosimile lor fiind cele determinate in etapa de masurare a esantioanelor (vezi Capitolul 6).

Printre erorile de detectare a semnalului, pe langa erorile datorate latimii finite a impulsurilor de tensiune (ce afecteaza rezolutia sistemului) si cele datorate diferitelor echipamente electronice din sistemul de achizitie care actioneaza ca filtre trece-jos (inrautatind rezolutia sistemului), cele datorita atenuarii si dispersiei semnalului electric (afectand in mod diferit tipuri diferite de materiale datorita proprietatilor acustice diferite) si cele datorita suprapunerii undelor reflectate peste semnalul util (in cazul masuratorilor pe esantioane stratificate) au fost investigate. In cazul rezultatelor prezentate in aceasta teza, toate masuratorile s-au realizat pe acelasi echipament si urmarind aceeasi procedura, astfel incat s-a considerat ca rezolutia sistemului este aceeaasi pentru toate masuratorile efectuate. De asemenea, s-a determinat ca in cazul esantioanelor stratificate de tipul XLPE / EPR si XLPE / EPDM (vezi Capitolul 6) unde XLPE este conectat la electrodul de inalta tensiune, eroarea cauzata de suprapunerea undelor reflectate peste semnalul util este de aproximativ 5 % si unde EPR sau EPDM sunt conectate la electrodul de inalta tensiune eroarea este de aproximativ 11 %

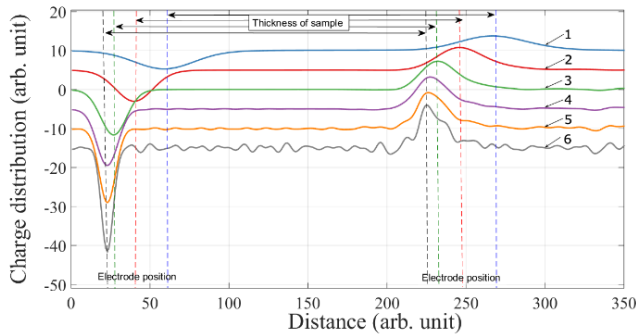


Fig. 5. Variatia densitatii de sarcina pentru esantioane plane XLPE pentru o valoare ridicata a campului electric, adimensional si decalat pe ordonata (...)

(...) → pentru valoarea filtrului Gaussian: 2 (1), 5 (2), 10 (3), 15 (4), 25 (5), 50 (6)
(XLPE, $t = 1$ s dupa aplicarea tensiunii, $E_{app} = 10$ kV/mm)

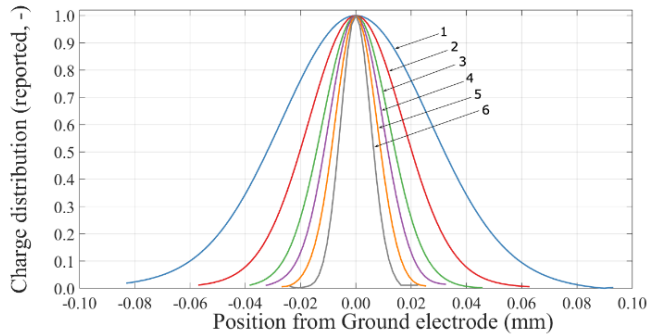


Fig. 6. Variatia densitatii de sarcina (raportata la valoarea maxima) pentru esantioane plane XLPE in zona electrodului de pamant (...)

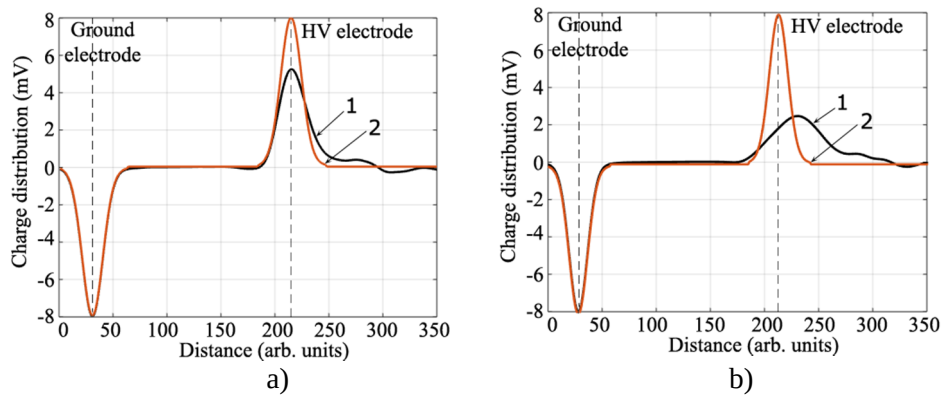


Fig. 7. Atenuarea si dispersia semnalului electric obtinut (1) in comparatie cu semnalul electric ideal (2) pentru un esantion plan XLPE (a) si EPR (b) ($t = 1$ s dupa aplicarea tensiunii, $E_{app} = 5$ kV/mm)

Concluziile Capitolului 5:

- Densitatea de sarcina spatiala acumulata modifica repartitia campului electric prin crearea unui camp electric suplimentar care poate conduce la intensificari locale ce contribuie la procesele de degradare a izolatiei, sustinand Ipoteza H3 (efectele sarcinii spatiale).
- In teza, repartitia densitatii de sarcina spatiala este obtinuta din semnalul electric masurat, tratat numeric si calibrat, neglijand efectele de atenuare si dispersie a semnalului.
- Pentru tratamentul numeric al semnalului, s-a ales valoarea filtrului Gaussian ca fiind 5. Aceasta valoare, desi aleasa pentru a fi potrivita tuturor masuratorilor, are si dezavantajul ca va dispersa in spatiu semnalul electric corespunzator sarcinii spatiale de pe suprafata dintre electrod si esantion (vezi curba 2 din fig. 6), suprapunandu-se, local, semnalului electric corespunzator sarcinii spatiale din vecinatatea electrozilor.
- Valoarea reziduala a densitatii de sarcina poate fi utilizata pentru a evidentia acumularea de sarcina spatiala pentru acelasi material dar supus unor sollicitari diferite, dar si pentru diferite materiale supuse acelorasi sollicitari, si poate fi utilizata pentru a urmari Ipoteza H2 privind cuantificarea efectului imbatranirii termice asupra acumularii de sarcina spatiala.

Capitolul 6. Experimentari

In Capitolul 6 sunt prezentate esantioanele, conditiile si instalatiile de masurare.

6.1. Esantioane

Efectuarea de cercetari asupra esantioanelor plane sau cilindrice multi-strat este tipica pentru proiectarea jonctiunilor de cablu in HVDC si este bine stabilita in literatura daca de interes este ceea ce se intampla in zona de izolatia a jonctiunii. In urma discutiilor Capitolului 2, esantioanele care reprezinta izolatiile jonctiunilor cablurilor de CC care au fost utilizate pentru experimente au fost fabricate la ICME ECAB Bucuresti (esantioane plane si cilindrice). Esantioanele plane multi-strat obtinute din esantioane plane uni-strat urmaresc designul zonei de interfata dintre izolatiile cablului cu izolatia extrudata si izolatiile jonctiunii prefabricate preturnate (aratata a fi cel mai utilizat tip de jonctiune pentru conectarea cablurilor in HVDC). Esantioanele cilindrice urmaresc si mai indeaproape designul aceleiasi zonei de interfata, deoarece includ si conductorul cablului si stratul semiconductor interior.

Esantioanele plane au fost fabricate in laboratorul de R&D al ICME ECAB, pe o presa de laborator GIBITRE Instruments. Materialele primare utilizate au fost granule de polietilena reticulabila de joasa densitate si fasii de cauciuc etilen-propilenic si cauciuc etilen-propilendiena-monomer nevulcanizate. Esantioanele plane au fost obtinute in matrite cu grosime $h_{mould} = 0.3, 0.5$ si 0.8 mm pe baza unor proceduri dezvoltate dupa un numar semnificativ de teste la diferite valori de temperatura si presiune [262] si analiza microscopica a esantioanelor

pentru a determina calitatea suprafetelor lor, existentei de goluri, aglomerari, protuberante etc. (vezi sectiunea §7.1). Cateva din esantioanele plane rezultate sunt prezentate in fig. 8. Acestea au fost fabricate dintr-un singur material (esantioane plane uni-strat, fig. 8, *a*, *b* si *d*) si din doua materiale (esantioane plane multi-strat, fig. 8, *c* si *e*).

Pentru realizarea de esantioane de polietilena reticulata (XLPE) (fig. 8, *a*) s-au utilizat granule de polietilena reticulabila de joasa densitate, Borlink LE4201R, urmand etapele prezentate in Anexa §A.1. Esantioanele de XLPE obtinute pe aceasta cale au grosimea $g = 0.30$ mm si prezinta suprafete relativ netede, fara rugozitati evidente. Abaterea standard pe numarul total de esantioane XLPE fabricate este de 0.004 mm, insa esantioanele obtinute au fost grupate pe categorii unde abaterea standard a grupului este sub 0.002 mm.

Esantioanele de cauciuc etilen-propilenic (EPR) (fig. 8, *b*) au fost obtinute urmand etapele prezentate in Anexa §A.2. Acestea au grosimea $g = 0.50$ mm si prezinta suprafete relativ netede, fara rugozitati evidente. Abaterea standard pe numarul total de esantioane EPR fabricate este de 0.012 mm, insa esantioanele obtinute au fost grupate pe categorii unde abaterea standard a grupului este sub 0.005 mm.

Esantioanele de cauciuc etilen-propilen-diena-monomer (EPDM) ($g = 0.50$ mm) (fig. 8, *d*) au fost obtinute urmand etapele prezentate in Anexa §A.2, precum cele de tip EPR.

Esantioanele multi-strat XLPE / EPR (fig. 8, *c*) au fost obtinute urmand etapele prezentate in Anexa §A.3. Acestea au grosimea $g = 0.80$ mm si o zona de interfata neteda, de forma celei prezentate in sectiunea §7.1. Abaterea standard pe numarul total de esantioane XLPE / EPR fabricate este de 0.016 mm, insa esantioanele obtinute au fost grupate pe categorii unde abaterea standard a grupului este sub 0.006 mm.

Realizarea de esantioane multi-strat XLPE / EPDM ($g = 0.80$ mm) (fig. 8, *e*) urmeaza aceeasi pasi ca cei pentru realizarea de esantioane multi-strat XLPE / EPR (descrisa in §A.3).

Esantioanele sub forma cilindrica reprezinta modele de jonctiuni de CC si au fost realizate de ICME ECAB cu echipamente industriale utilizate la fabricarea cablurilor de medie tensiune. Esantioanele sunt constituite dintr-un conductor multifilar (din Aluminiu) acoperit de un strat semiconductor interior si doua straturi izolatoare, notate cu S_{in} (stratul dispus peste conductor si stratul semiconductor interior, din EPR) si S_{out} (stratul exterior, XLPE) (stratul semiconductor exterior al cablului este, acum, un strat izolator de XLPE).

Structura esantioanelor cilindrice este urmatoarea: conductor rotund multifilar din Aluminiu cu diametru de 14 mm peste care s-a dispus un strat semiconductor din polietilena cu negru de fum (de grosime $g_0 = 0.7 \dots 1$ mm), primul strat izolator S_{in} – din cauciuc etilen propilenic (EPR) (de grosime $g_1 = 3.3 \dots 3.7$ mm) – si, apoi, al doilea strat izolator S_{out} – din polietilena reticulata (XLPE) (de grosime $g_2 = 0.9 \dots 1.2$ mm) (fig. 9).

Pentru a reduce (elimina) tensiunile mecanice interne si continutul de produsi secundari rezultati in urma proceselor tehnologice de fabricare, toate esantioanele au fost supuse, la UPB, unei conditionari termice de 48 h la temperatura de $T = 50$ °C, intr-o etuva de laborator TRADE RAYPA cu circulatie fortata de aer, cu temperatura reglabila (intre 30 si 250 °C).

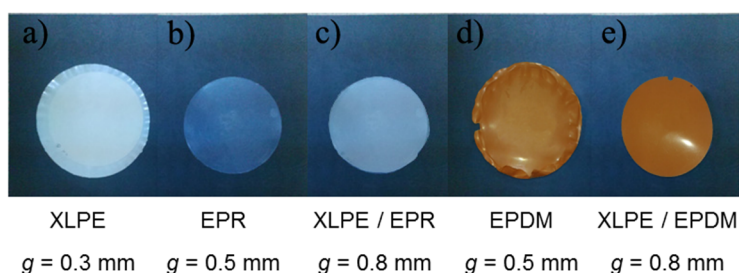


Fig. 8. Esantioane plane fabricate la ICME ECAB, a) XLPE, b) EPR, c) XLPE / EPR, d) EPDM si e) XLPE / EPDM

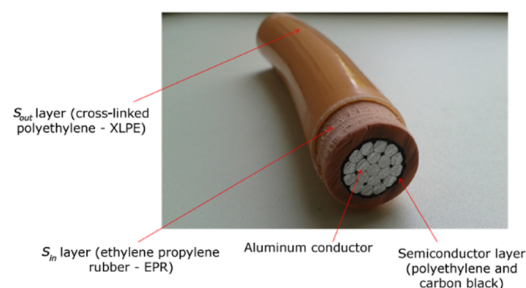


Fig. 9. Esantion cilindric EPR / XLPE fabricat la ICME ECAB

6.2. Instalatii si conditii de masurare

6.2.1. Calorimetrie cu scanare diferentiala (DSC)

Masuratorile DSC s-au efectuat non-izoterm cu un echipament Setaram 131 EVO in cadrul INCDIE ICPE-CA. Mini-esantioane ($3 \times 3 \text{ mm}^2$) prelevate din toate tipurile de materiale au fost masurate, in prezenta aerului (cu debitul 50 ml/min). Temperatura a variat intre 30 si 380°C , cu 4 viteze de crestere: 2 , 4 , 6 si 10°C/min .

Rezultatele experimentale au fost prelucrate cu ajutorul software-ului Calisto Data Processing (CDP) iar temperatura de initiere a oxidarii T_o , a fost calculata conform standardului ASTM E2009-08. Valoarea minima din setul de temperaturi maxime T_m , corespunzatoare reactiilor exoterme de oxidare a mini-esantionului din fiecare tip de material testat a fost utilizata ca temperatura limita pentru imbatranirea termica.

6.2.2. Imbatranirea termica

Imbatranirea termica a esantioanelor neimbatranite (I0) a fost efectuata intr-o etuva de laborator TRADE RAYPA cu circulatie forzata de aer. Temperatura de imbatranire a fost aleasa ca fiind 120°C (vezi §7.2), iar duratele de imbatranire termica au fost de 30 (notata cu I1), 60 (notata cu I2) si 90 de zile (notata cu I3).

Dupa imbatranire, esantioanele au fost transportate la Bologna pentru masuratori ale sarcinii spatiale. Pentru a avea aceeasi linie de baza pentru comparatie, masuratorile au fost efectuate pentru toate esantioanele la $48 - 60$ de ore dupa scoaterea din etuva de laborator. In acest timp este posibil ca o parte a produsilor de degradare sa fi fost neutralizata si densitatea de sarcina spatiala masurata sa fie diferita de cea masurata imediat dupa prelevarea esantioanelor din etuva de laborator.

Un studiu al variatiei densitatii de sarcina spatiala (sau a valorilor remanente ale densitatii de sarcina) cu perioada de depozitare (timpul scurs intre sfarsitul imbatranirii accelerate si masurare) este o perspectiva interesanta, dar pentru caracterizarea materialelor din studiul efectuat, masurarea la acelasi timp a fost considerata suficienta.

6.2.3. Microscopie optica si de baleaj electronic

Determinarile prin microscopie optica (OM) au fost efectuate in cadrul Laboratorului de Materiale Electrotehnice (ELMAT) UPB, pe un microscop optic la o amplificare de $40\times$, pe mini-esantioane XLPE, EPR, EPDM, XLPE / EPR si XLPE / EPDM sectionate la microtom.

Determinarile prin microscopie de baleaj electronic (SEM) au fost realizate la CIRI, Bologna, pe un microscop Phenom ProX. Au fost prelevate mini-esantioane din esantioanele stratificate prin introducerea unei jumutati dintr-un esantion in Azot lichid si sectionarea acesteia in bucati de 1 cm^2 imediat dupa scoaterea din baia de Azot lichid (in cadrul DICAM, Bologna). Mini-esantioanele astfel obtinute au fost fixate intre doua bucati de polietilena si au fost metalizate prin depunerea in vid a unui strat de Aur la LIT, Bologna. Mini-esantioanele metalizate au fost introduse in caseta de masurare a microscopului cu partea din EPR in stanga si cea din XLPE in dreapta. Analiza SEM a fost realizata utilizand detectorul de electroni retro-imprastiati (BSD) la o valoare a tensiunii de 10 kV .

6.2.4. Spectroscopie in infrarosu (FTIR)

Actiunea temperaturii asupra materialului polimeric in prezenta aerului si a umiditatii din aer, conduce la formarea de radicali liberi care, prin reactii succesive conduc la scindarea lantului polimeric precum si la produci de oxidare, cum sunt gruparile carbonil, hidroxil, gruparile nesaturate sau grupari acide grefate pe lantul polimeric [265].

Starea de imbatranire termica a esantioanelor a fost determinata prin spectroscopie in infrarosu (IR) de tip FTIR pe mini-esantioane de XLPE, EPR si EPDM. Spectrele IR ale mini-

esantioanelor in stare neimbatranita si imbatranita au fost înregistrate cu un spectrometru Jasco 4200 cuplat cu un accesoriu ATR JASCO PRO 470-H in cadrul INCDIE ICPE-CA.

Mini-esantioanele au fost masurate direct prin plasarea acestora pe cristalul dispozitivului ATR si apasare cu o forta controlata, folosind urmatoarele conditii de inregistrare a spectrelor: domeniu spectral: $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$; rezolutie: 4 cm^{-1} ; numar scanari: 50 acumulari.

6.2.5. Conductivitatea electrica

Conductivitatea electrica a esantioanelor plane a fost determinata prin metoda curentilor de absorbtie / resorbtie si utilizand electrometrul Keithley 6517B la LIT (Bologna) pentru masuratori la tensiuni ridicate si la ELMAT (Bucuresti) pentru tensiuni reduse.

Pentru masuratorile la tensiune redusa, esantioanele au fost introduse in celula RESISTIVITY Chamber 8009 a Electrometrului Keithley 6517B, fara electrozi aderenti. Pentru masuratorile la tensiune ridicata, esantioanelor li s-au depusi electrozi din aur (LIT, Bologna) si au fost dispusi intr-o celula de masurare speciala realizata la LIT, Bologna (fig. 10).

Pentru a caracteriza diferite materiale la acelasi solicitari electrice (vezi Capitolul 3), se introduce parametrul de studiu *Camp electric aplicat* (E_{app}). In continuare, atat pentru rezultatele masurarii conductivitatii electrice si a sarcinii spatiale (prezentate detaliat in Capitolul 7), cat si pentru calculele numerice (prezentate in Capitolul 8), campul electric aplicat este definit ca raportul dintre tensiunea aplicata esantionului si grosimea acestuia.

Masuratorile au fost efectuate in urmatoarele conditii:

- Temperatura de masurare: $30 - 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Tensiune in CC, polaritate pozitiva
 - o Tensiune redusa: sursa de tensiune incorporata in Keithley 6517B
 - o Tensiune ridicata: F.u.G. Elektronik HCN 35-35000
- Camp electric aplicat: $1 - 30 \text{ kV/mm}$
- Durata masuratoare: 1 ora absorbtie (i_a) si 1 ora resorbtie (i_r)

6.2.6. Permitivitatea electrica

Utilizand metoda spectroscopiei dielectrice (prezentata in Capitolul 4), s-au determinat proprietatile dielectrice ale esantioanelor plane cu un spectrometru dielectric NOVOCONTROL in cadrul ELMAT, Bucuresti.

Esantioanele plane testate au fost discuri (cu $D_{es} = 42 \text{ mm}$), pentru care s-au dispus electrozi aderenti ($D_{el} = 40 \text{ mm}$) din folii din cupru prevazute cu un strat aderent semiconductor (3M Conductive Copper Foil Tape 3313). Masuratorile au fost realizate pentru frecvente $f = 10 \text{ mHz} \dots 1 \text{ MHz}$, la $T = 30 \text{ }^{\circ}\text{C} \dots 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

6.2.7. Sarcina spatiala

Densitatea de sarcina spatiala pentru esantioane plane a fost determinata utilizand metoda PEA, descrisa in Capitolul 5. Pentru esantioane cilindrice se foloseste o schema similara, utilizand aceleasi principii dar adaptate unei geometrii cilindrice, unde electrozii de inalta tensiune si de pamant sunt, aici, conectati la interiorul si exteriorul esantioanelor cilindrice si impulsurile de tensiune sunt aplicate de catre un generator de impulsuri care este conectat la partea exterioara a esantionului [268]. In cadrul masuratorilor pe esantioane cilindrice, se determina distributia sarcinii spatiale intr-o zona care depinde de lungimea senzorului piezoelectric si de suprafata de contact dintre exteriorul esantionului si partea de sus a celulei de masura.

Echipamentul utilizat pentru masuratori PEA pe esantioane plane (fara electrozi aderenti) si cilindrice a fost furnizat de TechIMP (AltaNova) si a fost prezent in cadrul LIT, Bologna. Sensibilitatea masuratorilor (esantioane plane si cilindrice) este $\pm 0.15 \text{ C/m}^3$.



Fig. 10. Celula de masurare a conductivitatii electrice

Masuratorile pentru esantioane plane au fost efectuate in urmatoarele conditii:

- Temperatura de masurare: 30 °C si 60 °C
- Tensiune in CC, polaritate pozitiva, Camp electric aplicat: 1 – 50 kV/mm
- Durata masuratoare: 1 ora Voltage-ON si 1 ora Voltage-OFF

Masuratorile pentru esantioane cilindrice au fost efectuate in urmatoarele conditii:

- Temperatura de masurare: 30 °C
- Tensiune in CC, polaritate pozitiva: 25, 35, 50, 75 si 100 kV
- Valoarea medie a campului electric aplicat: $\approx 5 - 20$ kV/mm
- Durata masuratoare: 1 ora Voltage-ON si 1 ora Voltage-OFF

Pasii de masurare a densitatii de sarcina spatiala (atat pentru esantioane plane, cat si cilindrice) sunt prezentati in sectiunea §6.7.3. Se prezinta in acest rezumat doar anumite parti din Pasul 3 (Achizitia semnalului electric) si Pasul 4 (Elaborarea semnalului electric), respectiv:

- Pentru masuratorile de tipul Voltage-ON pe esantioane plane, cresterea tensiunii pana la valoarea stabilita s-a efectuat continuu, cu o panta de aproximativ 3 kV/s, si pentru esantioane cilindrice s-a crescut continuu in 2 s pentru tensiunea de 25 kV, 5 s pentru 50 kV, 10 s pentru 75 kV si 30 s pentru 100 kV.
- Pentru masuratorile de tipul Voltage-OFF pe esantioane plane, anulara tensiunii s-a facut prin descresterea rapida a valorii acesteia (in 1 – 2 s) pana la zero, oprirea alimentarii sursei de tensiune si conectarea ambilor electrozi ai celulei de masurare la pamant. Pentru esantioanele cilindrice, anulara tensiunii s-a facut prin descresterea rapid a valorii acesteia (panta de aprox. 15 kV/s), oprirea alimentarii sursei de tensiune si conectarea la pamant.
- Toate semnalele electrice au fost prelucrate conform etapelor descrise in §5.2. Pentru etapa de deconvolutie, valoarea filtrului Gaussian a fost 5 si s-au neglijat atenuarea si dispersia semnalului electric.
- Deoarece s-a neglijat atenuarea si dispersia semnalului electric, corectitudinea repartitiei densitatii de sarcina obtinuta din prelucrarea semnalului electric este verificata printr-un *pas additional* introdus in etapa de prelucrare numerica a semnalului electric din aplicatia din softul MATLAB. Acest *pas additional* consta in determinarea repartitiei campului electric $E(x)$ (cunoscand repartitia densitatii volumice de sarcina $\rho_v(x)$), urmata de determinarea repartitiei potentialului electric $V(x)$ si de verificarea conditiilor pe frontiere (valoarea potentialului electric la pozitiile celor doi electrozi, x_0 si x_g). Daca conditiile pe frontiere nu se verifica, atunci se impun acestora valorile reale si se recalculeaza repartitia campului electric si a sarcinii spatiale.
- Repartitia densitatii de sarcina a fost determinata, pentru fiecare achizitie, din valorile masurate ale semnalului PEA din momentul repectiv printr-o procedura pentru a descrie mai corect repartitia densitatii de sarcina la un moment dat, considerand fluctuatiile tranzitorii ale semnalului. Procedura este descrisa in detaliu in §6.2.7.3. – Pasul 4.

Concluziile Capitolului 6:

- Esantioane plane (XLPE, EPR, EPDM, XLPE / EPR, XLPE / EPDM) si cilindrice (EPR / XLPE) au fost fabricate cu meticulozitate. Esantioanele plane au fost investigate prin microscopie optica si de baleaj electronic (pentru a investiga Ipoteza H4 cu privire la imbunatatirea calitatii izolatiei jonctiunii). Esantioanele multi-strat s-au dovedit a fi in concordanta cu structurile utilizate in literatura pentru izolatia jonctiunilor, si urmaresc zona de izolatia intre stratul izolator extrudat al cablurilor si stratul izolator cu compusi elastomerici al jonctiunilor prefabricate preturnate (prezentate in amanunt in Capitolul 2).
- Pentru a investiga Ipotezele H1 si H2 cu privire la efectele negative ale imbatranirii termice, esantioanele au fost imbatranite termic pentru o durata de 30, 60 si 90 zile, iar starea lor de imbatranire a fost determinata prin masuratori FTIR.
- S-au determinat, atat pentru starea neimbatranita, cat si pentru diferite stari de imbatranire, conductivitatea electrica, permitivitatea electrica si sarcina spatiala. Masuratorile au fost efectuate sub diferite sollicitari electrice si termice, iar pentru determinarea sarcinii spatiale si a intensitatii campului electric, semnalul electric a fost prelucrat numeric utilizand un program de calcul oferit de catre TechIMP (AltaNova), dar imbunatatit considerabil.

