

## CU PRIVIRE LA DEGRADABILITATEA ȘI DURABILITATEA IZOLAȚIILOR POLIMERE ALE ECHIPAMENTELOR ELECTRICE

Elena HELEREA<sup>1</sup>, Petru V. NOTINGHER<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universitatea Transilvania din Brașov

<sup>2</sup>Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București  
helerea@unitbv.ro<sup>1</sup>, petrunit@elmat.pub.ro<sup>2</sup>

**Rezumat.** Preocupările legate de îmbunătățirea calității izolației electrice au pus în evidență două aspectele legate de rezistența materialelor polimere la diferite solicitări: degradabilitatea – ca pierdere a capacității funcționale sub acțiunea solicitărilor și durabilitatea – ca aptitudine a materialului izolant de menținere a proprietăților funcționale timp îndelungat. În această lucrare sunt sistematizate eforturile depuse de oamenii de știință pentru a clarifica și rezolva incongruența dintre degradabilitate și durabilitate în cazul polimerilor utilizați ca izolanți electrice în cabluri și mașini electrice. Studiul bibliometric realizat pune în evidență succesul cercetărilor actuale privind îmbunătățirea duratei de viață a materialele polimere.

### 1. INTRODUCERE

Materialele polimere includ o gamă largă de substanțe, cu proprietăți, utilizări și costuri multiple, ale căror performanțe tehnice și economice au fost modelate de dinamica economică, politică, socială și culturală. Dezbaterile actuale sunt legate de tensiunile și divergențele privind rolul indispensabil al materialelor polimere în mai toate domeniile vieții socio-economice și impactul lor semnificativ asupra mediului. Argumentele PRO și CONTRA dezbătute subliniază atât nevoia dezvoltării de materiale polimere prietenoase cu mediul, cât și îmbunătățirea imaginii și percepției acestei categorii de materiale [1].

Utilizarea materialelor polimere ca izolanți în echipamentele electrice este un important argument PRO având în vedere rezistența acestor materiale la o mare varietate de solicitări și medii de lucru. Există, însă, două aspectele care, printr-o atentă calibrare, pot contribui la lărgirea ariei de utilizare a polimerilor ca izolanți în echipamentele electrice, și anume: degradabilitatea – ca măsură de pierdere a capacității funcționale sub acțiunea solicitărilor și durabilitatea – ca aptitudinea a materialului de menținere a proprietăților funcționale timp îndelungat [2]-[4]. Cercetările în acest domeniu încearcă să răspundă problemei de incongruență dintre degradabilitate și durabilitate: cum pot fi încetinite procesele de degradare a izolației polimere și cum poate fi îmbunătățită durabilitatea acestora, astfel încât să poată fi utilizate cât mai mult timp?

În această lucrare sunt analizate și sistematizarea cunoștințelor și realizărilor făcute de oamenii de știință și de tehnicieni pentru a clarifica și rezolva incongruența dintre degradabilitate și durabilitate în cazul materialelor polimere utilizate ca izolanți în echipamentele electrice, prin studii asupra duratei de viață ca indicator relevant.

Capitolele lucrării includ o analiză asupra dezvoltării izolanților electrice polimerici din ultimii 50 de ani, un studiu bibliometric referitor la cercetările actuale asupra îmbătrânirii și duratei de viață, o sistematizare asupra proceselor de degradare și îmbătrânire și asupra progreselor obținute în estimarea duratei de viață a materialelor polimerice.

### 2. EVOLUȚIA IZOLANȚILOR ELECTRICI ÎN ULTIMII 50 DE ANI

Denumirea de material polimer este un termen generic, care include clasele [5]:

- Polimeri naturali (biogenici), precum: celuloza, amidonul, proteinele, rășinile naturale, cauciucul natural;
- Polimeri semisintetici (biogenici modificați), precum: cauciucul natural vulcanizat, nitratul de celuloză (celuloid), acetatul de celuloză, cazeina-formaldehidă;
- Polimeri sintetici - clasele de materialele polimere termoplaste, termorigide, elastomeri;
- Biopolimeri, cum sunt: polimerii biotehnologici (produși enzimatici sau modificați genetic), polimerii biologici (în care materiile prime sau monomerii sunt de tip biogenetic sau biotehnic și apoi polimerizați sintetic, cum este polietilena biologică).