Capitolul 7. Rezultate experimentale

In Capitolul 7 sunt prezentate rezultatele experimentale privind imbatranirea termica accelerata a esantioanelor, forma interfetei pentru esantioanele multi-strat (obtinuta prin microscopie) si influenta parametrilor de lucru (tensiunea electrica si temperatura aplicata in timpul masurarii, durata de imbatranire etc.) asupra proprietatilor materialelor studiate: conductivitate electrica, permitivitate electrica, densitatea sarcinii spatiale.

7.1. OM si SEM

Suprafetele esantioanelor neimbatranite uni-strat XLPE si EPR sunt relativ netede, respectiv, la nivel macroscopic, nu se remarca pori deschisi, cratere etc. Drept urmare, la formarea esantioanelor multi-strat, straturile intermediare (de aer) vor avea grosimi relativ reduse (fig. 11). Pentru o analiza mai aprofundata a calitatii interfetelor, esantioane neimbatranite XLPE / EPR au fost studiate prin SEM. Unele dintre rezultate sunt prezentate in figs. 12 – 13. Figura 13 arata ca exista o zona continua intre cele doua materiale constituinte, diferita de zonele adiacente si ca aceasta are o grosime de aproximativ 0.5 micrometri in cazul esantioanelor neimbatranite.

7.2. DSC si FTIR

S-au efectuat masuratori de tip DSC pentru determinarea temperaturii maxim admisibile de imbatranire ale esantioanelor. Rezultatele sunt prezentate in fig. 14. Pe baza valorilor temperaturii de topire pentru esantioane XLPE (fig. 14, curba 1, respectiv, 123 °C) si pentru esantioane EPDM (fig. 14, curba 2, respectiv, 139 °C), s-a ales temperatura de imbatranire $T = 120$ °C.

Imbatranirile s-au efectuat conform sectiunii §6.2.2 la temperatura de 120 °C pentru trei durate, respectiv 30 (I1), 60 (I2) si 90 (I3) zile. S-a constatat ca, in timpul proceselor de imbatranire, esantioanele, atat plane, cat si cilindrice, sufera o serie de transformari fizice, respectiv modificari vizuale (schimbare a culorii inspre maroniu) si curbari ale acestora.

Spectrele FTIR ale esantioanelor arata ca acestea au suferit o imbatranire diferita si ca sunt distincte pentru fiecare stare de imbatranire. Prezenta diferitelor reziduuri de imbatranire arata ca structura morfologica si chimica a esantioanelor s-a schimbat o data cu durata imbatranirii si, prin urmare, este de asteptat ca imbatranirea termica sa aiba un efect asupra proprietatilor electrice si a sarcinii spatiale in izolatiile jonctiunilor cablurilor (urmand Ipotezele H1 si H2). Unele dintre rezultate sunt prezentate in fig. 15.

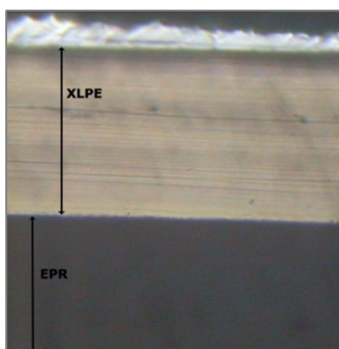


Fig. 11. Interfata esantioanelor neimbatranite XLPE / EPR (OM, 40 X amplificare)

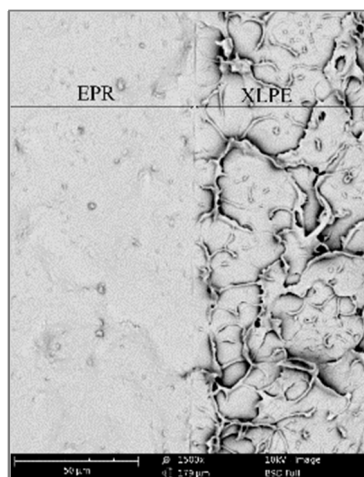


Fig. 12. Interfata esantioanelor neimbatranite XLPE / EPR (SEM, 1500 X amplificare)

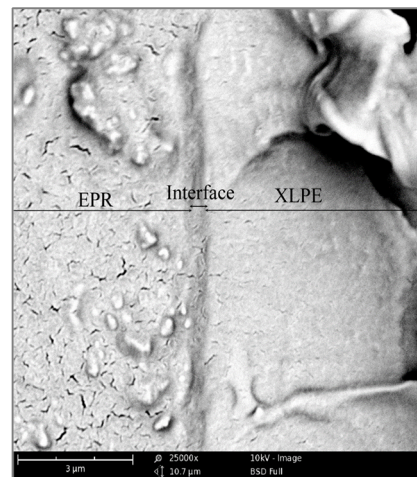


Fig. 13. Interfata esantioanelor neimbatranite XLPE / EPR (SEM, 25000 X amplificare)

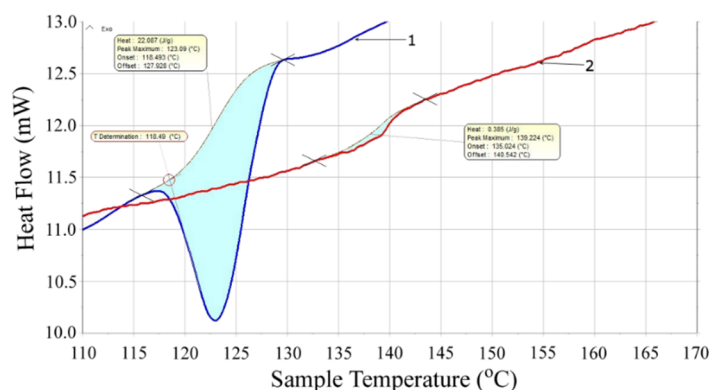


Fig. 14. Determinarea temperaturilor de topire pentru XLPE (1) si EPDM (2) prin DSC

Spectrele FTIR pentru esantioane XLPE, neimbatranite (curba 1) si imbatranite la 120 °C pentru 30 (2), 60 (3) si 90 (4) zile sunt prezentate in fig. 15, a. Se constata ca solicitarea termica a XLPE induce in spectrul FTIR o crestere in intensitate a maximului de la cca. 1724 cm^{-1} (fig. 15, a) datorita formarii unor grupari de tipul carbonil (-C=O) aldehida [272]. De asemenea se observa si cresterea absorbantelor la cca. 1265 cm^{-1} , respectiv 1095 cm^{-1} datorate unor vibratii de intindere a unor legaturi chimice sau datorita prezentei unor tipuri de antioxidanti [273].

Spectrele FTIR pentru esantioane EPR, neimbatranite (curba 1) si imbatranite la 120 °C pentru 30 (2), 60 (3) si 90 (4) zile sunt prezentate in fig. 15, b. Se observa o largire a picului cuprins in regiunea 1400 – 1800 cm^{-1} (fig. 15, b) cu cresterea timpului de imbatranire, regiune spectrala corespunzatoare unor diferiti compusi de oxidare de tip carbonil (-C=O). Acest lucru este corelat si cu cresterea in intensitate a picului de cca. 1320 cm^{-1} datorat vibratiei de intindere a unor legaturi chimice C-H. Cresterea intensitatii acestor benzi este datorata cresterii gradului de imbatranire indus de tratamentul termic. Existenta unei benzi cu maximul la cca. 1542 cm^{-1} poate fi observata in spectrul EPR initial (fig. 15, b, curba 1 care nu este caracteristica acestui tip de material. Se observa ca aceasta banda dispare la expunerea termica a materialului pana la 30 zile la 120 °C. Aceasta banda poate proveni de la anumiti compusi reziduali din procesul de fabricare a esantioanelor.

Figura 15, c, prezinta spectrele FTIR pentru esantioane EPDM, neimbatranite (curba 1) si imbatranite la 120 °C pentru 30 (2), 60 (3) si 90 (4) zile. O largire a picului cuprins in regiunea 1545 – 1800 cm^{-1} poate fi observata (fig. 15, c) cu cresterea timpului de imbatranire, regiune spectrala corespunzatoare unor diferiti compusi de oxidare de tip carbonil (-C=O). Acest lucru

este corelat si cu cresterea absorbantei in regiunea gruparilor hidroxil (-OH) la cca. 3400 cm^{-1} (fig. 15, c) si cu cresterea in intensitate a picului de la cca. 1320 cm^{-1} datorat vibratiei de intindere a unor legaturi chimice C-H. Cresterea intensitatii acestor benzi este datorata cresterii gradului de imbatranire indus de tratamentul termic, aspect confirmat si de alte rezultate similare obtinute pentru esantioane EPDM in literatura [274]. Pe de alta parte, in spectrul esantioanelor din EPDM neimbatranite se observa existenta unei benzi cu maximul la cca. 1542 cm^{-1} (similar cu EPR) care nu este caracteristica acestui tip de material. Aceasta banda dispare la expunerea termica a materialului pana la 30 de zile la $120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

7.3. Conductivitate electrica

Rezultatele masuratorilor conductivitatii electrice sunt prezentate in figs. 16 – 18.

Valorile conductivitatii electrice scad odata cu timpul de masurare, pentru toate tipurile de esantioane, mai rapid in primele secunde si se stabilizeaza dupa o ora pentru esantioane XLPE si mai mult de o ora pentru esantioane EPR si EPDM.

Variatiile in timp ale conductivitatii electrice pentru diferite valori ale campului aplicat (intre 1 si 20 kV/mm) sunt prezentate in figura 16. Se constata ca pentru toate materialele prezentate conductivitatea electrica creste cu intensitatea campului electric aplicat, insa mai intens pentru esantioanele EPR (fig. 16, curba 2) fata de XLPE (fig. 16, curba 1).

Variatiile in timp ale conductivitatii electrice pentru diferite valori ale temperaturii de masurare (pentru 30 (1), 50 (2) si $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (3)) sunt prezentate in fig. 17, a, pentru XLPE si fig. 17, b, pentru EPR. Se constata ca pentru toate materialele prezentate conductivitatea electrica creste cu temperatura de masura, indiferent de valoarea campului electric aplicat.

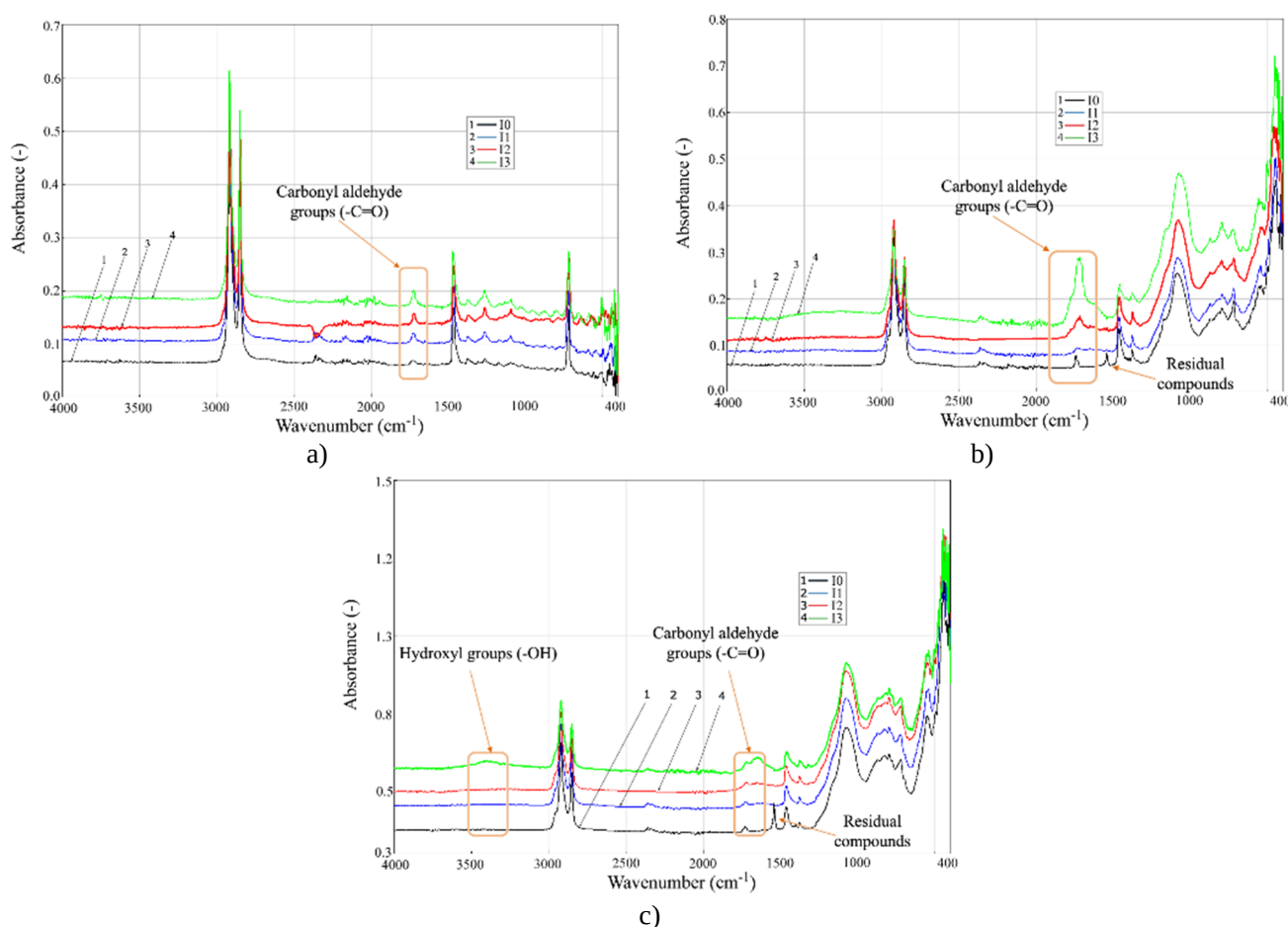


Fig. 15. Spectre FTIR pentru esantioane a) XLPE, b) EPR si c) EPDM, neimbatranite (1) si imbatranite pentru 30 zile (2), 60 zile (3) si 90 zile (4)

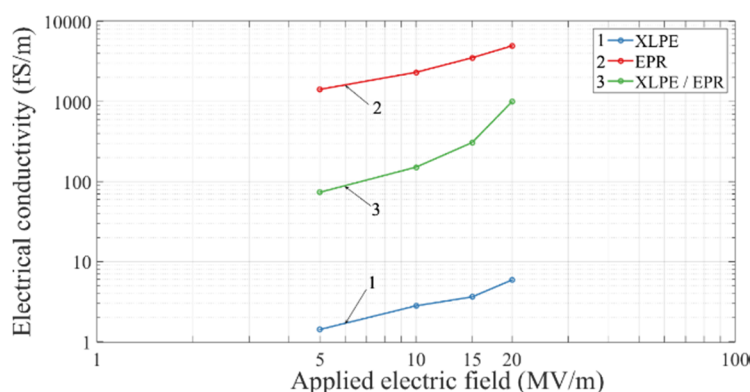


Fig. 16. Variatia conductivitatii electrice cu intensitatea campului electric aplicat, pentru esantioane neimbatranite XLPE (1), EPR (2) si XLPE / EPR (3) ($t = 3600$ s, $T = 70$ °C)

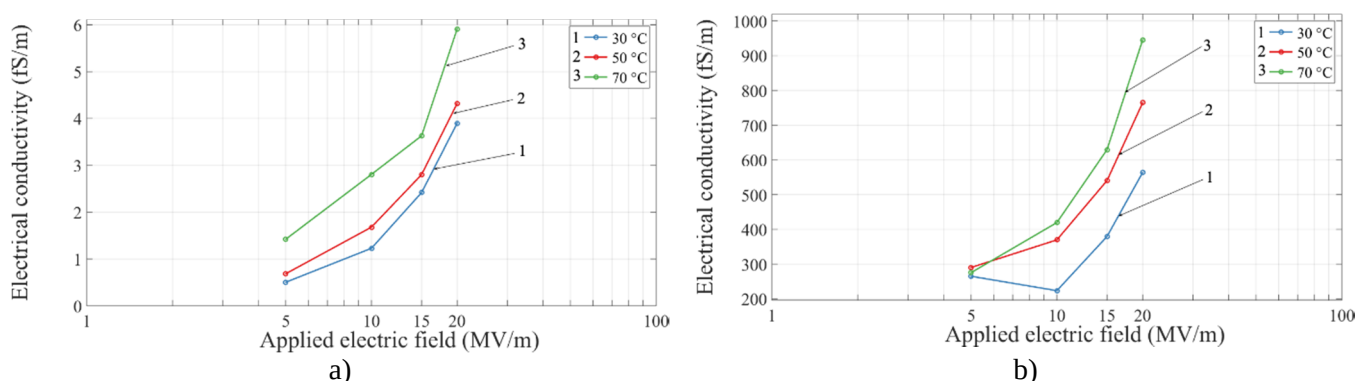


Fig. 17. Variatia conductivitatii electrice cu intensitatea campului electric, pentru esantioane neimbatranite XLPE (a) si EPR (b), la temperatura de masurare $T = 30$ °C (1), 50 °C (2) si 70 °C (3) ($t = 3600$ s)

Figura 18 prezinta variatiile in timp ale conductivitatii electrice pentru esantioane plane neimbatranite (I0) si imbatranite termic pentru 30 (I1), 60 (I2) si 90 (I3) de zile, de tipul XLPE (fig. 18, curba 1), EPR (fig. 18, curba 2) si XLPE / EPR (fig. 18, curba 3). Se constata ca pentru toate materialele valorile conductivitatii electrice sunt mai mari o data cu imbatranirea termica, mai mult pentru esantioanele de tipul EPR sau EPDM (fig. 18, curba 2) si mai putin pentru XLPE (fig. 18, curba 1). Astfel, durata de imbatranire termica are un efect negativ asupra valorilor conductivitatii electrice a esantioanelor studiate (confirmand partial Ipoteza H1).

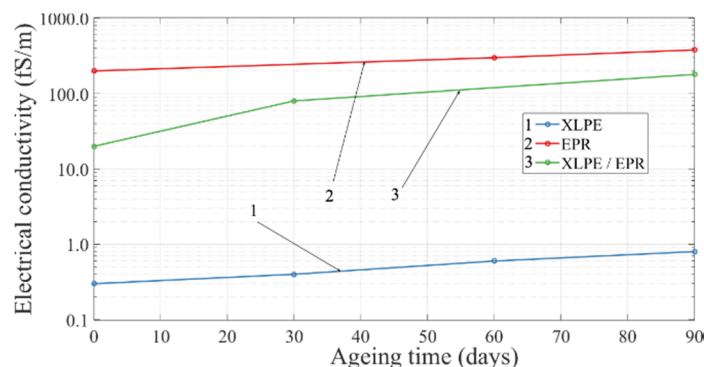


Fig. 18. Variatia conductivitatii electrice cu durata de imbatranire, pentru esantioane XLPE (1), EPR (2) si XLPE / EPR (3) ($E_{app} = 1$ kV/mm, $t = 3600$ s, $T = 30$ °C)

7.4. Permitivitate electrica

Utilizand metoda spectroscopiei dielectrice in gama de frecvente $f = 10^{-2} - 10^6$ Hz a fost determinata partea reala a permitivitatii electrice complexe, sau permitivitate relativa ($\epsilon'_r = \epsilon_r$).

O posibila legatura intre variatia valorilor permitivitatii relative la frecvente joase (aproprate de CC) si acumularea de sarcina spatiala (in CC) nu a fost analizata in teza, desi este o perspectiva interesanta de urmarit pentru un studiu viitor.

A fost investigata Ipoteza H1, care are legatura cu efectele duratei de imbatranire termica asupra proprietatilor electrice (aici, permitivitate relativa) a izolatiilor jonctiunilor.

S-a constatat ca valorile ϵ_r cresc o data cu scaderea frecventei, pentru toate esantioanele, indiferent de starea lor (neimbatranite sau imbatranite termic). Acest lucru este in acord cu alte lucrari [275] si poate fi explicat prin intensificarea polarizarii interfaciale locale, prin dispersia de frecventa joasa si prin cuplarea dintre ioni negativi si pozitivi si formarea de noi dipoli cu inertie crescuta (necesitand frecvente joase pentru a putea urmari campul electric).

Variatia lui ϵ_r ($f = 50$ Hz) cu temperatura de masurare (in $^{\circ}\text{C}$), pentru esantioane neimbatranite XLPE, EPR si EPDM este prezentata in Tabelul 1. Se poate observa ca, pentru toate esantioanele, ϵ_r scade odata cu cresterea temperaturii de masurare. Aceste rezultate sunt similare cu cele obtinute in literatura de specialitate pentru aceste tipuri de materiale [281]. Datorita prezentei impuritatilor in regiunile amorfe ale esantioanelor, toate tipurile de esantioane poseda un grad de polarizare de orientare; astfel, rezultatele sunt atribuite, pe de o parte, efectului caldurii asupra scaderii polarizatiei de orientare datorita miscarii termice aleatorii crescute si, pe de alta parte, scaderii densitatii polimerului odata cu cresterea temperaturii (polarizatia este redusa datorita scaderii numarului mediu de dipoli pe unitate de volum).

Figura 19 prezinta variatia ϵ_r cu starea materialului, pentru XLPE, EPR si EPDM. Se constata ca aceasta crestere a duratei de imbatranire termica determina o reducere a valorilor ϵ_r pentru esantioanele XLPE si EPDM si o crestere pentru esantioanele EPR, rezultate similare cu cele obtinute in literatura pentru aceste tipuri de materiale ([246], [278], [280]).

Ipoteza H1 este confirmata partial, numai pentru esantioanele EPR, deoarece pentru cele de tip EPDM suma tuturor mecanismelor implicate a redus valorile permitivitatii relative. Cu toate acestea, rezultatele sustin Ipoteza H4 in ceea ce priveste calitatea imbunatatita a designului jonctiunii, deoarece EPR s-a dovedit a avea un ϵ_r mai mare cu durata de imbatranire (datorandu-se prezentei a mai multor produse reziduali, asa cum s-a vazut in Capitolele 3 si 5).

Tabel 1. Variatia permitivitatii relative (la $f = 50$ Hz) cu temperatura de masurare (in $^{\circ}\text{C}$), pentru esantioane neimbatranite XLPE, EPR si EPDM

Material	Temperatura de masurare						
	30 $^{\circ}\text{C}$	40 $^{\circ}\text{C}$	50 $^{\circ}\text{C}$	60 $^{\circ}\text{C}$	70 $^{\circ}\text{C}$	80 $^{\circ}\text{C}$	90 $^{\circ}\text{C}$
XLPE	2.26	2.20	2.18	2.17	2.16	2.10	2.05
EPR	2.80	2.76	2.74	2.72	2.70	2.66	2.65
EPDM	3.20	3.16	3.13	3.11	3.09	3.08	3.05

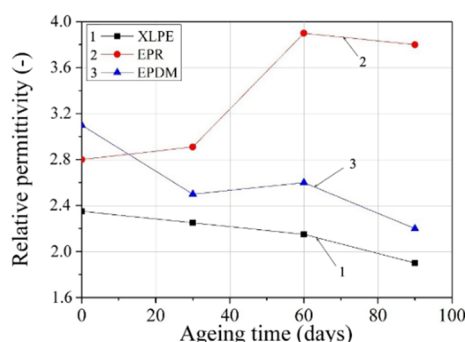


Fig. 19. Variatia permitivitatii relative cu durata de imbatranire, pentru XLPE (1), EPR (2) si EPDM (3) ($f = 50$ Hz, $T = 30$ $^{\circ}\text{C}$)

7.5. Sarcina spatiala

Rezultatele masuratorilor de sarcina spatiala sunt prezentate separat pentru fiecare tip de esantion si sunt impartite in 4 – 5 categorii: variatia in timp si spatiu, influenta campului electric aplicat, influenta duratei de imbatranire, valoarea reziduala a densitatii de sarcina si, pentru esantioanele multi-strat, influenta partii esantionului conectata la electrodul de tensiune (HV).

7.5.1. XLPE (Esantioane plane uni-strat)

Figura 20 prezinta variatia densitatii volumice a sarcinii spatiale ρ_v in timp si spatiu pentru esantioane XLPE neimbatranite, pentru $E_{app} = 10$ kV/mm in Voltage-ON (pentru 3600 s) si dupa anulara tensiunii (de la 3600 pana la 7200 s, respectiv in Voltage-OFF), esantioanele fiind conectate intre electrodul de inalta tensiune (HV) de polaritate pozitiva si electrodul de pamant (GND). Echipamentul de masurare se afla conectat la GND. Se constata ca pe durata aplicarii tensiunii electrice se acumuleaza homosarcina langa ambii electrozi si ca nu se acumuleaza o densitate de sarcina notabila in volumul esantionului. Dupa anulara tensiunii se observa ca se acumuleaza homosarcina langa HV si heterosarcina langa GND, iar in volumul esantionului se acumuleaza o densitate de sarcina de valoare redusa si de polaritate pozitiva.

Repartitia ρ_v este influentata de valoarea E_{app} , atat in Voltage-ON, cat si in Voltage-OFF. In prezenta tensiunii, cresterea E_{app} (de la 2 la 30 kV/mm) conduce la cresterea ρ_v din vecinatatea electrozilor: de 19 ori in vecinatatea HV si de 17 ori in vecinatatea GND (fig. 21), putandu-se datora intensificarii fenomenelor de injectie de sarcina la electrozi.

Pentru toate valorile E_{app} , la punctele din vecinatatea GND, ρ_v creste in primele 30 s dupa aplicarea tensiunii. Dupa 30 s, ρ_v ramane constant pentru $E_{app} = 2 - 10$ kV/mm si creste pentru $E_{app} > 10$ kV/mm. In volumul esantionului, ρ_v creste in timp. Dupa anulara tensiunii, atat langa ambii electrozi, cat si in volumul esantionului, ρ_v descreste rapid catre o valoare constanta (nonzero) pentru $E_{app} > 5$ kV/mm si egala cu zero pentru $E_{app} = 2 - 5$ kV/mm.

Repartitia ρ_v depinde si de durata de imbatranire ale esantioanelor XLPE, cu mai multe schimbari o data cu cresterea duratei de imbatranire (fig. 22). Se constata ca valorile lui ρ_v sunt mai ridicate in cazul duratei de imbatranire de 30 zile comparativ cu 60 zile. Aceasta s-ar putea datora, probabil, eliminarii unor purtatori de sarcina existenti in timpul solicitarii termice. Cu cresterea duratei de imbatranire la valori mai mari de 60 zile, XLPE-ul se degradeaza, apar noi purtatori de sarcina si valorile lui ρ_v cresc. Dupa anulara tensiunii (Voltage-OFF), in esantioanele imbatranite, ρ_v scade in vecinatatea electrozilor si creste in zonele centrale.

Pe baza curbei de variatie cu coordonata x a ρ_v determinata dupa anulara tensiunii (la 10 s), s-a determinat valoarea reziduala a densitatii de sarcina, $\rho_{v,avg}$ pentru diferite valori E_{app} . Variatiile lui $\rho_{v,avg}$ cu E_{app} si cu durata de imbatranire pentru esantioanele XLPE sunt prezentate in fig. 23. $\rho_{v,avg}$ creste cu E_{app} , mai intens pentru $E_{app} > 15$ kV/mm pentru esantioane neimbatranite si pentru $E_{app} > 10$ kV/mm pentru cele imbatranite (pragul corespunzator intensificarii mecanismelor de injectie de sarcina, care scade o data cu cresterea duratei de imbatranire), si scade la inceputul solicitarii termice (primele 60 de zile, fig. 23), dar dupa 90 de zile valorile lui $\rho_{v,avg}$ le depasesc pe cele ale esantioanelor neimbatranite (punctul P_3 , fig. 23).

7.5.2. EPR (Esantioane plane uni-strat)

Figura 24 prezinta variatia densitatii volumice a sarcinii spatiale ρ_v in timp si spatiu pentru esantioane EPR neimbatranite, pentru $E_{app} = 10$ kV/mm in Voltage-ON (pentru 3600 s) si dupa anulara tensiunii (de la 3600 pana la 7200 s, respectiv in Voltage-OFF), esantioanele fiind conectate intre electrodul de inalta tensiune (HV) de polaritate pozitiva si electrodul de pamant (GND). Echipamentul de masurare se afla conectat la GND. Se constata ca, pe durata aplicarii tensiunii electrice, se acumuleaza sarcina de polaritate pozitiva langa electrodul de pamant si ca aceasta se deplaseaza in timp catre volumul esantionului. La anulara tensiunii, aceasta se deplaseaza catre electrodul de pamant si dispare in 20 de minute.

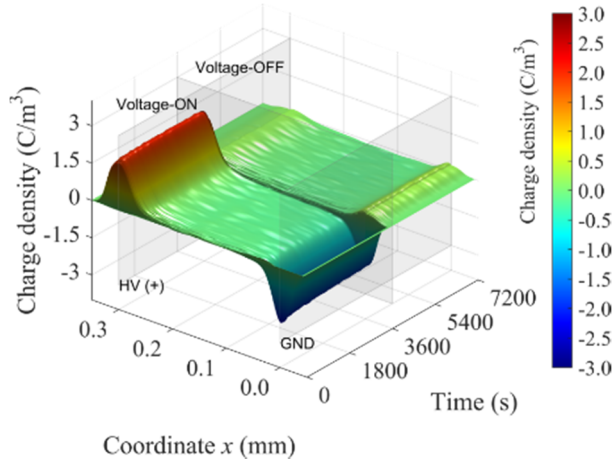


Fig. 20. Variatia densitatii de sarcina in timp si cu coordonata x , pentru esantioane neimbatranite XLPE ($E_{app} = 10 \text{ kV/mm}$)

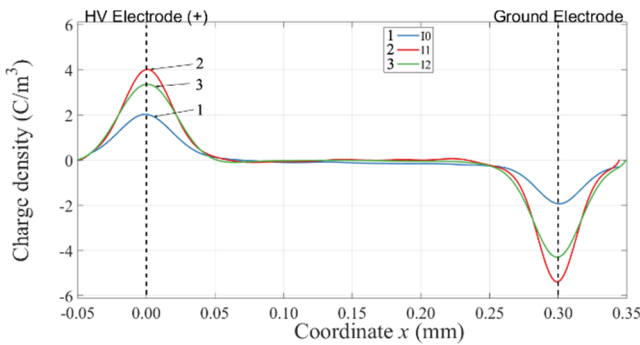


Fig. 22. Variatia densitatii de sarcina cu coordonata x , la 1 ora dupa aplicarea tensiunii, pentru esantioane XLPE neimbatranite (I0, 1) si imbatranite pentru 30 zile (I1, 2) si 60 zile (I2, 3) ($t = 3600 \text{ s}$, $E_{app} = 10 \text{ kV/mm}$, Voltage-ON)

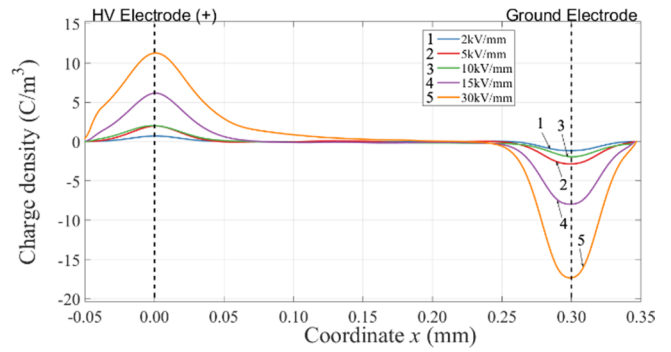


Fig. 21. Variatia densitatii de sarcina cu coordonata x , la 1 ora dupa aplicarea tensiunii, pentru esantioane neimbatranite XLPE pentru $E_{app} = 2$ (1), 5 (2), 10 (3), 15 (4) si 30 (5) kV/mm ($t = 3600 \text{ s}$, Voltage-ON)

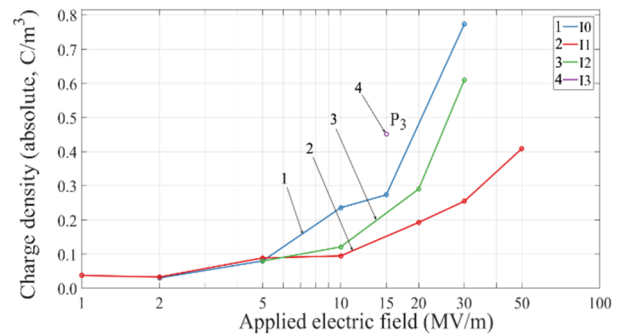


Fig. 23. Variatia valorii reziduale a densitatii de sarcina spatiala cu intensitatea campului electric pentru esantioane XLPE neimbatranite (I0, 1), imbatranite pentru 30 zile (I1, 2), 60 zile (I2, 3) si 90 zile (I3, 4, punctul P_3), la 10 s dupa anularea tensiunii

Repartitia ρ_v este influentata de valoarea E_{app} , atat in Voltage-ON, cat si in Voltage-OFF. In prezenta tensiunii, cresterea E_{app} (de la 2 la 30 kV/mm) conduce la cresterea ρ_v din vecinatatea electrozilor: de aprox. 4 ori in vecinatatea HV si de aprox. 5 ori in vecinatatea GND (fig. 25), si se datoreaza intensificarii fenomenelor de injectie de sarcina la electrozi [294]. Pachetul de sarcina prezent in volumul esantionului isi schimba pozitia si amplitudinea o data cu cresterea lui E_{app} : la acelasi moment (3600 s) amplitudinea acestuia este mai mare, este mai larg in spatiu si este mai aproape de electrodul de HV.

Pentru toate valorile lui E_{app} , la punctele din vecinatatea GND (la $x_p = 0.47 \text{ mm}$), ρ_v creste in primele 5 minute dupa aplicarea tensiunii, iar dupa aceea ramane constant pentru $E_{app} = 2 - 15 \text{ kV/mm}$ si descreste pentru $E_{app} > 15 \text{ kV/mm}$. In volumul esantionului ρ_v creste in timp, dar este afectat de strabaterea esantionului de catre pachetul de sarcina. Dupa anularea tensiunii repartitia lui ρ_v se schimba. Valorile maxime ale lui ρ_v , aflate in vecinatatea electrozilor, se deplaseaza spre interiorul esantioanelor, iar amplitudinea pachetului de sarcina din volumul esantionului scade, mai intens pentru valori ridicate ale lui E_{app} si mai incet pentru valori reduse ale lui E_{app} . Dupa 20 minute, valorile lui ρ_v din vecinatatea GND raman constante, egale cu zero pentru $E_{app} < 20 \text{ kV/mm}$ si non-zero pentru valori mai ridicate ale lui E_{app} , iar in volumul esantionului ρ_v ramane la o valoare diferita de zero pentru orice valoare a lui E_{app} .

Repartitia densitatii de sarcina depinde in mod considerabil si de gradul de imbatranire al esantioanelor EPR. In Voltage-ON, valorile lui ρ_v din vecinatatea GND scad in esantioanele

imbatranite fata de cele neimbatranite, cu atat mai mult cu cat duratele de imbatranire sunt mai lungi (fig. 26), ceea ce arata ca se acumuleaza sarcina de polaritate opusa electrodului GND in vecinatatea acestuia, lucru evidentiat si de alti autori pentru esantioane EPR imbatranite [246].

Valorile lui ρ_v corespunzatoare pachetului de sarcina prezent in esantion sunt mai reduse, dar ca acesta este mai aproape de HV cu cat durata de imbatranire este mai mare. Aceasta s-ar putea datora, probabil, modificarii structurii chimice a EPR-ului si, implicit, pe de-o parte a cresterii numarului de capcane adanci in care purtatorii de sarcina sunt captati (scazand valorile maxime ale pachetului de sarcina, cu starea materialului) [246], si pe de-o alta parte a facilitarii fenomenului de difuzie a purtatorilor de sarcina in esantion (crescand mobilitatea pachetului de sarcina) la deplasarea in volumul esantionului.

Pe durata Voltage-ON, langa GND, valorile lui ρ_v cresc (mai rapid) in primele 10 minute si descresc in timp, la valori dependente de duratele de imbatranire (cele mai ridicate pentru esantioanele neimbatranite si cele mai reduse pentru cele imbatranite 60 zile). In Voltage-OFF se observa ca sarcina de polaritate opusa celei a electrodului se acumuleaza langa GND (heterosarcina), la o amplitudine mai mare pentru esantioanele imbatranite, si ca pentru esantioanele imbatranite este prezenta sarcina de polaritate negativa in zona centrala a esantioanelor. Variatia in timp a densitatii de sarcina este similara aceleia din cazul prezentei tensiunii, cu observatia ca valorile lui ρ_v scad mai rapid cu cat esantionul este mai imbatranit, ajung sa devina pozitive (homosarcina devine heterosarcina) si se stabilizeaza la valori superioare acelor din esantioanele.

Valorile lui $\rho_{v,avg}$ cresc cu E_{app} si pragul corespunzator injectiei de sarcina este mai redus in cazul esantioanelor imbatranite fata de cele neimbatranite ($E_{app} > 10$ kV/mm, neimbatranite, si $E_{app} > 5$ kV/mm, imbatranite). $\rho_{v,avg}$ descreste la inceputul solicitarilor termice (primele 60 zile, fig. 27), dar dupa 90 zile ele este superior esantioanelor neimbatranite (punctul P_3 , fig. 27).

7.5.3. EPDM (Esantioane plane uni-strat)

Figura 28 prezinta variatia densitatii volumice a sarcinii spatiale ρ_v in timp si spatiu pentru esantioane EPDM neimbatranite, pentru $E_{app} = 10$ kV/mm in Voltage-ON (pentru 3600 s) si dupa anulara tensiunii (de la 3600 pana la 7200 s, respectiv in Voltage-OFF), esantioanele fiind conectate intre electrodul de inalta tensiune (HV) de polaritate pozitiva si electrodul de pamant (GND). Echipamentul de masurare se afla conectat la GND. Se constata ca, pe durata aplicarii tensiunii electrice, se acumuleaza in timp homosarcina langa electrodul HV si sarcina de polaritate negativa langa GND ce se deplaseaza catre volumul esantionului si ce lasa in urma, langa GND, o sarcina de polaritate pozitiva. La anulara tensiunii, o mare parte din sarcinile pozitive si negative din volumul esantionului in vecinatatea GND se recombina si dispar, in contrast cu sarcina din imediata vecinatate a GND (de polaritate pozitiva, heterosarcina) care ramane langa electrod pana la finalul timpului de masurare.

Repartitia lui ρ_v este modificata si de valorile lui E_{app} , atat pe durata Voltage-ON, cat si in Voltage-OFF. In prezenta tensiunii aplicate (fig. 29), cresterea lui E_{app} (de la 2 la 30 kV/mm) conduce la o injectie de sarcina spatiala de la electrodul de HV in vecinatatea acestuia (homosarcina) si, pentru $E_{app} > 10$ kV/mm, injectie de sarcina de polaritate pozitiva langa electrodul GND (heterosarcina). Cu cresterea valorilor lui E_{app} , pachetul de sarcina din volumul esantionului creste in amplitudine dar nu isi schimba pozitia (comparativ cu EPR, vezi fig. 25).

Rezultate raportate in literatura pentru esantioane de tip EPDM difera in functie de tipul de diena utilizata in procesul de fabricare a esantioanelor (unele acumuleaza homosarcina, altele heterosarcina [62]), dar, in general, prezinta injectie de homosarcina de la ambii electrozi pentru $E_{app} > 10$ kV/mm, si, la $E_{app} > 20$ kV/mm o acumulare de heterosarcina langa electrodul de HV [295]. Rezultatele obtinute in urma masuratorilor pe esantioane EPDM prezinta un comportament similar, cu precizarea ca acumularea de heterosarcina apare, in acest caz, tot la valori ale lui $E_{app} > 20$ kV/mm, dar langa GND.

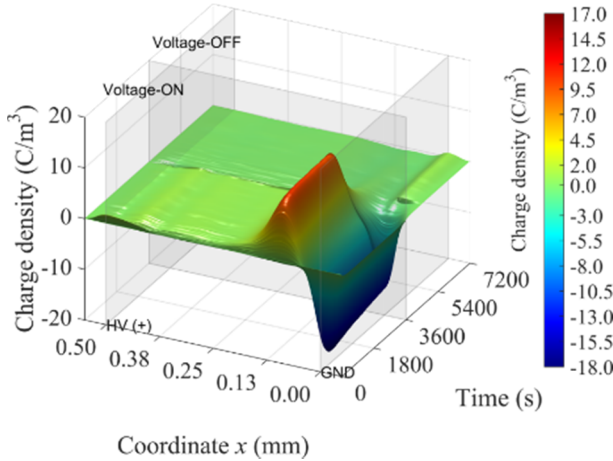


Fig. 24. Variatia densitatii de sarcina in timp si cu coordonata x , pentru esantioane neimbatranite EPR ($E_{app} = 10$ kV/mm)

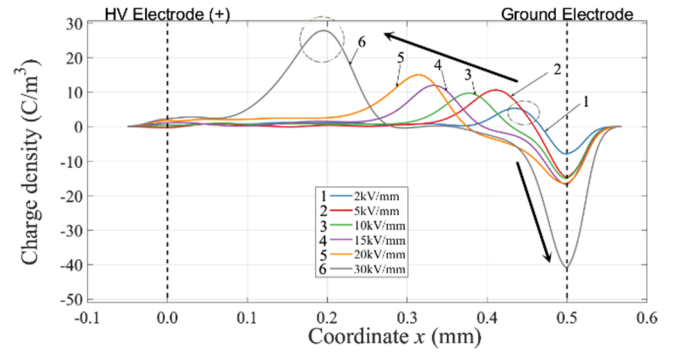


Fig. 25. Variatia densitatii de sarcina cu coordonata x , la 1 ora dupa aplicarea tensiunii, pentru esantioane neimbatranite EPR pentru $E_{app} = 2$ (1), 5 (2), 10 (3), 15 (4) si 30 (5) kV/mm ($t = 3600$ s, Voltage-ON)

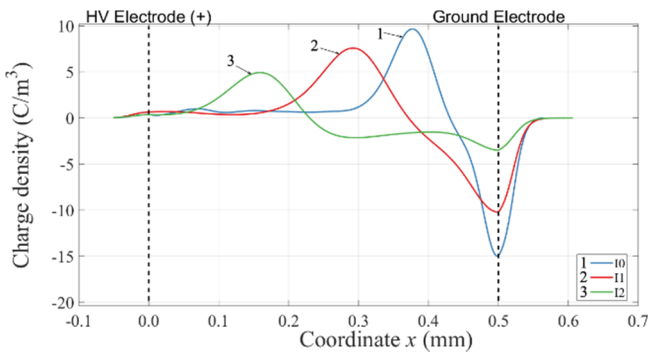


Fig. 26. Variatia densitatii de sarcina cu coordonata x , la 1 ora dupa aplicarea tensiunii, pentru esantioane EPR neimbatranite (I0, 1) si imbatranite pentru 30 zile (I1, 2) si 60 zile (I2, 3) ($t = 3600$ s, $E_{app} = 10$ kV/mm, Voltage-ON)

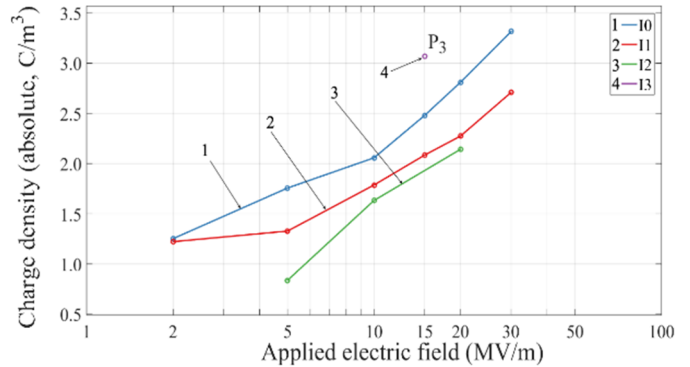


Fig. 27. Variatia valorii reziduale a densitatii de sarcina spatiala cu intensitatea campului electric, pentru esantioane EPR neimbatranite (I0, 1), imbatranite pentru 30 zile (I1, 2), 60 zile (I2, 3) si 90 zile (I3, 4, punctul P_3), la 10 s dupa anulara tensiunii

Pentru toate valorile lui E_{app} , la punctele din vecinatatea electrodului de HV (la $x_P = 0.02$ mm), ρ_v creste rapid in primele secunde dupa aplicarea tensiunii, iar dupa aceea ρ_v continua sa creasca (proportional cu valoarea lui E_{app}). In volumul esantionului valorile densitatii de sarcina descresc in timp. Dupa ce se anuleaza tensiunea, se observa homosarcina langa HV, heterosarcina langa GND si o densitate de sarcina de polaritate negativa in volumul esantionului in jurul pozitiei $x_P = 0.42$ mm. In timp, atat langa electrozi, cat si in volumul esantionului, ρ_v descreste catre valori apropiate de zero.

Repartitia lui ρ_v depinde, de asemenea, considerabil si de durata de imbatranire. Pe durata Voltage-ON se observa prezenta unei densitati de sarcina de polaritate pozitiva in volumul esantionului in cazul esantioanelor imbatranite comparativ cu cele neimbatranite, dar si valorile lui ρ_v corespunzatoare pachetului de sarcina prezent in esantion sunt mai ridicate (fig. 30). Acest fenomen este datorat, cel mai probabil, efectelor termo-oxidative datorate imbatranirii esantioanelor, consumarea antioxidantilor sau eficienta slaba a acestora in cazul unui material amorf precum EPDM-ul [174], ruperea legaturilor chimice si cresterea numarului de purtatori de sarcina (grupari polare, specii ionice) [295].

Pe durata Voltage-OFF, sarcini de polaritate opusa celei a electrodului se acumuleaza langa GND (heterosarcina), cu o amplitudine mai ridicata in cazul esantioanelor imbatranite, si pentru esantioanele imbatranite se gaseste sarcina spatiala de ambele polaritati in zona

centrala a volumului esantioanelor (de polaritate pozitiva catre HV si negativa catre GND). In timp, ρ_v de langa GND scade in amplitudine dar nu ajunge la zero, valorile acestuia fiind mai ridicate cu cat esantioanele au suferit o imbatranire termica mai intensa.

Variatia lui $\rho_{v,avg}$ cu E_{app} si cu durata imbatranirii este prezentata in fig. 31 pentru EPDM. Se constata ca valorile lui $\rho_{v,avg}$ cresc cu E_{app} (mai intens pentru $E_{app} > 5$ kV/mm, pragul corespunzator injectiei de sarcina), si ca valorile lui $\rho_{v,avg}$ pentru esantioanele imbatranite le depasesc pe cele ale celor neimbatranite (punctele P_2 si P_3 versus punctul P_1 in fig. 31).

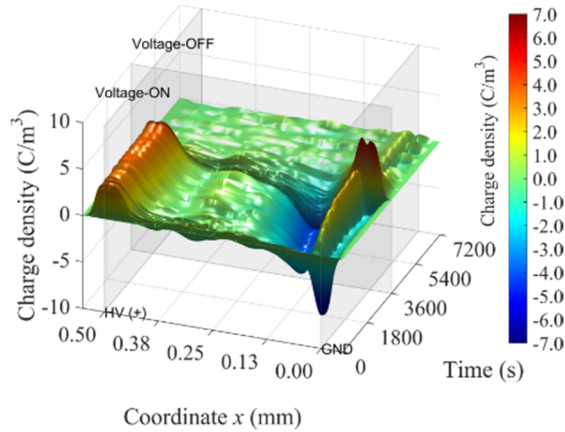


Fig. 28. Variatia densitatii de sarcina in timp si cu coordonata x, pentru esantioane neimbatranite EPDM ($E_{app} = 10$ kV/mm)

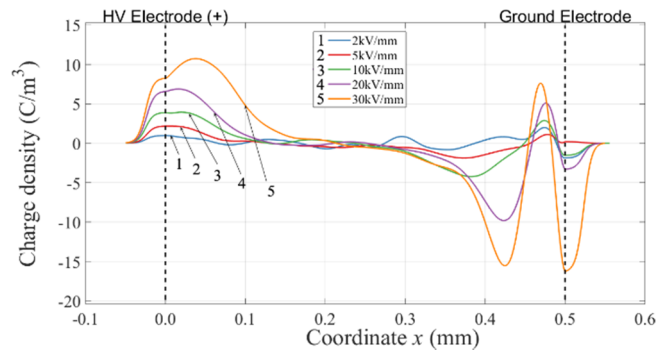


Fig. 29. Variatia densitatii de sarcina cu coordonata x, la 1 ora dupa aplicarea tensiunii, pentru esantioane neimbatranite EPDM pentru $E_{app} = 2$ (1), 5 (2), 10 (3), 15 (4) si 30 (5) kV/mm ($t = 3600$ s, Voltage-ON)

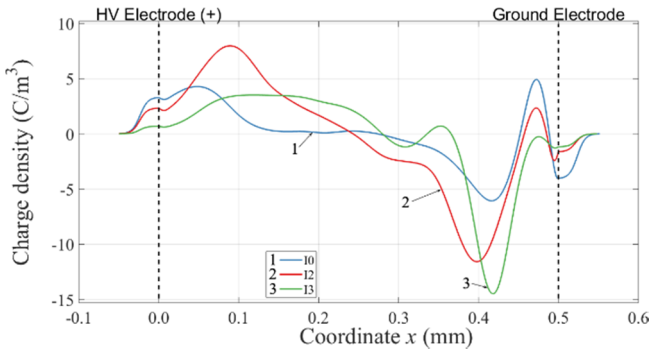


Fig. 30. Variatia densitatii de sarcina cu coordonata x, la 1 ora dupa aplicarea tensiunii, pentru esantioane EPDM neimbatranite (I0, 1) si imbatranite pentru 60 zile (I2, 2) si 90 zile (I3, 3) ($t = 3600$ s, $E_{app} = 15$ kV/mm, Voltage-ON)

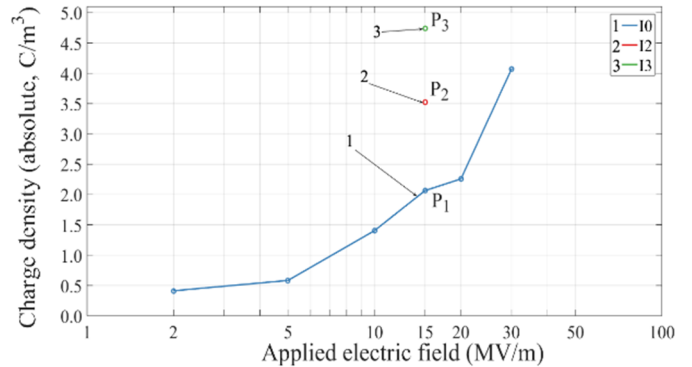


Fig. 31. Variatia valorii reziduale a densitatii de sarcina spatiala cu intensitatea campului electric, pentru esantioane EPDM neimbatranite (I0, 1), imbatranite pentru 60 zile (I2, 2, punctul P_2) si 90 zile (I3, 3, punctul P_3), la 10 s dupa anulara tensiunii

7.5.4. XLPE / EPR (Esantioane plane multi-strat)

Figura 32 prezinta variatia densitatii volumice a sarcinii spatiale ρ_v in timp si spatiu pentru esantioane XLPE / EPR neimbatranite, pentru $E_{app} = 10$ kV/mm in Voltage-ON (pentru 3600 s) si dupa anulara tensiunii (de la 3600 pana la 7200 s, respectiv in Voltage-OFF), esantioanele fiind conectate intre electrodul de inalta tensiune (HV) de polaritate pozitiva si electrodul de pamant (GND), cu XLPE catre HV. Echipamentul de masurare se afla conectat la GND. Se constata ca, pe durata aplicarii tensiunii electrice, se acumuleaza sarcina de polaritate pozitiva langa GND si la interfata dintre XLPE si EPR si ca sarcina de polaritate negativa se acumuleaza in volumul esantionului in zona de XLPE. La anulara tensiunii, sarcina de polaritate pozitiva de langa GND se deplaseaza spre acesta si se reduce cu timpul de

masurare (dar nu devine nula), sarcina spatiala de la interfata dintre XLPE si EPR isi schimba polaritatea din negativa in pozitiva si ramane in zona interfetei si cea din volumul esantionului in zona cu XLPE se reduce cu timpul de masura, dar nu devine nula.