Introducerea polimerilor semisintetici și sintetici s-a produs pe măsura dezvoltării tehnologiilor de sinteză a polimerilor și a cunoașterii și identificării caracteristicilor electroizolante oferite de polimerii obținuți.

Astfel, până în anul 1900, izolațiile pentru echipamentele electrice au fost realizate utilizând polimeri naturali. Este aceasta etapa de identificare și de testare a capacității de izolat electric al materialelor polimere naturale și semisintetice, precum:

- Cauciuc vulcanizat - pentru mașini electrice, receptoare telefonice [6],
- Celuloidul (nitrat de celuloză) și acetat de celuloză - pentru pelicule electroizolante,
- Dielectrina (sulf + parafina) – izolație la generator cc, Dragomir Hurmuzescu (1894) [7],
- Galalit (cazeină cu formaldehidă) - ca izolat electric de joasă tensiune,
- Bachelita (grupa rășinilor fenolformaldehidice), Leo Baekeland (1907) [8].

Perioada 1900-1950 corespunde cu etapa de stabilire a principiilor de proiectare a sistemelor de izolație electrică, care avea ca obiectiv punerea de acord a matricei de proprietăți a materialului izolat cu matricea de cerințe funcționale ale echipamentului electric. Totuși mari progrese nu s-au obținut în această perioadă, având în vedere că nu au avut loc progrese în tehnologiile de obținere a polimerilor sintetici.

Anii 1950-1970 corespund cu perioada dezvoltării tehnologiilor de sinteză chimică, astfel că principalele clase de polimeri sintetici obținuți au ca principal domeniu de aplicații sistemele de izolație electrică pentru componente, cabluri electrice și mașini electrice: polietilena (LDPE, HDPE), polipropilenă (PP), polistiren (PS), policlorura de vinil (PVC), tereftalat de polietilenă (PET), policarbonați (PC) [9], [10].

În Fig. 1 este prezentată evoluția producției mondiale de materiale polimerice (în milioane de tone) în perioada 1955-2010, iar, o exemplificare a ponderii principalilor polimeri în ansamblul de materiale polimerice produse în anul 1992 este relevată în Fig. 2.

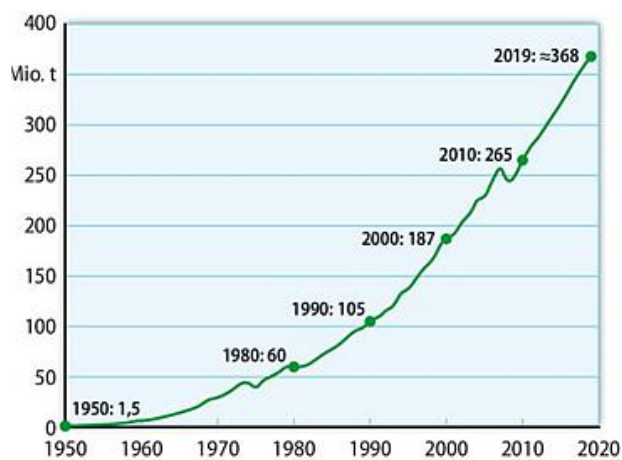


Fig. 1 – Producția globală de materiale plastice (în milioane de tone pe an) [Quelle: Plastics Europe].

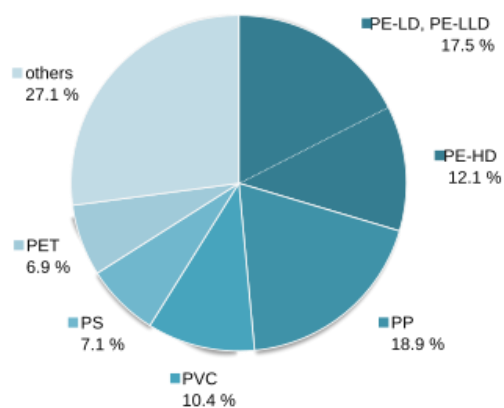


Fig. 2 – Pondereea producției mondiale de materiale polimerice în anul 1992.

Se constată o creștere exponențială a producției de materiale polimere, precum și diversificarea acestora. Pondere ridicată a producției de polietilena de joasă densitate (LDPE), a polietilena de înaltă densitate (HDPE) și a producției de polipropilenă (PP) este justificată de dezvoltarea și progresul în utilizarea acestor grupe de materiale pentru sistemele de izolație de înaltă tensiune din perioada 1963- 2013.

Pentru polietilenă s-a constatat existența unor probleme de mediu: potențiale dificultăți pentru gestionarea deșeurilor, procesul de biodegradare fiind dificil; pe altă parte, PE expusă la radiațiile solare ambientale produce urme de gaze cu efect de seră: gaz metan și etilenă. Mai mult, LDPE eliberează gaze cu cele mai mari rate [11]. Acesta a fost motivul că în multe aplicații polietilena (PE) a fost înlocuită cu polipropilena (PP) - polimer termoplastic, cu proprietățile electrice similare PE, dar cu temperaturi de funcționare echivalente mai mari față de PE (Tabelul 1).

*Tabelul 1*  
Stabilitatea termică pentru polietilenă (LDPE, HDPE, XLPE), polipropilenă (PP)  
și cauciuc etilen-propilenic (EPR)

| Caracteristici                                             | LDPE | HDPE | EPR | XLPE | PP   |
|------------------------------------------------------------|------|------|-----|------|------|
| Temperatura de funcționare normală [°C]                    | 70   | 80   | 90  | 90   | >110 |
| Temperatura de funcționare admisibilă scurt timp [°C]      | 80   | 90   | 105 | 105  | 130  |
| Temperatura de funcționare admisibilă de scurtcircuit [°C] | 150  | 180  | 230 | 230  | -    |

Odată cu diversificarea produselor electrotehnice, sunt introduse noi materiale polimere pentru izolații electrice. Se utilizează cauciucuri de etilen-propilenă (EPR), hârtii sintetice din PE, PP, PET, rășini fenolice, epoxidice, rășini poliesterice, poliester-imidice, siliconi.

Dar, funcționarea în exploatare a izolațiilor electrice a pus în evidență susceptibilitatea acestora la degradare. Polimerii sunt supuși degradării în toate etapele ciclului lor de viață. Încep cercetări și se dezvoltă tehnologii atât pentru inhibarea, cât și pentru promovarea degradabilității (îndeosebi, a biodegradabilității). Studii ample au pus în evidență efectul stabilizatorilor și al aditivilor biodegradabili [12]-[14].

Studiul bibliometric realizat de autori pune în evidență amploarea activității de cercetare în domeniul degradabilității și durabilității materialelor polimere folosite ca izolanti electrice.

### 3. STUDIU BIBLIOMETRIC

#### 3.1-Descrierea cercetării și rezultate

După mai multe căutări în diferite baze de date, studiul bibliometric realizat a fost restrâns la cazul izolației transformatoarelor de mare putere, pentru care s-a considerat că cercetările legate de degradabilitate și durabilitate pot fi identificate prin cuvinte cheie ca: îmbătrânire, îmbătrânire termică, durata de viață, conform metodologiei descrise în [15].

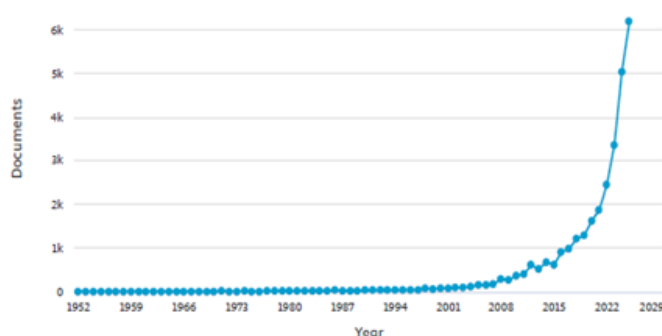
*Tabelul 2*  
Căutarea și regăsirea informației în baza de date SCOPUS – (1953-2024)

| Cazuri | Cuvinte cheie             | Documente publicate în 2024 |                       |             | Documente publicate în perioada (1950-2024) |            |
|--------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------|---------------------------------------------|------------|
|        |                           | Total                       | In IEEE on Insulation | In Energies | In reviste %                                | In conf. % |
| I      | “transformer” AND “aging” | 6210                        | 145                   | 92          | 59.7                                        | 27.9       |