Pentru esantioanele multi-strat XLPE / EPR, ρ_s se acumuleaza la interfata dintre straturi. Cand XLPE este conectat la HV, pe durata aplicarii tensiunii, ρ_s de polaritate negativa se acumuleaza in primele 3 minute si, dupa aceea, valoarea sa descreste in timp. Dupa anulara tensiunii, ρ_s isi schimba polaritatea (din negativ in pozitiv) in aprox. 1 minut, si apoi descreste usor catre zero (dar nu se anuleaza nici dupa o ora).

Repartitia lui ρ_v este modificata si de valoarea lui E_{app} , atat pe durata Voltage-ON, cat si in Voltage-OFF. In Voltage-ON, cresterea valorilor lui E_{app} (de la 5 la 15 kV/mm) conduce la cresterea valorilor lui ρ_v , atat in vecinatatea electrodului de HV, unde creste de aprox. 6 ori, cat si in volumul esantioanelor in zona de XLPE a interfetei, unde creste de aprox. 5 ori (fig. 33). Dupa anulara tensiunii, repartitia lui ρ_v se schimba: descreste in vecinatatea electrodului HV si la interfata si creste in vecinatatea GND. Aceste variatii sunt mult mai importante in cazul valorilor mai ridicate ale lui E_{app} . Valorile lui ρ_v din apropierea GND descresc in timp catre o valoare pozitiva constanta, mai rapid daca E_{app} este mai ridicat, si ρ_v din zona interfetei tinde catre zero pentru $E_{app} = 5$ kV/mm si catre o valoare constanta pozitiva pentru E_{app} mai ridicat.

Valorile lui E_{app} modifica si valorile densitatii superficiale de sarcina ρ_s de la interfata. S-a gasit ca ρ_s creste cu o data cu E_{app} si ca, dupa anulara tensiunii, ρ_s tinde in timp catre zero pentru $E_{app} = 5$ kV/mm si catre o valoare pozitiva, constanta, pentru $E_{app} > 5$ kV/mm (fig. 34).

Repartitia lui ρ_v depinde de asemenea si de durata de imbatranire a esantioanelor; valorile lui ρ_v cresc pe durata Voltage-ON in esantioanele imbatranite, atat in vecinatatea electrozilor, cat si in volumul esantioanelor (fig. 35). Pe durata Voltage-OFF, in esantioanele imbatranite, valorile lui ρ_v descresc in vecinatatea HV, isi schimba polaritatea in vecinatatea GND si cresc in volumul esantioanelor. Aceste variatii devin mai importante pentru durate de imbatranire mai mari.

S-a constatat si ca modul de conectare la electrodul HV influenteaza valorile lui ρ_v . Pe durata Voltage-ON, cand XLPE este conectat la electrodul HV, ρ_v din vecinatatea ambilor electrozi este de polaritate pozitiva (homosarcina la HV si heterosarcina la GND), si in vecinatatea interfetei este de polaritate negativa. Cand EPR este conectat la electrodul HV, ρ_v din vecinatatea ambilor electrozi este de polaritate negativa (heterosarcina la HV si homosarcina la GND) si in vecinatatea interfetei ρ_v este de polaritate pozitiva.

Variatia lui $\rho_{v,avg}$ cu E_{app} si cu durata imbatranirii pentru esantioane XLPE / EPR, cu XLPE conectat la HV, este prezentata in fig. 36. $\rho_{v,avg}$ creste cu E_{app} si, pentru toate E_{app} , $\rho_{v,avg}$ corespunzator esantioanelor imbatranite este mai ridicat decat al esantioanelor neimbatranite.

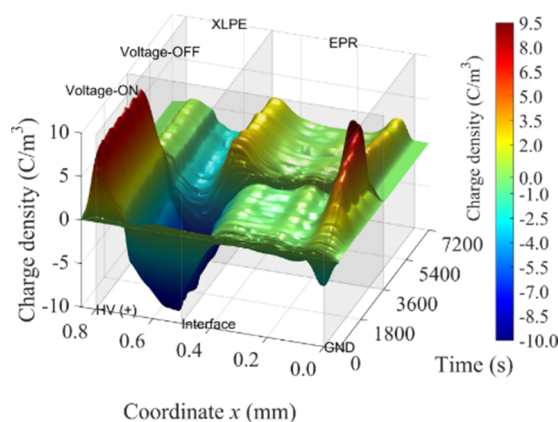


Fig. 32. Variatia densitatii de sarcina in timp si cu coordonata x, pentru esantioane neimbatranite XLPE / EPR ($E_{app} = 10$ kV/mm)

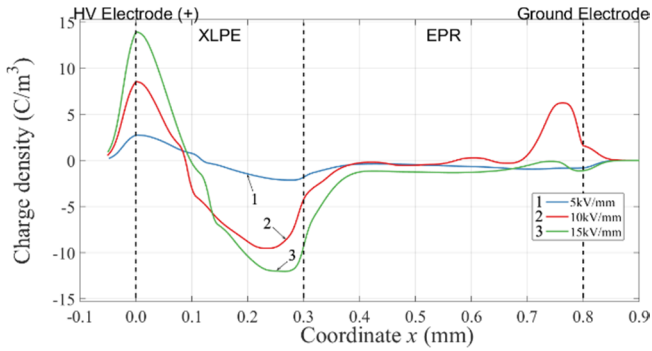


Fig. 33. Variatia densitatii de sarcina cu coordonata x , la 1 ora dupa aplicarea tensiunii, pentru esantioane neimbatranite XLPE / EPR pentru $E_{app} = 5$ (1), 10 (2) si 15 (3) kV/mm ($t = 3600$ s, Voltage-ON)

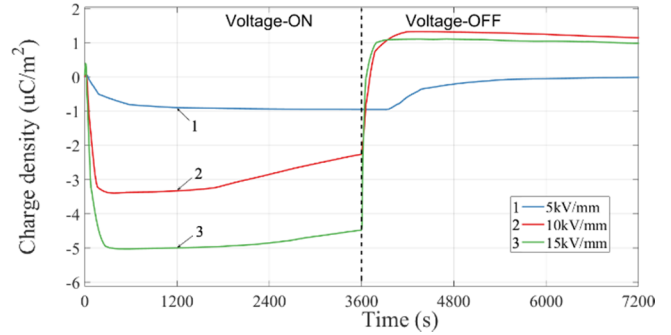


Fig. 34. Variatia cu timpul de masurare a densitatii superficiale de sarcina la punctul $P(x_p)$ de pe interfata esantioanelor neimbatranite XLPE / EPR, pentru $E_{app} = 5$ (1), 10 (2) si 15 (3) kV/mm ($x_p = 0.30$ mm)

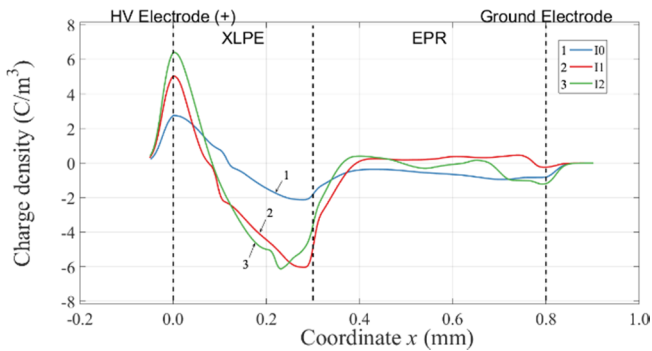


Fig. 35. Variatia densitatii de sarcina cu coordonata x , la 1 ora dupa aplicarea tensiunii, pe esantioane XLPE / EPR neimbatranite (I0, 1), imbatranite pentru 30 zile (I1, 2) si 60 zile (I2, 3) ($t = 3600$ s, $E_{app} = 5$ kV/mm, Voltage-ON)

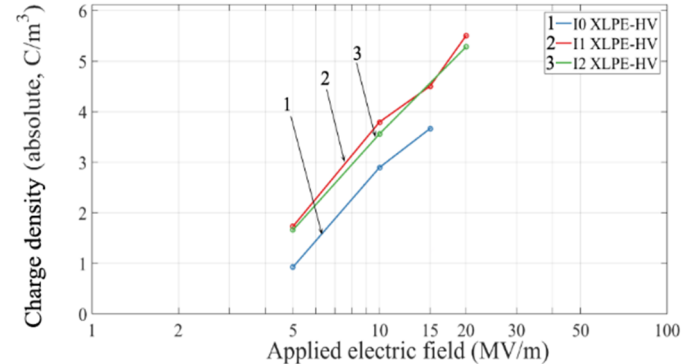


Fig. 36. Variatia valorii reziduale a densitatii de sarcina spatiale cu intensitatea campului electric, pentru esantioane XLPE / EPR neimbatranite (I0, 1), si imbatranite pentru 30 zile (I1, 2) si 60 zile (I2, 3), la 10 s dupa anulara tensiunii

7.5.5. XLPE / EPDM (Esantioane plane multi-strat)

Figura 37 prezinta variatia densitatii volumice a sarcinii spatiale ρ_v in timp si spatiu pentru esantioane XLPE / EPDM neimbatranite, pentru $E_{app} = 10$ kV/mm in Voltage-ON (pentru 3600 s) si dupa anulara tensiunii (de la 3600 pana la 7200 s, respectiv in Voltage-OFF), esantioanele fiind conectate intre electrodul de inalta tensiune (HV) de polaritate pozitiva si electrodul de pamant (GND), cu XLPE catre HV. Echipamentul de masurare se afla conectat la GND. Se constata ca, pe durata aplicarii tensiunii electrice, se acumuleaza sarcina de polaritate opusa in vecinatatea fiecarui electrod (heterosarcina), sarcina de polaritate pozitiva in volumul esantionului si de polaritate negativa in zona interfetei XLPE / EPDM. La anulara tensiunii, sarcina spatiala acumulata de pe durata aplicarii tensiunii dispare rapid.

A fost determinata si variatia in timp a sarcinii superficiale ρ_s acumulata la interfetele XLPE / EPDM, atunci cand XLPE este conectat la electrodul de HV si se constata ca, pe durata aplicarii tensiunii, se acumuleaza ρ_s de polaritate negativa in zona interfetei in primele 8 minute de la inceputul masurarii si ca, dupa aceea, valoarea acesteia ramane cuasi-constanta in timp. Dupa anulara tensiunii, sarcina spatiala scade, la inceput, foarte rapid (in cca. 1 minut ajungand la 35% din valoarea initiala) si, apoi, relativ lent, insa nu se anuleaza nici dupa o ora.

Variatia lui ρ_v este, de asemenea, influentata si de valorile lui E_{app} , atat in Voltage-ON cat si dupa anulara tensiunii. In prezenta tensiunii aplicate, cresterea E_{app} de la 5 la 15 kV/mm

conduce la cresterea valorilor lui ρ_v , atat in vecinatatea electrozilor (in vecinatatea GND creste de aprox. 2.7 ori), cat si in volumul esantioanelor (la zona de interfata dintre XLPE si EPDM creste de aprox. 2 – 3 ori) (fig. 38).

Dupa anulara tensiunii, densitatea de sarcina scade in tot esantionul, scaderile fiind mai pronuntate in volum decat langa electrozi. Densitatea de sarcina de langa GND scade in primele 3 minute catre zero pentru $E_{app} < 15$ kV/mm si catre o valoare constanta negativa pentru $E_{app} = 15$ kV/mm. Densitatea de sarcina superficiala la interfata de asemenea scade in timp catre valori nenule, mai ridicate pentru valori mai ridicate ale lui E_{app} .

Modul de conectare al esantionului la electrodul de HV influenteaza valorile lui ρ_v , iar in ambele cazuri (XLPE la HV si EPDM la HV) la zona de interfata se acumuleaza sarcina de polaritate negativa pe durata aplicarii tensiunii si de polaritate pozitiva dupa anulara tensiunii, iar langa electrozi se acumuleaza sarcina de polaritate opusa de cea a electrodului (heterosarcina). De asemenea, valorile lui ρ_v sunt mai ridicate in zona vecina electrozilor in cazul in care EPDM este conectat catre electrodul de HV.

Exista, de asemenea, diferente notabile in repartitia lui ρ_s din zona de interfata intre cele doua cazuri de conectare; cand XLPE este conectat la HV, ρ_s este de polaritate negativa si creste in primele minute de la aplicarea tensiunii, stabilizandu-se dupa aprox. 3600 s. Cand se anuleaza tensiunea, ρ_s scade la inceput foarte rapid si apoi se stabilizeaza usor dupa 3600 s. Cand EPDM este conectat la HV, ρ_s este negativ, creste rapid in primele secunde si apoi scade, ajungand sa fie de polaritate pozitiva la 3600 s. Dupa anulara tensiunii, ρ_s creste rapid si apoi ramane la valori cuasi-constante, de polaritate pozitiva (fig. 39).

Variatia lui $\rho_{v,avg}$ cu E_{app} si cu durata de imbatranire pentru esantioane XLPE / EPDM este prezentata in fig. 40. Se constata ca valorile lui $\rho_{v,avg}$ cresc cu E_{app} (mai rapid pentru $E_{app} > 10$ kV/mm, pragul corespunzator injectiei de sarcina), si ca acesta este mai ridicat pentru cazul cand partea de EPDM a esantionului a fost conectata catre electrodul de HV.

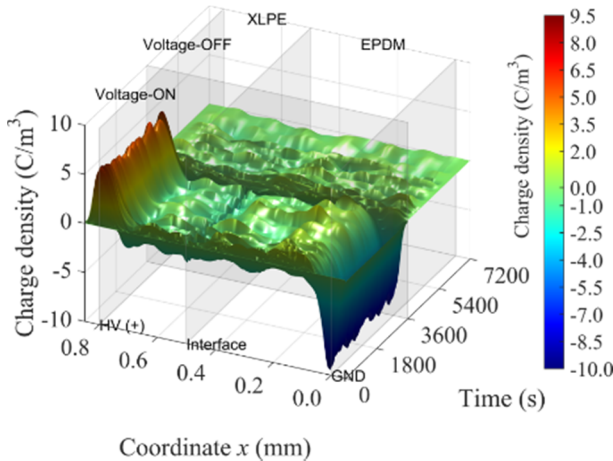


Fig. 37. Variatia densitatii de sarcina in timp si cu coordonata x , pentru esantioane neimbatranite XLPE / EPDM ($E_{app} = 10$ kV/mm)

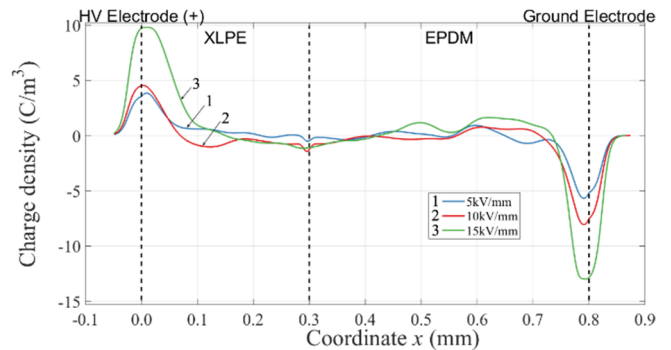


Fig. 38. Variatia densitatii de sarcina cu coordonata x , la 1 ora dupa aplicarea tensiunii, pentru esantioane neimbatranite XLPE / EPDM pentru $E_{app} = 5$ (1), 10 (2) si 15 (3) kV/mm ($t = 3600$ s, Voltage-ON)

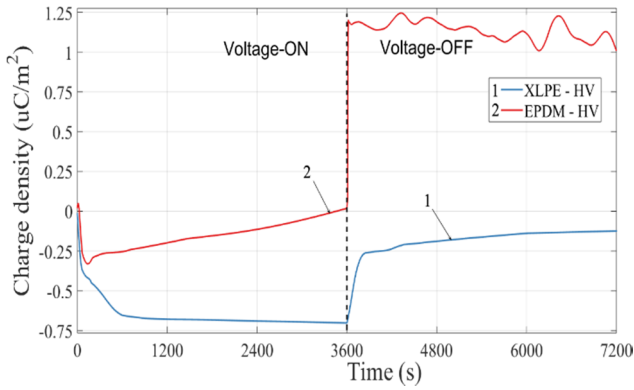


Fig. 39. Variatia cu timpul de masurare a densitatii de sarcina superficiala la un punct $P(x_P)$ de pe interfata esantioanelor neimbatranite XLPE / EPDM, cu XLPE ($x_P = 0.30$ mm, 1) si cu EPDM ($x_P = 0.50$ mm, 2) conectat la HV ($E_{app} = 10$ kV/mm)

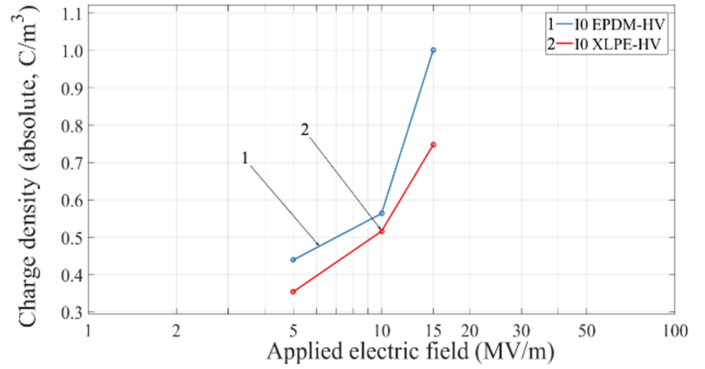


Fig. 40. Variatia valorii reziduale a densitatii de sarcina spatiala cu intensitatea campului electric aplicat, pentru esantioane neimbatranite XLPE / EPDM, cu XLPE (1) si cu EPDM (2) conectat catre electrodul HV, la 10 s dupa anulara tensiunii

7.5.6. EPR / XLPE (Esantioane cilindrice)

Figura 41 prezinta variatia densitatii volumice a sarcinii spatiale ρ_v in timp si spatiu pentru esantioane cilindrice EPR / XLPE neimbatranite, pentru $U_{app} = 75$ kV in Voltage-ON (pentru 3600 s) si dupa anulara tensiunii (de la 3600 pana la 7200 s, respectiv in Voltage-OFF), esantioanele fiind conectate intre electrodul de inalta tensiune (HV) de polaritate pozitiva si electrodul de pamant (GND). Stratul de EPR este conectat la HV si echipamentul de masurare se afla conectat la GND. Se constata ca, pe durata aplicarii tensiunii electrice, se acumuleaza sarcina de polaritate pozitiva, atat in volumul esantionului, cat si langa GND si sarcina de polaritate negativa in zona interfetei EPR / XLPE. La anulara tensiunii, sarcina de polaritate pozitiva se deplaseaza de la electrodul HV in volumul esantionului si sarcina de polaritate negativa se acumuleaza in zona interfetei EPR / XLPE.

Pentru esantioanele cilindrice multi-strat EPR / XLPE, variatia densitatii superficiale de sarcina ρ_s care se acumuleaza la interfata dintre straturi este prezentata in fig. 42. Pe durata aplicarii tensiunii, ρ_s este de polaritate pozitiva si, dupa anulara tensiunii, ρ_s isi schimba polaritatea si creste, la inceput rapid (in aprox. 1 minut ajungand de la $+2 \mu\text{C}/\text{m}^2$ la $-4 \mu\text{C}/\text{m}^2$), apoi, mai incet (ajungand in aprox. 8 minute la $-7 \mu\text{C}/\text{m}^2$), si apoi, dupa 12 minute, incepe sa scada incet (ajungand la 3600 s dupa anulara tensiunii la valoarea de aprox. $-6 \mu\text{C}/\text{m}^2$). Existenta densitatii de sarcina ρ_s determina existenta unui camp electric rezidual in izolatia jonctiunii cablului chiar si dupa de-energizarea acestora.

Repartitia lui ρ_v este influentata, de asemenea, si de valoarea lui U_{app} . Cresterea valorii tensiunii aplicate de la 25 la 100 kV conduce la cresterea valorilor lui ρ_v , atat in vecinatatea electrozilor (in vecinatatea electrodului HV de pana la 4 ori si in vecinatatea GND de pana la 15 ori), cat si in volumul esantionului (fig. 43).

La interfata EPR / XLPE, valoarea densitatii de sarcina superficiala este mai ridicata cu cat valoarea lui U_{app} este mai ridicata, aceasta crescand in timp pana la 300 s pentru $U_{app} = 25$ kV, pana la 1800 s pentru $U_{app} = 50$ si 75 kV si pana la 600 s pentru $U_{app} = 100$ kV, dupa care aceasta scade usor in timp pana la sfarsitul masuratorii.

Variatia lui $\rho_{v,avg}$ cu valoarea maxima a campului electric aplicat E_{max} (definit in §7.6.1) este prezentata in fig. 44. Se constata ca valorile lui $\rho_{v,avg}$ cresc liniar cu E_{max} pentru $U_{app} = 25 - 75$ kV si ca pentru $U_{app} = 100$ kV panta se schimba, ceea ce indica o intensificare a mecanismelor de injectie de sarcina (vezi §4.4).

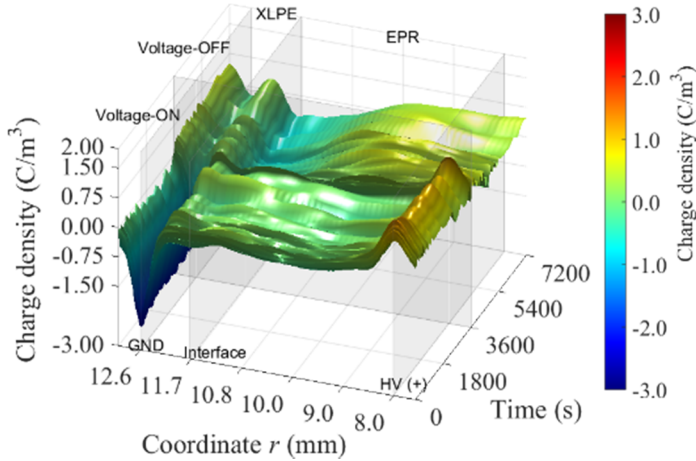


Fig. 41. Variatia densitatii de sarcina in timp si cu coordonata r , pentru esantioane cilindrice neimbatranite EPR / XLPE ($U_{app} = 75$ kV)

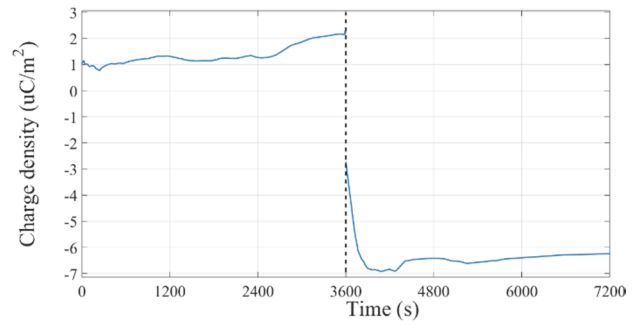


Fig. 42. Variatia in cu timpul de masurare a densitatii superficiale de sarcina la un punct $P(r_P)$ de pe interfata esantioanelor neimbatranite EPR / XLPE ($r_P = 11.70$ mm, $U_{app} = 100$ kV)

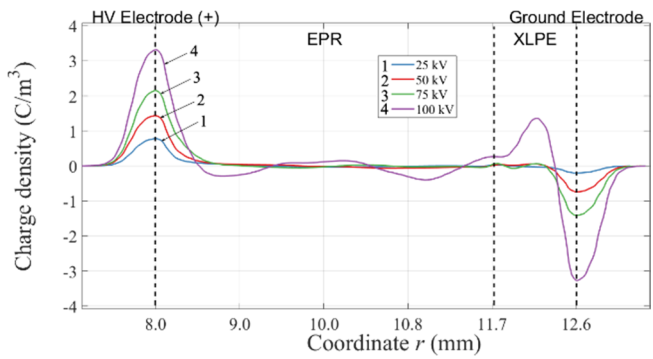


Fig. 43. Variatia densitatii de sarcina cu coordonata r , la 1 ora dupa aplicarea tensiunii, pentru esantioane cilindrice neimbatranite EPR / XLPE pentru $U_{app} = 25$ (1), 50 (2), 75 (3) si 100 (4) kV ($t = 3600$ s, Voltage-ON)

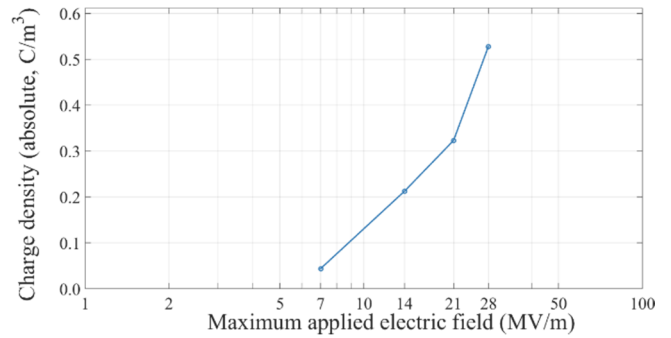


Fig. 44. Variatia valorii reziduale a densitatii de sarcina spatiala cu intensitatea maxima a campului electric aplicat, pentru esantioane cilindrice neimbatranite EPR / XLPE, la 10 s dupa anulara tensiunii

7.6. Reducerea sarcinii spatiale

In toate tipurile de esantioane (plane si cilindrice) realizate din XLPE, EPR si EPDM, sarcina spatiala este prezenta, iar in cazul esantioanelor multi-strat se separa si o sarcina spatiala superficiala la interfetele dintre straturile componente. Prezenta sarcinii spatiale conduce, pe de o parte, la intensificarea locala a campului electric si, pe de alta parte, la generarea unor campuri electrice reziduale importante. Rezulta, deci, ca in izolatiile jonctiunilor de CC realizate din aceste materiale aflate in exploatare se vor desfasura aceste fenomene. Efectele lor cele mai importante vor fi degradarea mai accelerata a izolatiilor, atat in timpul functionarii, cat si dupa scoaterea jonctiunilor de sub tensiune (datorita campurilor electrice reziduale). Prin urmare, materialele izolatoare utilizate in izolarea jonctiunilor trebuie sa prezinta o valoare cat mai redusa a sarcinii spatiale acumulate in exploatarea acestora.

Cele trei materiale studiate prezinta marimi diferite ale valorii reziduale a densitatii de sarcina spatiala $\rho_{v,avg}$. Din fig. 45, pentru aceeasi valoare a lui E_{app} , sub 25 kV/mm, esantioanele XLPE (fig. 45, curba 1) prezinta valorile cele mai scazute pentru $\rho_{v,avg}$, urmate de cele EPR (fig. 45, curba 2) si EPDM (fig. 45, curba 3); iar peste 25 kV/mm, esantioanele EPDM prezinta valorile cele mai ridicate pentru $\rho_{v,avg}$. De asemenea, pragul corespunzator intensificarii mecanismelor de injectie de sarcina este diferit; este aprox. 15 kV/mm pentru XLPE (fig. 45, curba 1), 10 kV/mm pentru EPR (fig. 45, curba 2) si 7 kV/mm pentru EPDM (fig. 45, curba 3).

In esantioanele multi-strat, la interfeteele dintre straturi se separa si o sarcina spatiala superficiala de densitate ρ_s , ale carei valori depind, pe de o parte, de valorile conductivitatii si permitivitatii celor doua straturi si, pe de alta parte, de caracteristicile interfetei jonctiunii. Astfel, valorile lui ρ_s sunt mai reduse in cazul esantioanelor XLPE / EPDM (fig. 46, curba 1) fata de cele XLPE / EPR (fig. 46, curba 2). Valorile lui ρ_s determinate in vecinatatea interfetelor sunt relativ importante si sunt dependente de valorile lui E_{app} (fig. 34).

Valoarea reziduala a densitatii de sarcina $\rho_{v,avg}$ obtinuta pentru esantioanele multi-strat neimbatranite depinde de E_{app} si de caracteristicile esantioanelor; valoarea sa creste cu E_{app} pentru toate esantioanele, mai mult pentru XLPE / EPR si mai putin pentru XLPE / EPDM.

Masuratorile efectuate pe esantioane imbatranite termic arata ca valorile ρ_v s-au modificat, in urma imbatranirii, in toate esantioanele (fig. 47 pentru $E_{app} = 15$ kV/mm). Cum durata de imbatranire fost relativ redusa (90 zile), efectele acesteia asupra cresterii valorilor sarcinii nu sunt foarte spectaculoase), dar o serie de alte studii arata ca valorile lui ρ_v cresc in timpul functionarii jonctiunilor.

Se constata ca au aparut variatii mai mari ale lui $\rho_{v,avg}$ in esantioanele EPR (fig. 47, curba 2) si EPDM (fig. 47, curba 3) si mai reduse in cele de tip XLPE (fig. 47, curba 1). Cresterea duratei de imbatranire determina cresteri importante ale valorii lui $\rho_{v,avg}$ in esantioanele EPDM (de la 2 la 4.75 C/m³) si scaderi, initial, urmate de cresteri, in cazul esantioanelor EPR (de la 2.5 la 2 C/m³ in primele 60 zile, urmata de o crestere pana la 3 C/m³ in ultimele 30 zile) si, mai putin in cazul esantioanelor XLPE (0.25 pana la 0.20 C/m³ in primele 30 zile, urmata de o crestere pana la 0.50 C/m³ in ultimele 60 zile).

Valoarea reziduala a densitatii de sarcina $\rho_{v,avg}$ depinde intr-o mare masura si de caracteristicile interfetei; esantioanele plane fabricate prin presare (fig. 48, curba 1) prezinta o valoare mai ridicata a lui $\rho_{v,avg}$ decat cele cilindrice fabricate prin tripla extrudare (fig. 48, curba 2).

Materialele izolatoare utilizate in izolarea jonctiunilor trebuie sa prezinta o valoare cat mai redusa a sarcinii spatiale acumulate in exploatare. Materialele izolatoare utilizate pentru jonctiunile cablurilor trebuie sa aiba cea mai mica valoare posibila a sarcinii spatiale acumulate in timpul functionarii acestora. Trebuie imbunatatit gradul de puritate al materialelor de baza si a tehnologiei de fabricare. Trebuie utilizate acele materiale care prezinta variatii mai mici ale lui ρ_v si implicit ale lui $\rho_{v,avg}$, respectiv intre EPR si EPDM ar fi preferabil EPDM.

Deoarece XLPE este materialul de baza, in momentul de fata, pentru izolatia cablurilor de energie de CC, reducerea sarcinii spatiale poate fi realizata prin imbunatatirea gradului de puritate (fizica, fara contaminanti, si chimica, redus numarul de specii chimice aditionale care introduc purtatori de sarcina) a materialului de baza, o selectie potrivita a aditivilor (ce introduc alti purtatori de sarcina) si o calitate crescuta a proceselor tehnologice de fabricatie.

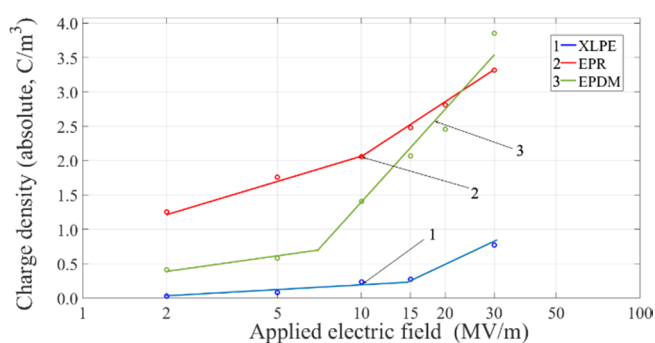


Fig. 45. Variatia valorii reziduale a densitatii de sarcina spatiala cu intensitatea campului electric, pentru esantioane neimbatranite XLPE (1), EPR (2) si EPDM (3), la 10 s dupa anulara tensiunii

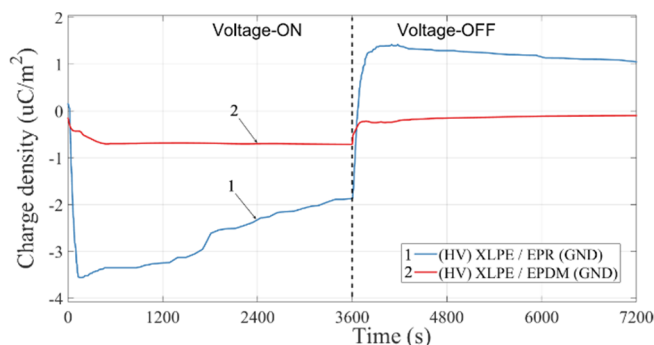


Fig. 46. Variatia cu timpul de masurare a densitatii superficiale de sarcina la punctul $P(x_p)$ pe interfata esantioanelor neimbatranite XLPE / EPR (1) si XLPE / EPDM (2) ($x_p = 0.30$ mm, $E_{app} = 10$ kV/mm)

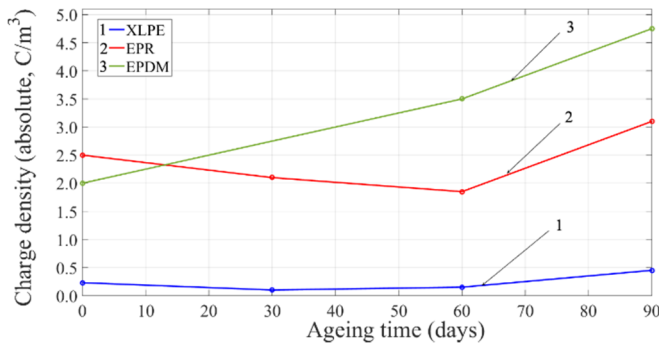


Fig. 47. Variatia valorii reziduale a densitatii de sarcina spatiala cu durata de imbatranire, pentru esantioane XLPE (1), EPR (2) si EPDM (3) ($E_{app} = 15 \text{ kV/mm}$)

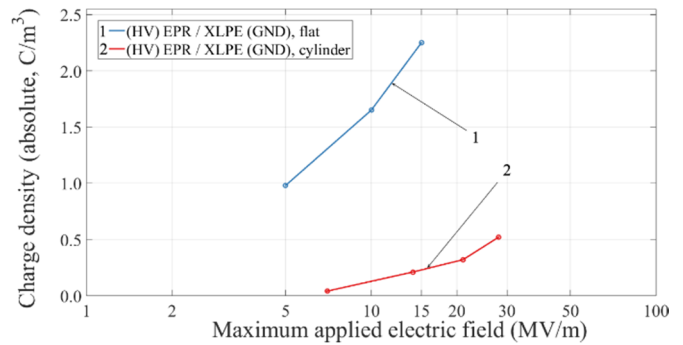


Fig. 48. Variatia valorii reziduale a densitatii de sarcina spatiala cu intensitatea maxima a campului electric aplicat, pentru esantioane neimbatranite EPR / XLPE avand geometrie plana (1) si cilindrica (2), la 10 s dupa anulara tensiunii (EPR conectat la HV)

Concluziile Capitolului 7:

- Esantioanele neimbatranite prezinta suprafete relativ netede, fara pori deschisi, cratere etc. Se poate observa o zona distincta la interfata dintre XLPE si EPR (care are aprox. $0.5 \mu\text{m}$).
- Sub actiunea caldurii, materialele din izolatiile jonctiunilor de CC (XLPE, EPR, EPDM) li se fractureaza moleculele sau interactioneaza cu Oxigenul, conducand la aparitia unor produse secundari polari si / sau incarcati cu sarcini electrice. Analiza degradarii esantioanelor de EPR si EPDM prin FTIR a aratat prezenta unui numar mai ridicat de compusi reziduali in EPR si un numar mai ridicat de grupari oxidate in EPDM fata de EPR.
- Solicitarile termice si electrice la care au fost supuse esantioanele din XLPE, EPR, XLPE / EPR, EPDM si XLPE / EPDM au condus la modificari importante ale proprietatilor electrice (conductivitate si permitivitate electrica). Valorile conductivitatii electrice scad cu durata de masurare si cresc cu intensitatea campului electric aplicat si cu durata de imbatranire. Valorile permitivitatii scad – cu durata de imbatranire – pentru esantioanele XLPE si EPDM si cresc pentru cele EPR. Aceste variatii sunt, procentual, mult mai reduse decat acelea ale conductivitatii electrice.
- Repartitia lui ρ_v depinde de natura esantionului, de valoarea si modul de aplicare a tensiunii, de temperatura etc. In prezenta tensiunii, cresterea lui E_{app} conduce la cresteri ale lui ρ_v in vecinatatea electrozilor. Dupa anulara tensiunii, valorile maxime ale lui ρ_v , aflate in vecinatatea electrozilor, se deplaseaza spre interiorul esantioanelor. Aceste deplasari sunt cu atat mai mari cu cat valorile lui E_{app} sunt mai ridicate.
- Valorile lui ρ_v s-au modificat, in urma imbatranirii, in toate esantioanele. $\rho_{v,avg}$ creste cu E_{app} (mai rapid pentru $E_{app} > 15 \text{ kV/mm}$ pentru esantioanele neimbatranite si la valori ale lui E_{app} mai reduse in cazul celor imbatranite). Pentru esantioanele XLPE si EPR, la inceputul solicitarii termice (primele 30, respectiv 60 zile) valorile lui $\rho_{v,avg}$ scad, apoi cresc si dupa 90 zile depasesc valorile $\rho_{v,avg}$ corespunzatoare esantioanelor neimbatranite. Pentru esantioanele EPDM, valorile $\rho_{v,avg}$ cresc continuu cu durata de imbatranire.
- In cazul esantioanelor plane multi-strat, pe durata aplicarii tensiunii, ρ_s se acumuleaza la interfata XLPE / EPR, a carei densitate depinde de valorile E_{app} si care scade in timp. Dupa anulara tensiunii, ρ_s isi schimba polaritatea rapid (in 1 minut) si scade usor (dar nu se anuleaza nici dupa 1 ora). Pe de alta parte, modul de conectare a electrozilor influenteaza acumularea de sarcina spatiala. Cand XLPE este conectat la HV, ρ_v din vecinatatea ambilor electrozi este de polaritate pozitiva, si densitatea de sarcina din vecinatatea interfetei este de polaritate negativa. Daca EPR se conecteaza la HV, ρ_v din vecinatatea ambilor electrozi este de polaritate negativa, iar densitatea de sarcina din vecinatatea interfetei este de polaritate pozitiva.

- Densitatea de sarcina acumulata in esantioane depinde si de modul de fabricare a acestora; astfel, in esantioane cilindrice EPR / XLPE fabricate utilizand metoda triplei extrudari, valoarea reziduala a densitatii de sarcina este mai scazuta (0.15 C/m^3 pentru $E_{app} = 10 \text{ kV/mm}$), iar cea din cazul esantioanelor plane EPR / XLPE (dar si EPDM / XLPE) fabricate prin presare este mai ridicata (1.6 C/m^3 pentru $E_{app} = 10 \text{ kV/mm}$).
- Materialele izolatoare utilizate pentru straturile izolatoare ale jonctiunilor de CC trebuie sa prezinte o valoare cat mai redusa a sarcinii spatiale acumulate in exploatare. Trebuie imbunatatit gradul de puritate al materialelor de baza si a tehnologiei de fabricare si, desigur, trebuie folosite materiale care prezinta variatii mai mici ale lui ρ_v si implicit ale lui $\rho_{v,avg}$, respectiv intre materialele studiate (EPR si EPDM) ar fi preferabil EPDM.
- Rezultatele din acest Capitol au raspuns cu succes la Ipoteza H1 aratand ca durata de imbatranire termica are un efect negativ asupra proprietatilor electrice ale izolatiilor jonctiunii, si ca, in cazul esantioanelor multi-strat, s-a dovedit ca afecteaza in mod negativ valorile densitatii de sarcina superficiala la interfata dintre straturi.
- Rezultatele acestui Capitol au raspuns cu succes Ipotezei H2 aratand ca durata de imbatranire termica are un efect negativ direct asupra acumularii (valoarea reziduala a densitatii de sarcina) si repartitiei densitatii de sarcina (volumica) in izolatiile jonctiunilor.
- Rezultatele acestui Capitol au raspuns partial la Ipoteza H4 prin prezentarea metodelor de reducere a sarcinii spatiale prin studierea diferentelor dintre EPR si EPDM ca materiale de izolatia jonctiunilor, inclusiv din prisma calitatii imbunatatite a procedeelor de fabricare.

Capitolul 8. Rezultate numerice

In Capitolul 8 sunt prezentate rezultatele numerice obtinute pentru repartitia campului electric in structuri plane si cilindrice (modeland interfata cablu – jonctiune) si pentru un model de jonctiune, folosind ca date de intrare valorile obtinute experimental (permitivitate, conductivitate si densitate de sarcina) in Capitolul 7. Partile fara raspuns din Ipoteza H4 (privind imbunatatirea calitatii designului jonctiunii) si Ipoteza H3 (referitoare la sollicitari electrice crescute ca efect principal al sarcinii spatiale) au raspuns in acest capitol.

8.1. Conductivitate electrica

In cazul esantioanelor multi-strat, pentru a determina valorile densitatii superficiale de sarcina, este necesar sa se cunoasca valorile permitivitatii si conductivitatii straturilor constituite. Deoarece relatiile empirice propuse de diversi autori (a se vedea §4.5.1) au dezavantajul ca valorile calculate ale lui σ difera destul de mult de cele determinate experimental, pentru valori ale lui E intre 1 si 30 kV/mm si T intre 30 si 70 °C, aici, noua expresie empirica propusa in Capitolul 4, respectiv in ec. (4.36), este utilizata si se arata ca este mai eficienta pentru XLPE, EPR si EPDM. Parametrii ec. (4.36) au fost determinati din rezultate experimentale prin alegerea de seturi de date experimentale de tipul $\{(E, T)\}$ si prin utilizarea software-ului MATLAB cu functia *fsolve* din pachetul *Optimization Toolbox*. Ecuatia (4.36) este prezentata din nou mai jos:

$$\sigma(E, T) = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{k_B \cdot T}\right) \frac{\sinh((a \cdot T + b) \cdot \ln|E|)}{|E|^\alpha} \quad (4.36)$$

unde A , E_a , a , b si α sunt proprietati de material ce trebuie sa fie determinate.

8.2. Calculul numeric al campului electric

Calculul numeric al campului electric, atat in esantioane plane, cat si cilindrice a fost efectuat folosind metoda elementului finit in softul COMSOL, sistemul de ecuatii fiind rezolvat cu metoda directa de factorizare de catre solverul MUMPS integrat in softul COMSOL.

Au fost considerate un numar de trei domenii de calcul diferite, respectiv:

- Un domeniu pentru esantioane plane (prezentat in detaliu in §8.3.1.1 si in fig. 49), in care repartitia campului electric a fost determinata in regimul electrostatic (prescurtat ca ES). In COMSOL, interfata fizica pentru studiu a fost Electrostatics a modulului AC/DC.
- Un domeniu pentru esantioane cilindrice (prezentat in detaliu in §8.3.1.2 si in fig. 50), in care repartitia campului electric a fost determinat in regimul electrostatic, in electrostatic cuasistationar (prescurtat ca EQS) si in regim electrocinetic stationar (prescurtat ca EC). In COMSOL, interfata fizica a fost Electric Currents (domeniu timp) a modulului AC/DC.
- Un model de jonctiune (prezentat in detaliu in §8.3.1.3 si in figs. 51 si 52), in care repartitia campului electric a fost determinata din regimul electrocinetic stationar cu influenta temperaturii. In COMSOL, interfetele fizice au fost Electric Currents si Heat Transfer in Solids, cu cuplaje electromagnetice si de temperatura.

Pentru modelul de jonctiune, calculul combinat al campului electric si al temperaturii a fost efectuat pe un model de jonctiune gratie NKT (conform fig. 52, [46], [103] si [300]), care, pentru calculele considerate, are o lungime de 1.5 m, grosime 68 mm, este realizata din imbinarea a doua cabluri cu conductor de Aluminiu (diametru 10 mm), strat semiconductor interior (1.5 mm), izolatia de XLPE (8 mm), strat semiconductor exterior (1.5 mm). Jonctiunea are o zona a conectorului (30 mm × 0.4 m), un strat semiconductor interior (3 mm), strat izolator de EPR (de grosime variabila, maxim 11 mm in zona conectorului) si strat semiconductor exterior (de grosime variabila, de la 4.5 mm in zona conectorului pana la 11.5 mm la extremitati).

Pentru aceasta jonctiune, a fost studiata influenta unui strat cu proprietati neliniare de control a campului electric (FGM) asupra valorilor campului electric si a densitatii superficiale de sarcina la interfata dintre izolatia jonctiunii si a cablului si au fost luate in considerare doua cazuri, respectiv cand exista un strat continuu de FGM care se extinde pe intreaga lungime a jonctiunii cablului si care uneste stratul semiconductor exterior al jonctiunii cu stratul semiconductor interior al jonctiunii (o grosime de 4 mm pentru distanta dintre cele doua straturi semiconductoare ale jonctiunii si o grosime de 1 mm peste zona conectorului) si atunci cand nu exista stratul de FGM, zona respectiva fiind considerata parte a izolatiei jonctiunii.

De asemenea, pentru aceasta jonctiune, influenta prezentei cavitatilor in izolatia jonctiunii a fost discutata intr-o sectiune separata a capitoului. Pentru unele dintre calculele efectuate in teza, a fost luata in considerare o cavitate cu diametrul $D_{cav} = 100 \mu\text{m}$ umpluta cu aer la presiune standard si temperatura variabila, iar rigiditatea dielectrica a aerului in CC a fost egala cu $E_{br} = \delta_{air} \cdot 7.86 \text{ kV/mm}$. Daca valoarea locala a intensitatii campului electric la punctul P_c din interiorul cavitatii este mai mare decat valoarea locala a rigiditatii dielectrice a aerului (E_{br}) atunci s-a considerat ca exista o strapungere locala care duce la initierea si / sau intensificarea DP, la initierea si dezvoltarea arborescentelor electrice etc. (vezi si Capitolul 3).

Calculele pentru jonctiunea de cablu au fost efectuate pentru un cablu situat cu centrul la 2 m sub pamant, sub 30 cm de terasament cu proprietati termice mai ridicate decat ale solului (pentru o disipare mai eficienta a pierderilor), si partea superioara a solului precum si temperatura solului la o distanta de 2 m in jurul centrului jonctiunii cablului este considerata a fi la temperatura $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$. Conductorului i s-a aplicat tensiunea $U_{app} = 50 \text{ kV}$ si sursa de caldura este considerata a fi datorita pierderilor Joule, transmise in exterior prin conductie.

Domeniul de calcul al jonctiunii de cablu a fost simplificat la o structura bidimensionala de forma considerata in fig. 53, considerandu-se simetrie in jurul axei de rotatie ($r = 0$, fig. 53) si simetrie fata de un plan care trece prin mijlocul conectorului intre cabluri ($z = 0.7 \text{ m}$, fig. 53).

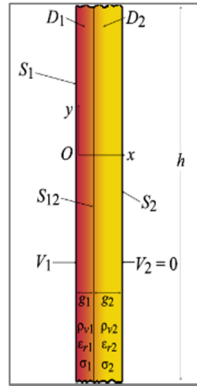


Fig. 49. Domeniul de calcul corespunzator esantioanelor plane

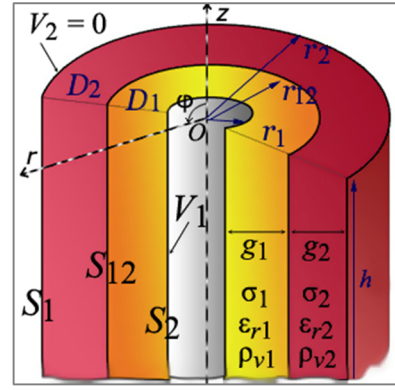


Fig. 50. Domeniul de calcul corespunzator esantioanelor cilindrice

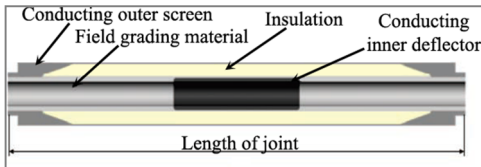


Fig. 51. Model de jonctiune, dupa [46]

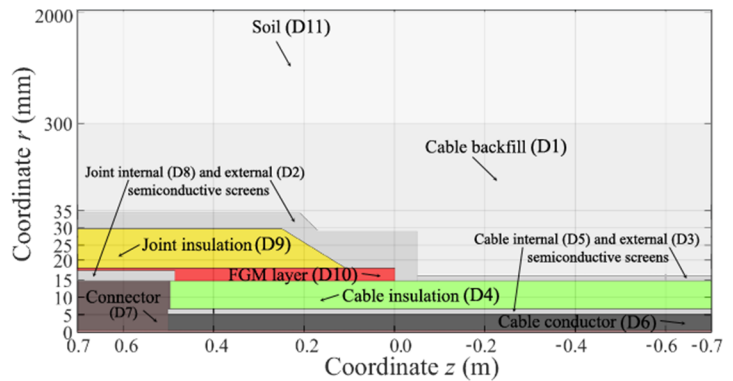


Fig. 52. Geometria modelului de jonctiune

Pentru toate cele trei domenii de calcul (plan, cilindric si model de jonctiune), si pentru toate regimurile de camp electric, s-a considerat ca efectele magnetice sunt neglijabile.

Proprietatile de material sunt urmatoarele:

- Pentru esantioane plane, valorile conductivitatii electrice si a permitivitatii relative au fost determinate experimental la $T = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ si $E_{app} = 10 \text{ kV/mm}$, respectiv la $f = 50 \text{ Hz}$.
- Pentru esantioane cilindrice, valorile permitivitatii relative ($f = 50 \text{ Hz}$) utilizate in calcul sunt cele prezentate in Tabelul 1, pentru diferite temperaturi. Conductivitatea electrica a fost determinata utilizand ec. (4.36).
- Pentru modelul de jonctiune, valorile proprietatilor de material pentru toate subdomeniile au fost determinate experimental, calculate cu expresii empirice de calcul sau preluate din literatura. Conductivitatea electrica a straturilor FGM a fost considerata a varia doar cu intensitatea campului electric, conductivitatile electrice ale straturilor izolatoare ale cablului si ale jonctiunii au fost considerate a varia cu intensitatea campului electric si cu temperatura (conform ec. (4.36)), permitivitatile relative ale straturilor izolatoare ale cablului si ale jonctiunii au fost considerate variate doar cu temperatura ($f = 50 \text{ Hz}$), si valori constante au fost considerate pentru restul proprietatilor dielectrice si termice.

8.3. Esantioane plane

Repartitia campului electric pentru esantioane plane (domeniul din fig. 49) este impartita in variatii cu tipul de material, influenta campului electric aplicat si a duratei de imbatranire.

Figura 51 prezinta variatia cu coordonata x a intensitatii campului electric E in regim electrostatic (ES) pentru $T = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ si $E_{app} = 5 \text{ kV/mm}$ pentru esantioane neimbatranite XLPE / EPR si XLPE / EPDM, unde XLPE este materialul considerat pentru subdomeniul D1 si EPR sau EPDM este materialul considerat pentru subdomeniul D2. De asemenea, s-a considerat ca $\rho_v = 0$ peste tot in esantion si ca la interfata $\rho_s = 0$. Valoarea maxima pentru E a

fost obtinuta in subdomeniul $D1$ (XLPE) si este cu 8 % mai ridicata (5.6 MV/m vs. 6.15 MV/m) pentru esantioanele XLPE / EPDM fata de cele XLPE / EPR. Aceasta este datorita permitivitatile diferite ale materialului din subdomeniul $D2$, respectiv ca $\epsilon_{r,EPDM} > \epsilon_{r,EPR}$.

In prezenta lui ρ_s repartizata la interfata (pe suprafata $S12$), repartitia intensitatii campului electric se modifica; ρ_s s-a determinat a fi mai ridicata in toate cazurile pentru esantioanele XLPE / EPR fata de cele XLPE / EPDM. Valorile lui ρ_s determinate prin calcul (de ordinul mC/m^2) determina o crestere a lui E de aprox. 2 ori in XLPE (de la 5.8 la 11.7 MV/m) si o scadere de 4 ori in EPR (de la 4.4 la 1.1 MV/m).

In cazul existentei si a unei densitati volumice de sarcina ρ_v (determinata experimental in Capitolul 7), repartitia intensitatii campului electric se schimba si mai mult. Pentru esantioanele XLPE / EPR, prezenta lui ρ_v modifica valorile lui E , acesta fiind mai intens atat in XLPE ($E = 20$ MV/m la punctul de coordonata $x = 0.12$ mm), cat si in EPR ($E = -8$ MV/m la punctul de coordonata $x = 0.79$ mm, respectiv in vecinatatea GND). Pentru esantioanele XLPE / EPDM, in XLPE in vecinatatea electrodului HV, E scade si isi schimba polaritatea (ajungand la -4 MV/m), iar catre interfata E creste de la 6 MV/m (initial) la 7 MV/m. In EPDM, la interfata, valorile lui E sunt mai ridicate de pana la 1.3 ori (3 MV/m vs. 2.2 MV/m initial), are un maxim ($E = 4.5$ MV/m) in jurul punctului de coordonata $x = 0.65$ mm si scade, schimbandu-si polaritatea in zona electrodului de GND (ajungand la $E = -4$ MV/m).

Prezenta simultana a sarcinii superficiale si volumice conduce la o intensificare locala si mai mare a campului electric, valorile sale ajungand in cazul esantioanelor XLPE / EPR la 25.3 MV/m in stratul de XLPE si la -12 MV/m in stratul de EPR, iar in cazul esantioanelor XLPE / EPDM la 10 MV/m in stratul de XLPE si la 6.5 MV/m in stratul de EPDM.

Modificarea valorilor lui E_{app} conduce la modificarea repartitiei densitatii de sarcina si la modificarea repartitiei campului electric, atat in prezenta, cat si in absenta tensiunii aplicate. Pentru esantioanele XLPE / EPR, in Voltage-ON, valorile lui E se modifica mai mult pentru $E_{app} > 5$ kV/mm (fig. 52). Aceasta se poate datora separarii sarcinii spatiale in vecinatatile electrozilor si la interfata XLPE / EPR. Existenta unei valori nenule a densitatii de sarcina dupa anulara tensiunii face ca valoarea remanenta a campului electric sa fie nenula, in special pentru $E_{app} > 5$ kV/mm (fig. 53). Variatia valorii maxime a intensitatii campului electric E_{max} in functie de E_{app} , pe durata aplicarii tensiunii, este prezentata in fig. 54, iar variatia in timp a coordonatei x a punctului unde E ia valoarea maxima este prezentata in fig. 55. Se observa (fig. 54) ca E_{max} depinde de valorile lui E_{app} si ca este semnificativ mai ridicat decat E_{app} (pentru $E_{app} = 15$ kV/mm, E_{max} ajunge la 89 kV/mm). Pentru $E_{app} < 15$ kV/mm, E_{max} creste in primele 10 minute si apoi ramane cuasi-constant pana la sfarsitul masurarii. Pentru $E_{app} = 15$ kV/mm, E creste pana la un maxim in aprox. 10 minute si apoi scade pana la 85 % din maxim. Din fig. 55 se constata ca, indiferent de valoarea lui E_{app} , E_{max} se gaseste in zona centrala de XLPE.

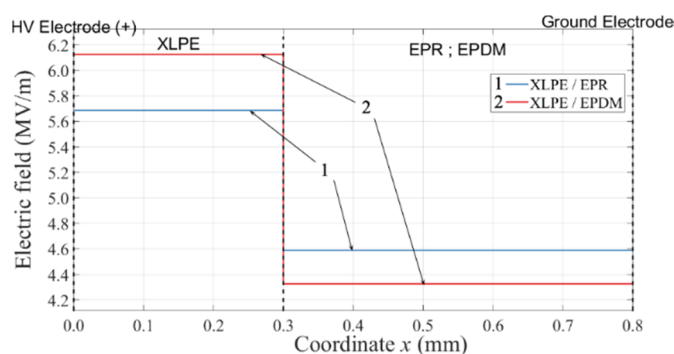


Fig. 51. Variatia intensitatii campului electric cu coordonata x pe durata aplicarii tensiunii, pentru esantioane neimbatranite XLPE / EPR (1) si XLPE / EPDM (2) (ES, Voltage-ON, $E_{app} = 5$ kV/mm, $T = 30$ °C, $\rho_v = \rho_s = 0$)

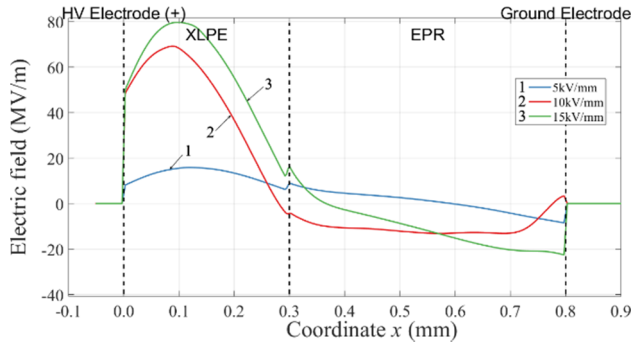


Fig. 52. Variatia intensitatii campului electric cu coordonata x pentru esantioane neimbatranite XLPE / EPR la 1 ora dupa aplicarea tensiunii, pentru $E_{app} = 5$ (1), 10 (2) si 15 (3) kV/mm (ES, $t = 3600$ s, Voltage-ON, $\rho_v \neq 0$, $\rho_s = 0$)

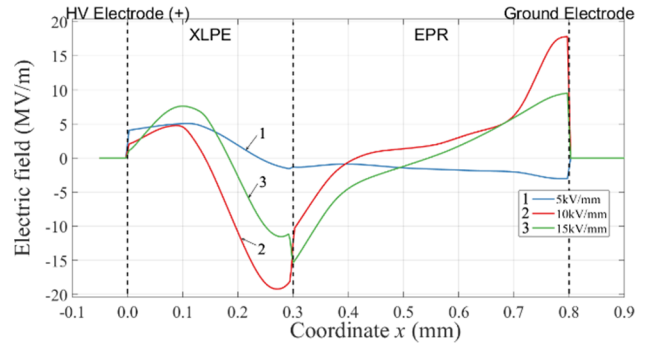


Fig. 53. Variatia intensitatii campului electric cu coordonata x pentru esantioane neimbatranite XLPE / EPR la 300 s dupa anulara tensiunii, pentru $E_{app} = 5$ (1), 10 (2) si 15 (3) kV/mm (ES, $t = 300$ s, Voltage-OFF, $\rho_v \neq 0$, $\rho_s = 0$)

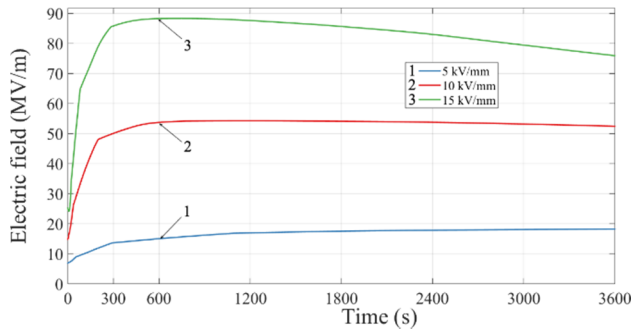


Fig. 54. Variatia valorii maxime a intensitatii campului electric, cu timpul de masura, pe durata aplicarii tensiunii, pentru esantioane neimbatranite XLPE / EPR, pentru $E_{app} = 5$ (1), 10 (2) si 15 (3) kV/mm (Voltage-ON, $\rho_v \neq 0$, $\rho_s = 0$)

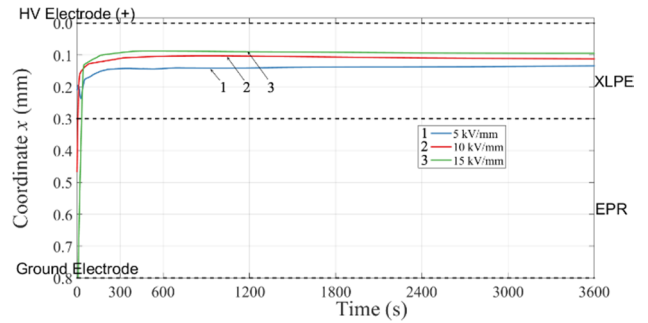


Fig. 55. Variatia coordonatei x a valorii maxime a intensitatii campului electric, cu timpul de masura, pe durata aplicarii tensiunii, pentru esantioane neimbatranite XLPE / EPR, pentru $E_{app} = 5$ (1), 10 (2) si 15 (3) kV/mm (Voltage-ON, $\rho_v \neq 0$, $\rho_s = 0$)

Pentru esantioanele XLPE / EPDM, in Voltage-ON, E se modifica proportional cu E_{app} (fig. 56), separarea de sarcina spatiala langa electrozi si la interfața XLPE / EPDM ducand la cresteri sau scaderi locale ale intensitatii campului electric. In acelasi timp, existenta unei densitati de sarcina nenule dupa anulara tensiunii conduce la valori nenule pentru campul electric rezidual, in special pentru cazurile cand $E_{app} > 5$ kV/mm (fig. 57). Variatia lui E_{max} ca functie de E_{app} , pe durata aplicarii tensiunii, este prezentata in fig. 58, si variatia cu timpul de masurare a coordonatei x a punctului unde E ia valoarea maxima este prezentata in fig. 59. E_{max} depinde de E_{app} (fig. 58) si, pentru valori ale lui $E_{app} < 15$ kV/mm, se gaseste, initial, in mijlocul esantionului (in zona de EPDM, la $x_P \approx 0.45$ mm) si se deplaseaza catre interfața pe durata masuratorii. Pentru $E_{app} = 15$ kV/mm valoarea lui E_{max} se gaseste in zona de XLPE a esantionului (la $x_P \approx 0.15$ mm) pe intreaga durata a masuratorii (fig. 59). Dupa anulara tensiunii, langa electrodul GND, valorile reziduale ale lui E depind de valoarea lui E_{app} si, indiferent de valorile lui E_{app} , E nu se anuleaza pana la sfarsitul masuratorii.

Repartitia lui E este influentata si de durata de imbatranire a esantioanelor, atat in prezenta, cat si in absenta tensiunii aplicate (figs. 60 si 61), datorita modificarilor aduse de noua repartitie a densitatilor de sarcina cu starea de imbatranire. In prezenta tensiunii (Voltage-ON), valorile intensitatii campului electric cresc in vecinatatea ambilor electrozi in esantioanele imbatranite fata de cele neimbatranite (fig. 60). Dupa anulara tensiunii electrice, la orice moment t valorile reziduale ale campului electric din vecinatatea electrozilor sunt mai ridicate in esantioanele imbatranite fata de cele neimbatranite (fig. 61).

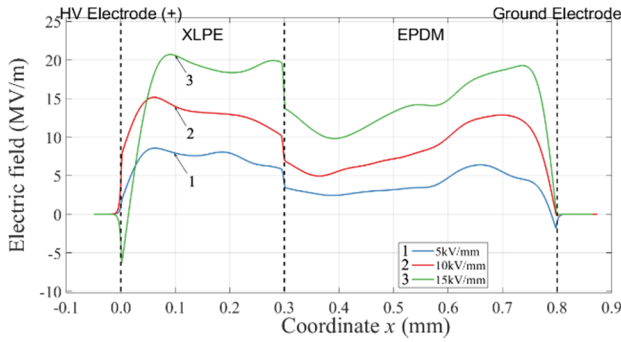


Fig. 56. Variatia intensitatii campului electric cu coordonata x pentru esantioane neimbatranite XLPE / EPDM la 2400 s dupa aplicarea tensiunii, pentru $E_{app} = 5$ (1), 10 (2) si 15 (3) kV/mm (ES, $t = 2400$ s, Voltage-ON, $\rho_v \neq 0$, $\rho_s = 0$)

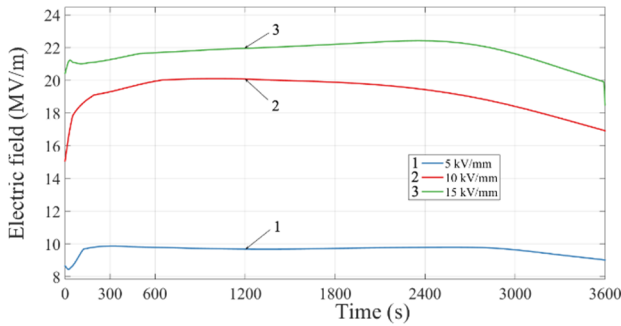


Fig. 58. Variatia valorii maxime a intensitatii campului electric, cu timpul de masura, pe durata aplicarii tensiunii, pentru esantioane neimbatranite XLPE / EPDM, pentru $E_{app} = 5$ (1), 10 (2) si 15 (3) kV/mm (Voltage-ON, $\rho_v \neq 0$, $\rho_s = 0$)

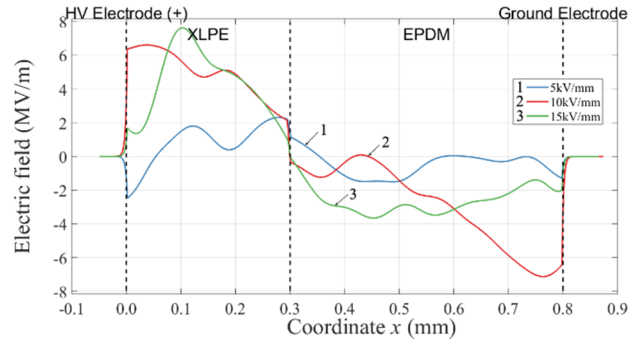


Fig. 57. Variatia intensitatii campului electric cu coordonata x pentru esantioane neimbatranite XLPE / EPDM la 60 s dupa anulara tensiunii, pentru $E_{app} = 5$ (1), 10 (2) si 15 (3) kV/mm (ES, $t = 60$ s, Voltage-OFF, $\rho_v \neq 0$, $\rho_s = 0$)

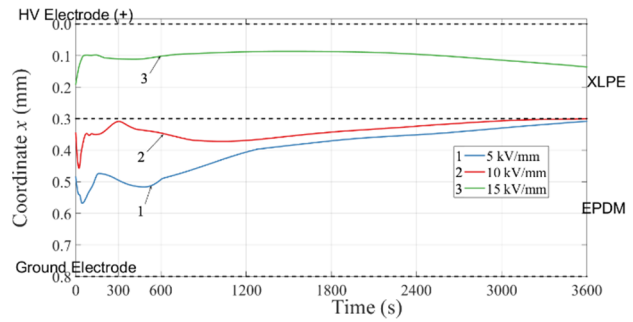


Fig. 59. Variatia coordonatei x a valorii maxime a intensitatii campului electric, cu timpul de masura, pe durata aplicarii tensiunii, pentru esantioane neimbatranite XLPE / EPDM, pentru $E_{app} = 5$ (1), 10 (2) si 15 (3) kV/mm (Voltage-ON, $\rho_v \neq 0$, $\rho_s = 0$)

Pe durata aplicarii tensiunii, variatiile lui E_{max} si a pozitiei lui E_{max} din esantion cu timpul de masurare sunt prezentate in figs. 62 – 63. E_{max} ia valori mai ridicate in esantioanele imbatranite fata de cele neimbatranite (fig. 62) si creste in primele 15 minute si, apoi, ramane, practic, constanta pana la sfarsitul masurarii. Indiferent de starea de imbatranire, pozitia lui E_{max} se gaseste in stratul de XLPE, respectiv aproape de centru (in jurul coordonatei $x_P = 0.10 - 0.15$ mm, fig. 63). Dupa anulara tensiunii, langa electrodul GND, valorile reziduale ale lui E scad in timp, indiferent de valorile aplicate ale lui E_{app} , si nu devin nule.

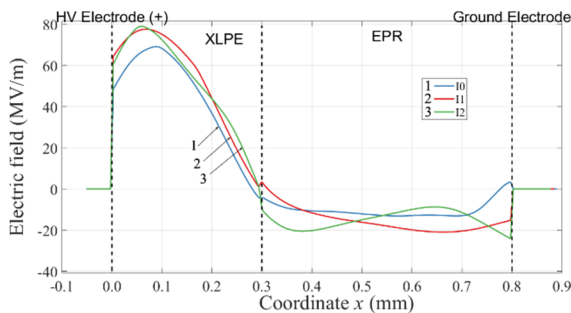


Fig. 60. Variatia intensitatii campului electric cu coordonata x la 1 ora dupa aplicarea tensiunii, pentru esantioane XLPE / EPR neimbatranite (I0, 1) si imbatranite pentru 30 zile (I1, 2) si 60 zile (I2, 3) (ES, $t = 3600$ s, Voltage-ON, $E_{app} = 10$ kV/mm, $\rho_v \neq 0$, $\rho_s = 0$)

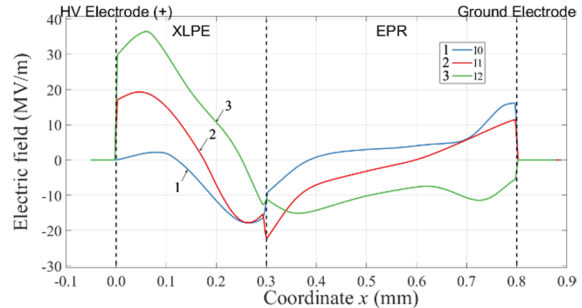


Fig. 61. Variatia intensitatii campului electric cu coordonata x la 600 s dupa anulara tensiunii, pentru esantioane XLPE / EPR neimbatranite (I0, 1) si imbatranite pentru 30 zile (I1, 2) si 60 zile (I2, 3) (ES, $t = 600$ s, Voltage-OFF, $E_{app} = 10$ kV/mm, $\rho_v \neq 0$, $\rho_s = 0$)

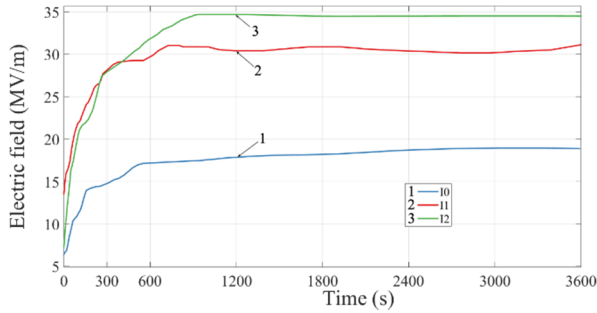


Fig. 62. Variatia valorii maxime a intensitatii campului electric, cu timpul de masura, pe durata aplicarii tensiunii, pentru esantioane XLPE / EPR neimbatranite (I0, 1) si imbatranite pentru 30 zile (I1, 2) si 60 zile (I2, 3) (Voltage-ON, $E_{app} = 5 \text{ kV/mm}$, $\rho_v \neq 0$, $\rho_s = 0$)

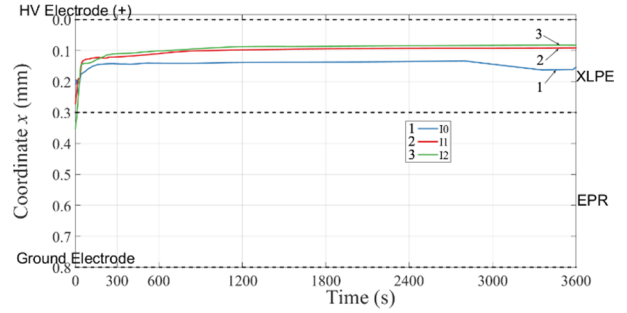


Fig. 63. Variatia coordonatei x a valorii maxime a intensitatii campului electric, cu timpul de masura, pe durata aplicarii tensiunii, pentru esantioane XLPE / EPR neimbatranite (I0, 1) si imbatranite pentru 30 zile (I1, 2) si 60 zile (I2, 3) (Voltage-ON, $E_{app} = 5 \text{ kV/mm}$, $\rho_v \neq 0$, $\rho_s = 0$)

8.4. Esantioane cilindrice

Repartitiile lui E in esantioanele cilindrice (domeniul din fig. 50) au fost obtinute in ES, EQS si in EC. In ES s-a considerat prezenta lui ρ_v si ρ_s , ambele fiind determinate experimental la diferite valori ale lui U_{app} (25, 50, 75 si 100 kV), la $T = 30^\circ\text{C}$. In EQS, s-a considerat prezenta lui ρ_s , determinata prin calcul pentru diferite U_{app} (25, 50, 75 si 100 kV) si T (30 – 90 $^\circ\text{C}$).

In ES, in absenta sarcinii spatiale ($\rho_v = \rho_s = 0$), E variaza cu coordonata r in functie de tensiunea aplicata si de valorile permitivitatii relative ale subdomeniilor $D1$ si $D2$ (fig. 64). Pentru subdomeniul $D1$, E este mai intens in EPR fata de EPDM (valoarea maxima, langa electrodul de HV, este 6.6 MV/m (EPR) vs. 6.5 MV/m (EPDM)). In subdomeniul $D2$ valoarea maxima a lui E (langa interfata) este mai ridicata cu 12 % in cazul esantioanelor EPDM / XLPE (6.3 MV/m) comparativ cu cele EPR / XLPE (5.6 MV/m). Acest comportament este datorat lui ϵ_r care are valori mai ridicate pentru EPDM (3.2) fata de EPR (2.8).

Cresterea tensiunii aplicate conduce la modificari ale repartitiei campului electric, atat in prezenta (fig. 65), cat si in absenta (fig. 66) tensiunii aplicate. Astfel, in prezenta tensiunii aplicate, pentru $U_{app} < 100 \text{ kV}$, valorile lui E cresc o data cu cele ale lui U_{app} (fig. 65). Pentru $U_{app} = 100 \text{ kV}$, E are un maxim (43 kV/mm) langa GND (fig. 65).

Variatia cu timpul de masurare a lui E_{max} este prezentata in fig. 67, iar variatia cu timpul de masurare a coordonatei r a punctului unde E ia valoarea sa maxima este prezentata in fig. 68; E_{max} depinde de tensiunea aplicata: este constant pentru $U_{app} < 100 \text{ kV}$ si creste in timp pentru $U_{app} = 100 \text{ kV}$ (fig. 67). Pentru valorile ale lui $U_{app} \leq 50 \text{ kV}$, E_{max} se gaseste in mijlocul esantionului (in zona de EPR, $r_p \approx 10.00 \text{ mm}$) pe intreaga durata a masuratorii, iar pentru $U_{app} > 50 \text{ kV}$ E_{max} se gaseste, initial, in mijlocul esantionului, si apoi, in timp, se deplaseaza catre electrodul GND (fig. 68).

Existenta lui $\rho_v \neq 0$ conduce la valori reziduale importante ale campului electric, chiar si dupa anulara tensiunii aplicate. Astfel, pentru $U_{app} = 100 \text{ kV}$, la 600 s dupa anulara tensiunii, $E = -37 \text{ kV/mm}$ langa GND. In volumul esantionului, valorile lui E depind de U_{app} , si langa GND E creste in timp catre valori mai ridicate, cu cat valorile lui U_{app} sunt mai mari.

In EQS (dar si in EC), repartitia campului electric este influentata de variatia conductivitatii electrice cu temperatura si cu intensitatea campului electric. Conductivitatea electrica pentru esantioane XLPE / EPR, la $T = 30^\circ\text{C}$ si $U_{app} = 25 \text{ kV}$, este mai ridicata in EPR decat in XLPE, descreste cu raza r , este mai ridicata in vecinatatea electrodului de HV ($r = 8 \text{ mm}$) – unde valoarea intensitatii campului electric este mai ridicata – si ca, in timp, valorile lui σ cresc in EPR (valoarea maxima creste de 1.2 ori de la 8 la 9.5 fS/m) si scade in XLPE (valoarea maxima scade de 1.6 ori de la 3.5 la 2.1 fS/m).

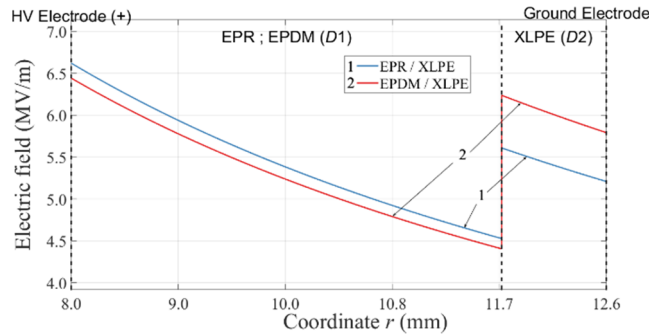


Fig. 64. Variatia intensitatii campului electric cu coordonata r pe durata aplicarii tensiunii, pentru esantioane neimbatranite EPR / XLPE (1) si EPDM / XLPE (2) (ES, $T = 30$ °C, $U_{app} = 25$ kV, $\rho_v = 0$, $\rho_s = 0$)

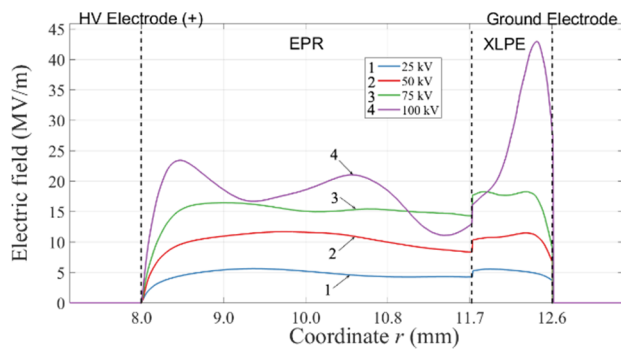


Fig. 65. Variatia intensitatii campului electric cu coordonata r pentru esantioane neimbatranite EPR / XLPE, la 1 ora de la aplicarea tensiunii, pentru $U_{app} = 25$ (1), 50 (2), 75 (3) si 100 (4) kV (ES, $t = 3600$ s, Voltage-ON, $\rho_v \neq 0$, $\rho_s = 0$)

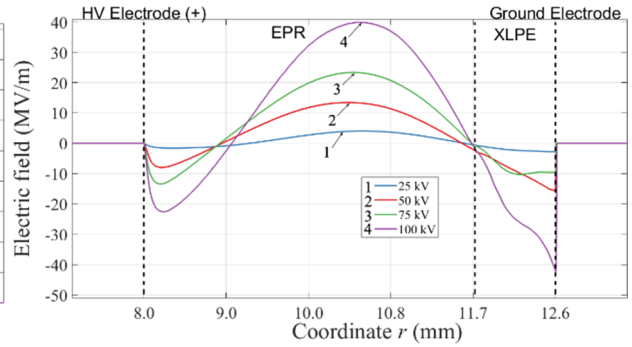


Fig. 66. Variatia intensitatii campului electric cu coordonata r pentru esantioane neimbatranite EPR / XLPE, la 600 s dupa anulara tensiunii, pentru $U_{app} = 25$ (1), 50 (2), 75 (3) si 100 (4) kV (ES, $t = 600$ s, Voltage-OFF, $\rho_v \neq 0$, $\rho_s = 0$)

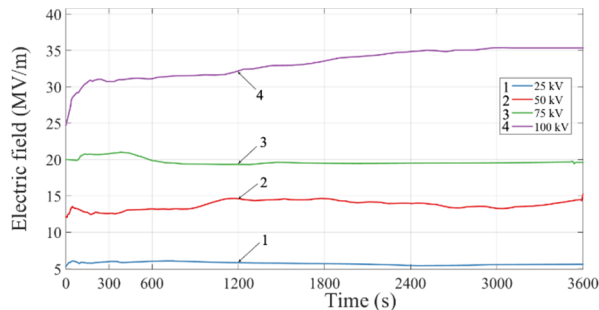


Fig. 67. Variatia valorii maxime a intensitatii campului electric cu timpul de masura, pe durata aplicarii tensiunii, pentru esantioane neimbatranite EPR / XLPE, pentru $U_{app} = 25$ (1), 50 (2), 75 (3) si 100 (4) kV (Voltage-ON, $\rho_v \neq 0$, $\rho_s = 0$)

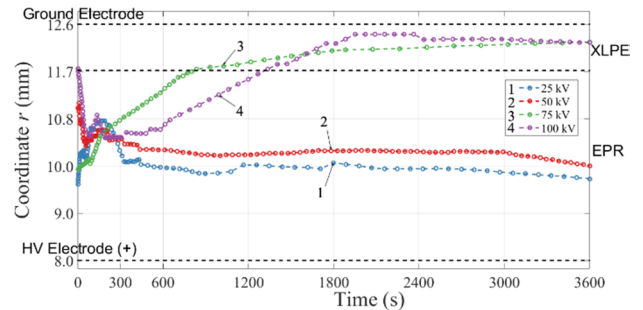


Fig. 68. Variatia coordonatei r a valorii maxime a intensitatii campului electric, cu timpul de masura, pe durata aplicarii tensiunii, pentru esantioane neimbatranite EPR / XLPE, la $U_{app} = 25$ (1), 50 (2), 75 (3) si 100 (4) kV (Voltage-ON, $\rho_v \neq 0$, $\rho_s = 0$)

Conductivitatea electrica pentru esantioane EPR / XLPE la $T = 30$ °C si $t = 3600$ s, creste cu valorile tensiunii aplicate, atat in EPR (langa HV aceasta creste de aprox. 2.1 ori, de la 9.2 la 19.5 fS/m) si in XLPE (langa interfata creste de aprox. 3.7 ori, de la 2.2 la 8.1 fS/m).

Conductivitatea electrica pentru esantioane EPR / XLPE la $U_{app} = 50$ kV si $t = 3600$ s, creste cu cresterea temperaturii, atat in EPR (langa HV aceasta creste cu aprox. 2.5 ordine de marime, de la 14 fS/m la 4 pS/m), cat si in XLPE (langa interfata creste de aprox. 4 ori, de la 5 la 20 fS/m).

Repartitia conductivitatii electrice depinde si de tipul te material (unde intervin diferiti parametri pentru expresia lui $\sigma(T, E)$ pentru XLPE, EPR si EPDM). Valorile lui σ sunt mai ridicate, in ambele subdomenii, in cazul esantioanelor EPR / XLPE fata de cele EPDM / XLPE.

Pentru ca in fiecare subdomeniu σ variaza cu E si cu T , densitatea superficiala de sarcina ρ_s la interfata dintre subdomenii (pe S_{12}) se modifica. Variatiile lui ρ_s cu timpul de masura, pentru esantioane EPR / XLPE, la diferite valori ale lui T pentru o valoare a lui E (corespunzand lui $U_{app} = 50$ kV) sunt prezentate in fig. 69, a. Se constata ca ρ_s tinde catre o valoare maxima $\rho_{s,max}$, corespunzatoare regimului electrocinetic stationar si ca aceasta valoare este atinsa la un moment τ_{max} care scade cu cresterea temperaturii: pentru $T = 30$ °C, $\tau_{max} = 6400$ s, si pentru $T = 90$ °C, $\tau_{max} = 200$ s.

Variatiile lui ρ_s cu timpul de masura, pentru esantioane EPR / XLPE, la valori diferite ale lui E pentru $T = 30$ °C sunt prezentate in fig. 69, b. Se constata ca ρ_s tinde catre o valoare maxima $\rho_{s,max}$, corespunzatoare regimului electrocinetic stationar, si ca aceasta valoare este atinsa la un moment τ_{max} care scade cu cresterea tensiunii aplicate: pentru $U = 25$ kV, $\tau_{max} = 10700$ s, iar pentru $U = 100$ kV, $\tau_{max} = 5520$ s. Pe de alta parte, variatia cu temperatura a densitatii de sarcina are un efect mult mai pronuntat decat cu intensitatea campului electric, respectiv ρ_s ajunge la valoarea maxima $\rho_{s,max}$ mult mai rapid cu cresterea temperaturii decat cu cresterea intensitatii campului electric.

Variatiile lui ρ_s cu timpul de masura, la $T = 30$ °C si $U_{app} = 25$ kV sunt prezentate in fig. 69, c, pentru esantioane EPR / XLPE (fig. 69, c, curba 1) si EPDM / XLPE (fig. 69, c, curba 2). Se constata ca ρ_s creste in timp pana la un maxim, $\rho_{s,max}$, care este egal cu 0.18 mC/m² pentru esantioanele EPR / XLPE si 0.08 mC/m² pentru esantioanele EPDM / XLPE. Aceasta se datoreaza valorilor mai mari ale conductivitatii electrice in EPR decat in EPDM. De asemenea, se observa ca timpul la care densitatea de sarcina atinge aceasta valoare este mai crescut pentru esantioanele EPDM / XLPE (9 ore) decat pentru cele EPR / XLPE (7 ore).

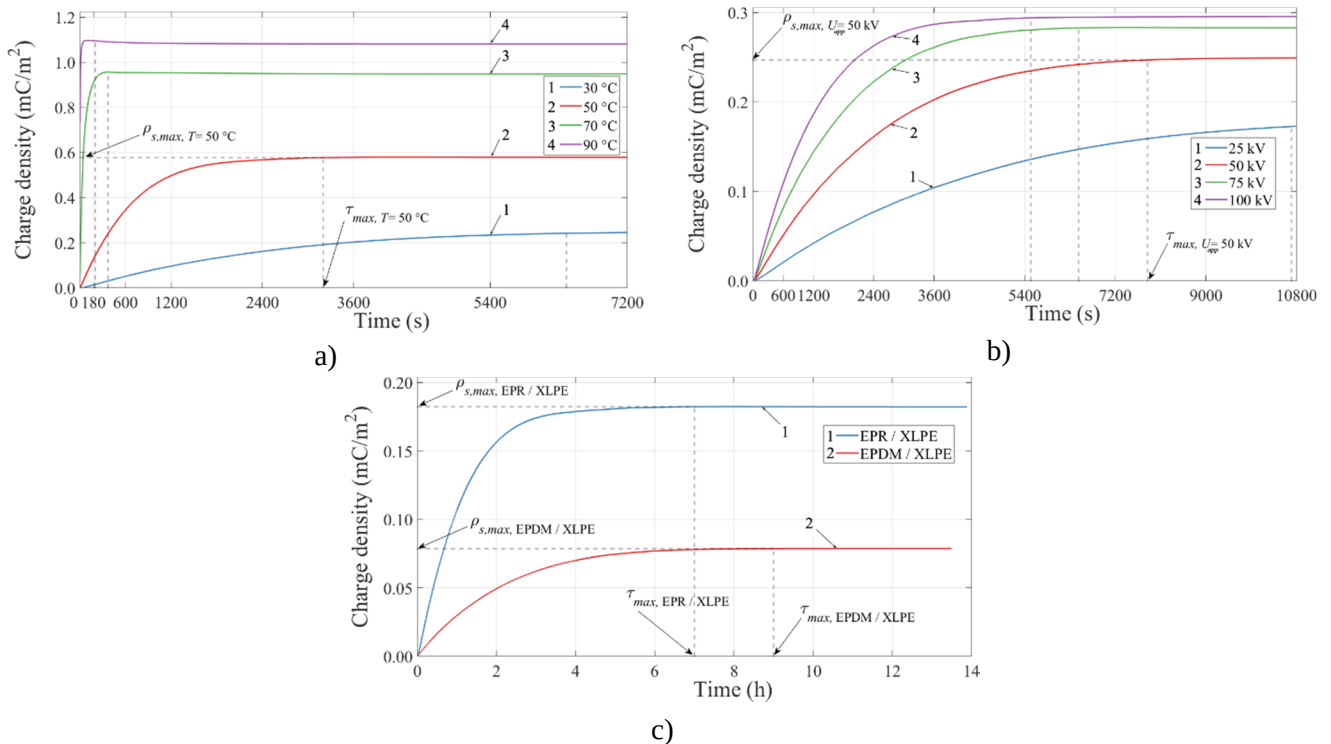


Fig. 69. Variatia densitatii superficiale de sarcina cu timpul de masurare, pe durata aplicarii tensiunii, pentru esantioane neimbatranite, de tipul EPR / XLPE (a si b) si EPR / XLPE si EPDM / XLPE (c),
a. la $T = 30$ (1), 50 (2), 70 (3) si 90 °C (4) (EQS, Voltage-ON, $U_{app} = 50$ kV)
b. la $U_{app} = 25$ (1), 50 (2), 75 (3) si 100 kV (4) (EQS, Voltage-ON, $T = 30$ °C)
c. pentru EPR / XLPE (1) si EPDM / XLPE (2) (EQS, Voltage-ON, $T = 30$ °C, $U_{app} = 25$ kV)

8.5. Jonctiune de cablu

Pentru jonctiunea de cablu, calculul repartitiei lui E a fost determinat pe geometria prezentata in fig. 52, unde, initial, intre izolatia jonctiunii (EPR, subdomeniul $D9$) si izolatia cablului (XLPE, subdomeniul $D4$) nu este interpus materialul de tip FGM, respectiv ca subdomeniul $D10$ este parte a subdomeniului $D9$.

Repartitia liniilor echipotentiala este prezentata in fig. 70 si cea a intensitatii campului electric in fig. 71. Se observa ca liniile echipotentiala sunt mai dense in zona din straturile izolatoare din vecinatatea conectorului si mai rare (sau deloc) catre extremitati (fig. 70). E are valori mai ridicate in stratul de izolatia al cablului decat in cel a jonctiunii, unde scade cu coordonata r , pe cand in stratul de izolatia al jonctiunii (deasupra conectorului) creste usor cu coordonata r (fig. 71). La capatul stratului semiconductor interior al jonctiunii se observa o concentratie locala a intensitatii campului electric (fig. 71).

Daca se considera ca intre stratul izolator al jonctiunii si stratul izolator al cablului exista un strat cu proprietati neliniare de tip FGM (subdomeniul $D10$), repartitiile liniilor echipotentiala (fig. 72) si a intensitatii campului electric (fig. 73) se modifica: liniile echipotentiala sunt repartizate acum pe intreaga lungime a straturilor izolatoare ale cablului si ale jonctiunii, iar intensitatea campului electric are valori mai reduse in ambele straturi izolatoare, comparativ cu cazul in care nu exista materialul FGM. La capatul stratului semiconductor interior al jonctiunii nu se mai observa o concentratie locala a campului electric.

Pentru a studia mai in detaliu influenta materialului FGM interpus intre straturile izolatoare ale cablului si ale jonctiunii s-au ales cateva puncte si linii pentru care s-au obtinut valori locale sau s-au trasat curbele de variatie a unor marimi de-a lungul acestora. Localizarea in spatiu a acestor puncte si linii este prezentata in fig. 74 (puncte) si fig. 75 (linii).

In Tabelul 2 se prezinta valorile intensitatii campului electric in punctul $P3$ (langa coltul exterior al stratului semiconductor interior al jonctiunii) considerat a fi punctul unde s-a observat o concentratie locala ridicata a campului electric, in absenta si in prezenta FGM. Se observa ca intensitatea campului electric este mai mare de cca. 25 ori in cazul absentei decat in acela al prezentei FGM (E ia valoarea 9.63 MV/m in absenta FGM si 0.41 MV/m in prezenta acestuia).

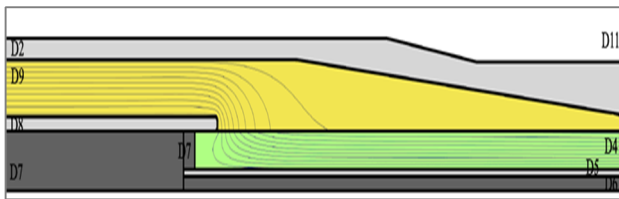


Fig. 70. Repartitia in spatiu a liniilor echipotentiala in zona conectorului jonctiunii, fara FGM

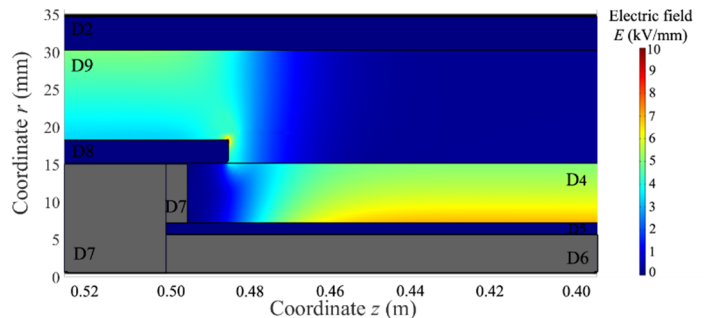


Fig. 71. Repartitia in spatiu a intensitatii campului electric in zona conectorului jonctiunii, fara FGM

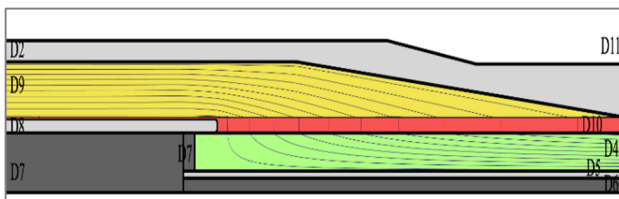


Fig. 72. Repartitia in spatiu a liniilor echipotentiala in zona conectorului jonctiunii, cu FGM

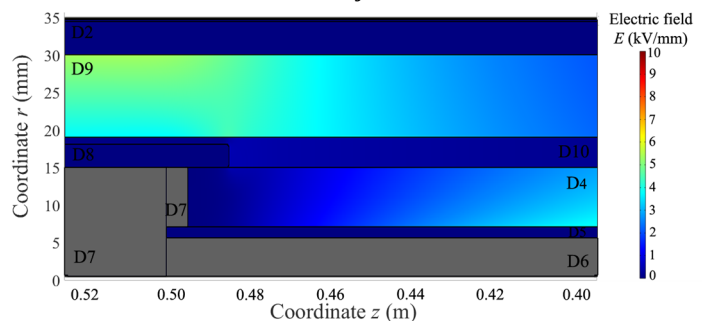


Fig. 73. Repartitia in spatiu a intensitatii campului electric in zona conectorului jonctiunii, cu FGM

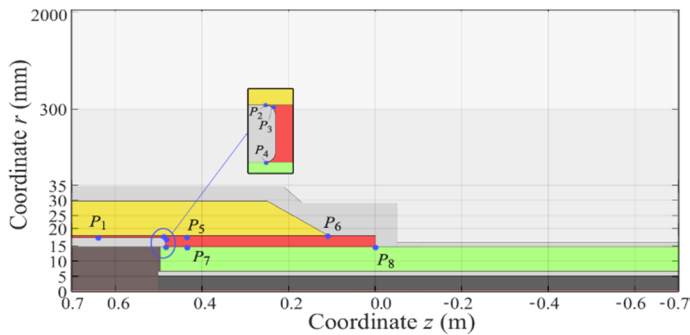


Fig. 74. Localizarea in spatiu a punctelor de studiu

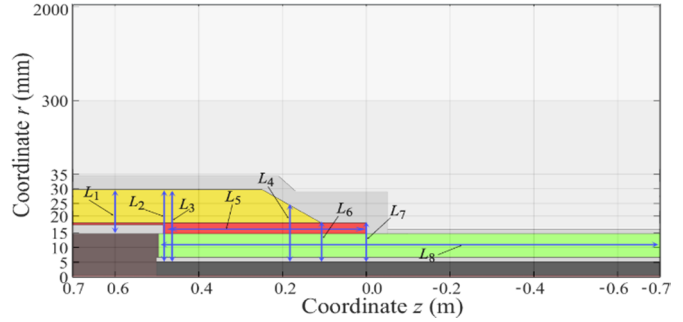


Fig. 75. Localizarea in spatiu a liniilor de studiu

In Tabelul 3 se prezinta valorile densitatii superficiale de sarcina ρ_s (determinata in EQS la un moment foarte mare, considerat a fi in EC) in doua puncte, P_5 si P_7 , de-a lungul unei linii imaginare de-a lungul axei r , la $z = 0.45$ m, punctele P_5 si P_7 corespunzand interfetelor dintre materialul FGM si stratul semiconductor al cablului (punctul P_7) si dintre materialul FGM si stratul izolator al jonctiunii (punctul P_5). In cazul absentei materialului FGM, punctul P_5 este considerat a fi parte din stratul izolator al jonctiunii, si astfel ρ_s in acest punct este egal cu 0. Se observa ca, desi prezenta FGM creeaza o noua interfata (punctul P_5), totusi, densitatea superficiala de sarcina este mai mare in cazul absentei decat in acela al prezentei FGM. De asemenea, se observa ca polaritatea densitatii superficiale de sarcina este negativa in cazul fara FGM si pozitiva in cazul cu FGM.

Figura 76, a, se prezinta variatia intensitatii campului electric E pentru linia $L1$ (deasupra conectorului), in absenta (fig. 76, a, curba 1) si in prezenta FGM (fig. 76, a, curba 2). Valorile lui E cresc cu coordonata r si sunt mai ridicate in izolatia jonctiunii (subdomeniul $D9$) cu aprox. 7.3 % (la punctul de coordonata $r = 29.5$ mm, $E = 5.31$ MV/m vs. 4.95 MV/m) daca este prezent materialul FGM in subdomeniul $D10$ (fig. 76, a, curba 2) decat pentru cazul in care subdomeniul $D10$ face parte din stratul izolator al jonctiunii (fig. 76, a, curba 1). Inversia profilului intensitatii campului electric de-a lungul stratului izolator al jonctiunii (fig. 76, a, subdomeniul $D9$), respectiv valori mai mari la ecranul exterior al izolatiei (aflat la 52 °C) si valori mai reduse la ecranul interior al izolatiei (aflat la 63 °C) sunt de asteptat, considerand gradientul de temperatura de 11 °C intre pozitiile interioare si exterioare ale ecranului si stiind ca repartitia campului electric in regim electrocinetic stationar este determinata de valorile locale ale conductivitatii electrice ale izolatiei (ce depinde de campul electric si de temperatura) [46].

Daca la punctul P_c de coordonata $r = 29.5$ mm (in zona valorilor maxime ale lui E din fig. 8.58, corespunzatoare interfetei dintre izolatia jonctiunii si stratul semiconductor exterior al jonctiunii) exista o cavitate de diametru $D_{cav} = 0.1$ mm (conform §8.4), atunci rigiditatea dielectrica a aerului (corespunzatoare ec. (8.21) si fig. 8.9), la valoarea temperaturii din punctul P_c , are valoarea $E_{br}(P_c) = 7.205$ MV/m.

 Tabel 2. Valorile intensitatii campului electric la punctul P_3

Caz	Intensitatea campului electric E (MV/m)
Fara FGM	9.63
Cu FGM	0.41

 Tabel 3. Valorile densitatii superficiale de sarcina la punctele P_5 si P_7

Caz	Densitatea superficiala de sarcina ρ_s ($\mu\text{C}/\text{m}^2$)		
	Punctul P_5	Punctul P_7	Suma $P_5 + P_7$
Fara FGM	0	-92.42	-92.42
Cu FGM	14.99	5.60	20.59

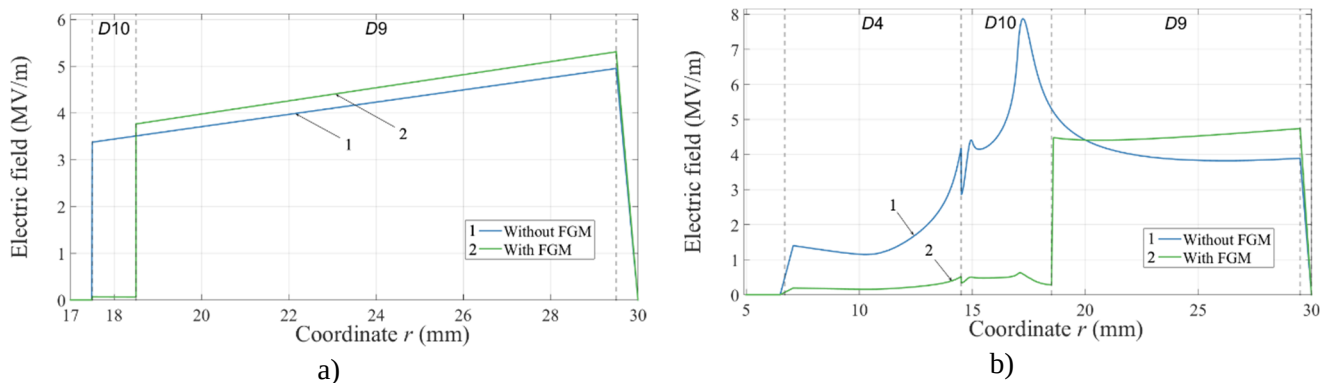
Intensitatea locala a campului electric in interiorul cavitatii este (conform ec. (8.15)) $E(P_c) = 7.255 \text{ MV/m}$ (in absenta FGM, (fig. 76, a, curba 1)) si 7.775 MV/m (in prezenta FGM, (fig. 76, a, curba 2)). In acest punct (P_c), intensitatea campului electric din cavitate este suficienta pentru a initia strapungerea locala, indiferent de existenta materialului FGM. Deoarece punctul P_c este in vecinatatea stratului semiconductor exterior al jonctiunii, exista posibilitatea difuziei moleculelor de apa din mediul inconjurator, antrenand acumularea de ioni purtatori de sarcina si producand arborescente electrochimice, determinand inrautatarea proprietatilor dielectrice a izolatiei jonctiunii (vezi §3.2).

Figura 76, b, prezinta variatia intensitatii campului electric E pentru linia L2 (la 0.05 mm fata de capatul stratului semiconductor interior al jonctiunii, intre stratul izolator al cablului (subdomeniul D4), stratul FGM (subdomeniul D10) si stratul izolator al jonctiunii (subdomeniul D9)), in absenta (fig. 76, b, curba 1) si in prezenta stratului FGM (fig. 76, b, curba 2). Valorile lui E in stratul de izolatatie al cablului (subdomeniul D4), in stratul FGM (subdomeniul D10) si in stratul de izolatatie al jonctiunii (subdomeniul D9) sunt mai mici in prezenta (fig. 76, b, curba 1) decat in absenta stratului FGM (fig. 76, b, curba 2), cu exceptia in subdomeniul D9 pentru punctele de coordonata $r > 20 \text{ mm}$, unde valorile lui E sunt cu pana la 22 % mai ridicate (4.75 MV/m vs. 3.90 MV/m la punctul de coordonata $r = 29.5 \text{ mm}$).

In stratul izolator al cablului (subdomeniul D4), valorile lui E sunt de 7 – 8.4 ori mai mici in prezenta FGM (fig. 76, b, curba 2); de exemplu, in punctul P_c de coordonata $r = 15 \text{ mm}$, $E = 0.5 \text{ MV/m}$ fata de 4.2 MV/m . Pe de alta parte, in absenta FGM (fig. 76, b, curba 1), E prezinta un maxim in jurul punctului de coordonata $r = 17.25 \text{ mm}$ (corespunzator influentei coltului stratului semiconductor interior al jonctiunii), respectiv $E_{\max} = 7.87 \text{ MV/m}$. Valoarea lui $E_{\max}$ scade pana la 0.62 MV/m in cazul in absentei FGM (fig. 76, b, curba 2).

Figura 76, c, prezinta variatia intensitatii campului electric E pentru linia L4 (la 300 mm fata de capatul stratului semiconductor interior al jonctiunii, intre stratul izolator al cablului (subdomeniul D4), stratul FGM (subdomeniul D10) si stratul izolator al jonctiunii (subdomeniul D9)), in absenta (fig. 76, c, curba 1) si in prezenta stratului FGM (fig. 76, c, curba 2). Se observa ca la aceasta distanta fata de conectorul jonctiunii, E descreste cu coordonata r in toate subdomeniile (in pozitiile mai apropiate de conector, E creste cu coordonata r in izolatie jonctiunii (subdomeniul D9) (vezi de asemenea si fig. 76, a)).

Se constata ca valorile lui E in izolatie cablului (subdomeniul D4) sunt doar cu 10 % mai ridicate in absenta stratului FGM (fig. 76, c, curba 1) decat in prezenta stratului FGM (fig. 76, c, curba 2), respectiv 5.90 MV/m vs. 5.76 MV/m la punctul de coordonata $r = 10 \text{ mm}$. De asemenea, in prezenta stratului FGM (fig. 76, c, curba 2), valorile lui E in stratul de izolatatie al jonctiunii (subdomeniul D9) sunt de 2.5 ori mai ridicate in absenta stratului FGM (fig. 76, c, curba 1), respectiv 0.67 MV/m vs. 0.27 MV/m la punctul de coordonata $r = 20 \text{ mm}$.



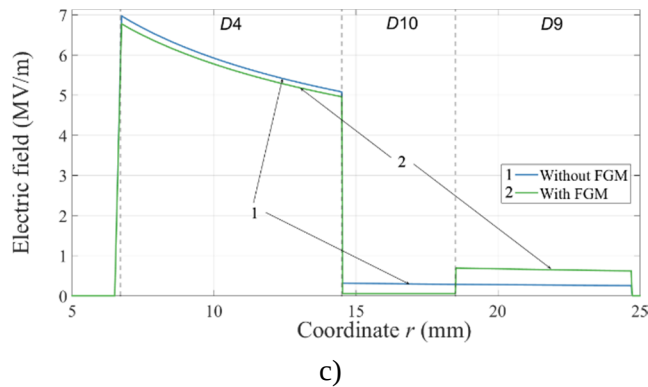


Fig. 76. Variatia intensitatii campului electric cu coordonata r , in absenta (1) si in prezenta (2) stratului FGM: **a)** de-a lungul liniei L1 ; **b)** de-a lungul liniei L2 ; **c)** de-a lungul liniei L4

Concluziile Capitolului 8:

- Relatia empirica propusa pentru determinarea conductivitatii electrice in functie de intensitatea campului electric si temperatura este validata experimental.
- In cazul domeniului plan, in regimul electrostatic, valoarea maxima a intensitatii campului electric se afla in subdomeniul XLPE si este cu 8 % mai ridicata in cazul esantioanelor XLPE / EPDM fata de cele XLPE / EPR.
- In regimul electrocinetic stationar, prezenta unei densitati superficiale de sarcina intensifica valorile lui E in XLPE si le scade in EPR sau in EPDM, efectul asupra repartitiei lui E fiind mai intens in cazul esantioanelor XLPE / EPR fata de XLPE / EPDM (E creste de aprox. 2.2 ori in XLPE si scade de aprox. 4 ori in EPR in XLPE / EPR, si creste de aprox. 1.5 ori in XLPE si scade de 1.8 ori in EPDM in esantioanele XLPE / EPDM).
- Prezenta unei densitati volumice de sarcina modifica repartitia intensitatii campului electric, aceasta devenind, local, mai ridicata de pana la 4 ori in XLPE in cazul esantioanelor XLPE / EPR si de pana la 1.25 ori in XLPE in esantioanele XLPE / EPDM.
- In cazul domeniului cilindric, existenta sarcinii spatiale determina modificari importante ale repartitiei intensitatii campului electric, atat in prezenta, cat si in absenta tensiunii aplicate. In prezenta tensiunii aplicate, valorile lui E scad in vecinatatea electrozilor si cresc in partile centrale ale esantioanelor. La anulara tensiunii, valorile reziduale ale lui E se reduc in timp dar nu se anuleaza nici dupa o ora.
- Variatia conductivitatii electrice cu T are un efect mai pronuntat fata de variatia cu E asupra valorilor lui ρ_s acumulate la interfata; ρ_s ajunge la valoarea maxima mult mai rapid pentru temperaturi mai ridicate decat pentru intensitati mai ridicate ale campului electric.
- Cu cat conductivitatea electrica a materialelor din componenta esantionului este mai ridicata, cu atat mai rapid se acumuleaza o sarcina superficiala la interfata, iar valoarea sa maxima este mai mare. Deoarece $\sigma_{EPR} > \sigma_{EPDM}$, se acumuleaza o densitate mai mare de sarcina superficiala la interfata esantioanelor cilindrice EPR / XLPE fata de EPDM / XLPE.
- Toate rezultatele prezentate in acest Capitol sustin Ipoteza H3 privind intensificarea solicitarilor electrice ca efect al sarcinii spatiale, si, cum s-a vazut in Capitolul 3, duce la degradarea izolatiilor jonctiunilor de CC.
- Incorporarea unui material de tip FGM in structura jonctiunilor de CC conduce la o acumulare mai reduisa de sarcina spatiala la interfetele intre straturile izolatoare din componenta jonctiunii si, in general, conduce la valori mai reduse ale intensitatii campului electric si, in special, la valori maxime mult mai reduse. Acest lucru este benefic pentru reducerea fenomenelor de injectie de sarcina, descarcari pariale si o degradare prematura a izolatiei jonctiunii. Aceasta concluzie sustine si cea de-a doua parte a Ipotezei H4, respectiv ca imbunatatirea designului jonctiunii (prin incorporarea unui strat de FGM) are un efect pozitiv atat asupra acumularii de sarcina spatiala, cat si asupra efectelor sale.

Capitolul 9. Concluzii generale. Contributii. Perspective

9.1. Concluzii

1. Analiza degradarii componentelor izolatiilor jonctiunilor de CC (XLPE, EPR, EPDM) arata ca, sub actiunea caldurii, moleculele acestora se fractureaza si/sau interactioneaza cu oxigenul conducand la aparitia unor produse secundari polari si/sau incarcati cu sarcini electrice; s-a aratat prezenta unui numar mai ridicat de produse reziduali pentru EPR si un numar mai ridicat de grupari oxidate pentru EPDM;
2. Valorile conductivitatii electrice scad cu durata de masurare si cresc cu intensitatea campului electric aplicat si cu temperatura de masura. Cresterea valorilor lui T si E_{app} conduce la cresterea conductivitatii electrice a tuturor esantioanelor, atat neimbatranite, cat si imbatranite (mai mult pentru EPR decat pentru EPDM sau XLPE);
3. Cresterea duratei de imbatranire a esantioanelor determina o crestere a valorilor conductivitatii electrice pentru toate esantioanele (mai mult pentru EPR decat EPDM);
4. Utilizarea relatiei empirice propuse in cadrul lucrarii pentru calculul conductivitatii electrice in functie de valorile lui T si E permite obtinerea unor valori ale conductivitatii electrice apropiate de cele determinate experimental;
5. Valorile permitivitatii scad cu durata de imbatranire pentru esantioanele de tip XLPE si EPDM si cresc pentru cele de tip EPR. Aceste variatii sunt, procentual, mult mai reduse decat acelea ale conductivitatii electrice;
6. Valorile duratei de relaxare (τ) a sarcinii electrice depind de natura esantioanelor, de starile acestora, de temperatura si intensitatea campului electric. Astfel, pentru esantioane plane neimbatranite supuse unui camp electric aplicat de 1 kV/mm timp de 3600 s, τ ia valori mai mari pentru XLPE (125 400 s) decat pentru EPDM (6310 s) sau EPR (4760 s), iar valorile acesteia scad cu durata de imbatranire: pentru XLPE de cca. 6 ori (pana la 22 000 s) si pentru EPR de cca. 3 ori (pana la 1590 s). Pentru toate esantioanele, valorile lui τ cresc cu cresterea temperaturii si / sau a campului electric aplicat;
7. In toate esantioanele analizate s-a separat sarcina spatiala volumica. Modul de repartitie a sarcinii spatiale volumice depinde de natura esantionului, de valoarea si modul de aplicare a tensiunii, de starea de imbatranire etc. Valorile cele mai mari ale densitatii de sarcina ρ_v se obtin in esantioanele de EPR, urmate de cele de EPDM si XLPE;
8. Cresterea tensiunii aplicate esantioanelor duce la cresterea valorilor lui ρ_v , cresterile cele mai mari obtinandu-se pentru EPR, urmate de EPDM si XLPE;
9. Cresterea duratei de imbatranire conduce, initial, la scaderea valorilor lui $\rho_{v,avg}$ pentru esantioanele plane XLPE si EPR (dupa primele 30 de zile), urmata de cresterea lui $\rho_{v,avg}$ (pana la finalul perioadei de imbatranire), si conduce la o crestere a lui $\rho_{v,avg}$ pentru esantioanele plane EPDM si cele plane bi-strat XLPE / EPR;
10. Densitatea de sarcina acumulata in esantioane depinde si de modul de fabricare a acestora. Pentru esantioanele cilindrice EPR / XLPE fabricate utilizand metoda de tripla-extrudare, $\rho_{v,avg}$ este mai redusa (0.15 C/m^3 pentru un camp electric aplicat de 10 kV/mm) decat in cazul esantioanelor plane EPR / XLPE (dar si plane de tipul EPDM / XLPE) fabricate prin presare (1.6 C/m^3 pentru un camp electric aplicat de 10 kV/mm);
11. Acumularea de sarcina spatiala conduce la intensificarea locala a campului electric in toate esantioanele. E devine, local, mai intens de pana la 4 ori in XLPE in cazul esantioanelor XLPE / EPR si de pana la 1.25 ori in XLPE in cazul esantioanelor XLPE / EPDM. Pentru esantioanele XLPE / EPR, cresterea lui $\rho_{v,avg}$ cu E_{app} (intre 5 si 15 kV/mm) de la 1.0 la 3.7 C/m^3 este corelata cu o crestere a valorii maxime a intensitatii campului electric in esantion de 3.75 ori (de la 20 la 75 kV/mm). Pentru esantioanele XLPE / EPDM, cresterea valorilor lui $\rho_{v,avg}$ de la 0.45 la 1.00 C/m^3 cu intensitatea campului electric aplicat (intre 5 si 15 kV/mm) este corelata cu o crestere de 1.85 ori (de la 19 la 35 kV/mm);

12. In cazul esantioanelor stratificate (plane si cilindrice), in afara sarcinii spatiale volumice, la interfetele dintre zonele omogene ale acestora se separa sarcina superficiala. Cu cat conductivitatea electrica a celei de-a doua componenta a esantioanelor (prima fiind XLPE) este mai ridicata, cu atat sarcina spatiala superficiala se acumuleaza mai rapid, iar valoarea maxima ($\rho_{s,max}$) este mai mare. Pentru un camp electric aplicat de 10 kV/mm, pentru esantioane neimbatranite de XLPE / EPR s-a obtinut $\rho_{s,max} = -3.5 \mu\text{C}/\text{m}^2$, iar pentru XLPE / EPDM s-a obtinut $\rho_{s,max} = -0.75 \mu\text{C}/\text{m}^2$;
13. Pentru temperaturi mai ridicate si camp electric mai intens, acumularea sarcinii spatiale superficiale se face mai rapid, iar densitatea acesteia ρ_s variaza cu T si E . Variatiile lui ρ_s cu temperatura sunt mai pronuntate decat variatiile cu intensitatea campului electric;
14. In prezenta tensiunii electrice, valorile lui E descresc in vecinitatea electrozilor si cresc in partile centrale ale esantioanelor. La anularea tensiunii, valorile lui E se reduc in timp, dar nu se anuleaza nici dupa o ora;
15. Incorporarea unui material FGM in jonctiunile de CC conduce la o acumulare mai reduisa de sarcina spatiala la interfetele intre straturile izolatoare din componenta jonctiunii si, in general, conduce la valori mai reduse ale intensitatii campului electric si, in special, la valori maxime mult mai reduse. Acest lucru este benefic pentru reducerea fenomenului de injectie de sarcina, de descarcari pariale si de o imbatranire prematura a straturilor izolatoare ale jonctiunii;
16. Materialele izolatoare utilizate pentru straturile izolatoare ale jonctiunilor de CC trebuie sa prezinte o valoare cat mai reduisa a sarcinii spatiale acumulate in exploatarea acestora. Pentru aceasta, trebuie imbunatatit gradul de puritate al materialelor de baza si a tehnologiei de fabricare si, desigur, trebuiesc folosite materiale care prezinta variatii mai mici ale lui ρ_v si, implicit, ale lui $\rho_{v,avg}$;
17. Din analiza tuturor rezultatelor privitoare la sarcina spatiala si calculul campului electric rezulta ca, intre EPR si EPDM, pentru realizarea jonctiunilor ar fi preferabil EPDM;
18. Ipotezele H1, H2, H3 si H4 au fost confirmate.

9.2. Contributii personale

1. Realizarea unor procedee de fabricare a esantioanelor plane de XLPE, EPR, EPDM, cat mai omogene si cu grosimi cat mai constante;
2. Realizarea unor procedee eficiente de fabricare a esantioanelor plane stratificate XLPE / EPR si XLPE / EPDM din esantioane plane uni-strat, cu suprafete si interfete de calitate superioara;
3. Determinarea grosimii interfetei esantioanelor neimbatranite stratificate XLPE / EPR prin microscopie SEM ($g \approx 0.5 \mu\text{m}$);
4. Realizarea unui studiu experimental (prin FTIR) privind efectele imbatranirii termice accelerate asupra esantioanelor de tip XLPE, EPR si EPDM;
5. Realizarea unui studiu experimental privind variatia conductivitatii si a permitivitatii electrice a esantioanelor plane XLPE, EPR, EPDM, XLPE / EPR si XLPE / EPDM cu tensiunea aplicata, temperatura de masurare si starea de imbatranire termica;
6. Realizarea unei celule de masurare a conductivitatii electrice pentru esantioane plane, capabila sa masoare conductivitatea electrica intr-o gama larga de temperaturi (20 – 90 °C) si tensiuni aplicate (0.1 – 30 kV);
7. Propunerea unei noi expresii empirice pentru calculul conductivitatii electrice, in functie de temperatura ($T = 30 - 70 \text{ }^\circ\text{C}$) si de intensitatea campului electric ($E = 1 - 30 \text{ kV/mm}$);
8. Realizarea unui studiu experimental privind variatia valorilor densitatii volumice de sarcina spatiala cu tensiunea aplicata si cu starea de imbatranire a esantioanelor, pentru esantioane plane XLPE, EPR, EPDM, XLPE / EPR si XLPE / EPDM, si cu tensiunea aplicata pentru esantioane cilindrice EPR / XLPE;

9. Imbunatatirea programelor de achizitie si de prelucrare a semnalului electric corespunzator determinarii densitatii de sarcina spatiala;
10. Realizarea unui studiu teoretic privind influenta tensiunii electrice si a temperaturii asupra densitatii de sarcina superficiala acumulata la interfetele esantioanelor plane si cilindrice;
11. Realizarea unui studiu teoretic privind influenta densitatii volumice si superficiale de sarcina asupra intensitatii campului electric pentru esantioane plane si cilindrice stratificate;
12. Realizarea unui studiu teoretic privind influenta stratului FGM si a cavitatiilor din straturile izolatoare asupra intensitatii campului electric si a sarcinii spatiale din jonctiuni;
13. Determinarea efectelor sarcinii spatiale (repartizata volumic si superficial) asupra repartitiei campului electric din izolatiile jonctiunilor si propunerea unor metode de reducere a sarcinii spatiale;

9.3. Perspective

1. Imbunatatirea procesului tehnologic de fabricare a esantioanelor si a jonctiunilor de CC in vederea reducerii sarcinii spatiale, reducerea concentratiilor de produsi tehnologici, impuritati, produsilor de degradare, etc.;
2. Studiul influentei stratului de tereftalat de polietilena (PET) utilizat la fabricarea esantioanelor asupra valorilor conductivitatii electrice si a densitatii de sarcina spatiala;
3. Studiul variatiei conductivitatii electrice cu temperatura de masura, tensiunea aplicata si cu starea de imbatranire pentru materialele utilizate in cadrul izolatiilor jonctiunilor, utilizand electrozi de natura semiconductoare;
4. Studiul variatiei permitivitatii relative la frecvente joase (aproape de CC) asupra acumularii de sarcina spatiala (in CC);
5. Studiul variatiei densitatii de sarcina spatiala cu temperatura de masura, tensiunea aplicata si starea de imbatranire pentru materialele utilizate in cadrul izolatiilor jonctiunilor, utilizand electrozi de natura semiconductoare;
6. Studiul acumularii de sarcina spatiala la temperaturi mai ridicate de 30 °C si, eventual, sub un gradient de temperatura;
7. Studiul efectelor imbatranirii multifactor (termic + electric + mecanic) asupra proprietatilor materialelor din cadrul izolatiilor jonctiunilor si asupra acumularii de sarcina spatiala;
8. Studiul influentei perioadei de depozitare (timpul dintre sfarsitul imbatranirii accelerate si masurare) a esantioanelor imbatranite asupra valorilor sarcinii spatiale;
9. Efectuarea unor teste de masurare a sarcinii spatiale pe jonctiuni reale cu izolatii XLPE / EPR si XLPE / EPDM pentru confirmarea rezultatelor obtinute pe esantioane plane si cilindrice;

Bibliografie

- [15] G. C. Montanari and P. Seri, "HVDC and UHVDC polymeric cables: Feasibility and material development", IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 35, no. 5, pp. 28–35, Sep. 2019
- [16] P. Bergelin et al., "640 kV extruded HVDC cable systems - NKT"
- [19] IEA, "World Energy Outlook 2017", last revision Dec 2019
- [30] G. Mazzanti et al., "The insulation of HVDC extruded cable system joints. Part 1: Review of materials, design and testing procedures", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 26, no. 3, pp. 964–972, 2019
- [34] M. Albertini et al., "Development and high temperature qualification of innovative 320 kV DC cable with superiorly stable insulation system", in 9th Inter. Conf. on Insulated Power Cables (Jicable), 2015, pp. 15–21
- [40] CIGRE Technical Brochure 177, "Accessories for HV cables with extruded insulation", 2001
- [46] G. Mazzanti and M. Marzotto, "Extruded cables for high-voltage direct-current transmission: Advances in research and development". IEEE Press, 2013
- [57] "IEEE Recommended Practice for Space Charge Measurements on High-Voltage Direct-Current Extruded Cables for Rated Voltages up to 550 kV", 1732, 2017
- [62] K. S. Suh et al., "Interfacial properties of XLPE/EPDM laminates", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 7, no. 2, pp. 216–221, Apr. 2000

- [73] G. Mazzanti and M. Marzinotto, "Advanced electro-thermal life and reliability model for high voltage cable systems including accessories", *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 33, no. 3, pp. 17–25, 2017
- [92] TE Connectivity, "Raychem High Voltage Cable Accessories up to 245 kV" [Online].
- [103] "A method of manufacturing a high-voltage DC cable joint, and a high-voltage DC cable joint", EP3034561A1, P. Meier et al., 2019
- [132] "Evaluation and qualification of electrical insulation systems", IEC 60505, 2011
- [172] C. Blivet et al., "Thermal oxidation of cross-linked PE and EPR used as insulation materials: Multi-scale correlation over a wide range of temperatures", *Polym. Test.*, vol. 93, Jan. 2021
- [174] Takashi Suenaga et al., "Effect of antioxidants on thermal degradation of EPDM and XLPE", in 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, 2008, pp. 294–298
- [200] M. Ieda, "Electrical Conduction and Carrier Traps in Polymeric Materials", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. EI-19, no. 3, pp. 162–178, Jun. 1984
- [231] IEEE, "IEEE Std 539-2005 IEEE Standard Definitions of Terms Relating to Corona and Field Effects of Overhead Power Lines", IEEE Std 539-2005 (Revision of IEEE Std 539-1990), 2005
- [246] R. Men et al., "Effect of thermal ageing on space charge in ethylene propylene rubber at DC voltage", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 26, no. 3, pp. 792–800, Jun. 2019
- [247] G. C. Montanari and L. Simoni, "Aging phenomenology and modeling", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 28, no. 5, pp. 755–776, 1993
- [252] G. Mazzanti et al., "A protocol for space charge measurements in full-size HVDC extruded cables", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, no. 1, pp. 21–34, Feb. 2015
- [261] G. C. Montanari, "The electrical degradation threshold of polyethylene investigated by space charge and conduction current measurements", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 7, no. 3, pp. 309–315, 2000
- [262] C. Stancu et al., "PN-II-RU-TE-2014-4-0280, Report 1: Manufacture of multi-layer joints planar models", 2015
- [265] J.-P. Crine et al., "Oxidation and thermal resistance of HMW-PE and XLPE HV", *Conf. Record of the 1998 IEEE Int. Symp. on El. Insul.*, pp. 219–224, 1998
- [268] G. Rizzo et al., "Review of the PEA Method for Space Charge Measurements on HVDC Cables and Mini-Cables", *Energies*, vol. 12, no. 18, p. 3512, Sep. 2019
- [272] J. C. M. Suarez et al., "Study of the effect of gamma irradiation on polyolefins-low-density polyethylene", *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 75, no. 1, pp. 143–151, Jan. 2002
- [273] J. P. Crine et al., "A Critical Evaluation of Analytical Techniques for the Characterization of Extruded Dielectric Cables", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 26, no. 1, pp. 131–139, 1991
- [274] Y. Liu and X. Wang, "Research on property variation of silicone rubber and EPDM rubber under interfacial multi-stresses", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 26, no. 6, pp. 2027–2035, Dec. 2019
- [275] I. Plesa et al., "Properties of Polymer Composites Used in High-Voltage Applications", *Polymers (Basel)*, vol. 8, no. 5, pp. 1–73, 2016
- [278] Y. Kemari et al., "Correlations between structural changes and dielectric behavior of thermally aged XLPE", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 26, no. 6, pp. 1859–1866, Dec. 2019
- [280] A. Sriraman et al., "Dielectric and Mechanical Behavior of Thermally Aged EPR/CPE Cable Materials", in *Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP*, 2018, pp. 598–601
- [281] R. M. Eichhorn, "A critical comparison of XLPE and EPR for use as electrical insulation on underground power cables", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. EI-16, no. 6, pp. 469–482, 1981
- [294] M. Abou-Dakka et al., "Space charge evolution in XLPE and EPR under high uniform electric fields", in *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 1998, vol. 1, pp. 136–139
- [295] R. Men et al., "Space charge properties of EPDM under different electric field and thermal ageing", in *10th International Conference on Insulated Power Cables*, 2019, pp. C4-3
- [300] "Method of forming a flexible joint with resistive field grading material for HVDC cables", US8578602B2, C. Thomas, 2013