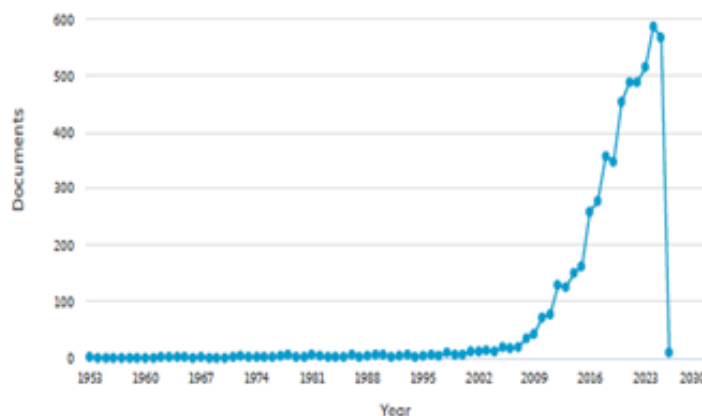
| Cazuri | Cuvinte cheie                         | Documente publicate în 2024 |                             |                | Documente publicate în perioada (1950-2024) |               |
|--------|---------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|---------------------------------------------|---------------|
|        |                                       | Total                       | In IEEE<br>on<br>Insulation | In<br>Energies | In reviste<br>%                             | In conf.<br>% |
| II     | “transformer” AND<br>“thermal ageing” | 574                         | 75                          | 24             | 64.0                                        | 30.1          |
| III    | “transformer” AND<br>“lifetime”       | 2410                        | 25                          | 58             | 60.8                                        | 25.8          |

S-a restrâns studiu la documentele existente în baza de date SCOPUS, care oferă soluții pertinente de căutare și regăsire a informației. Căutarea s-a realizat pentru trei cazuri de cuvinte cheie. Rezultatele obținute sunt prezentate în Tabelul 2 și Fig. 3 - 5.

Cazul I:  
”transformer” AND  
“aging”



Cazul II:  
“transformer” AND  
“thermal ageing



Case III: “power  
transformer” AND  
“lifetime”

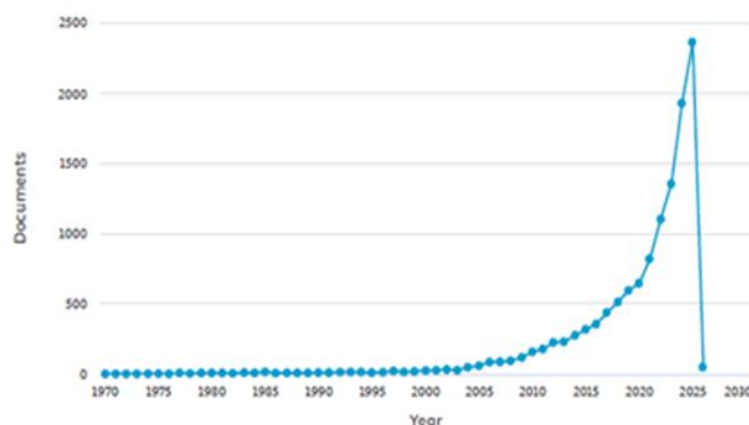
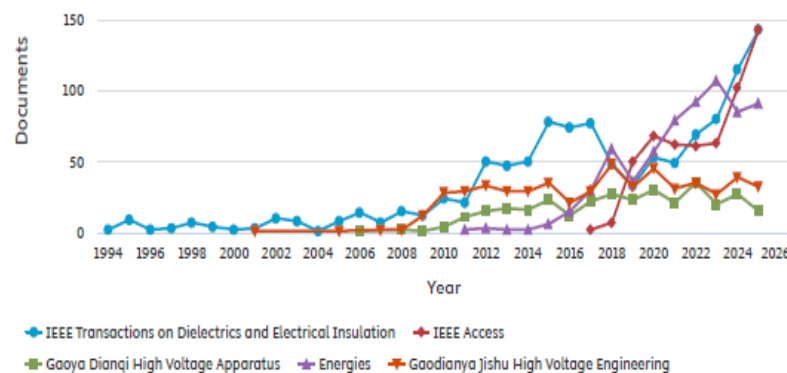
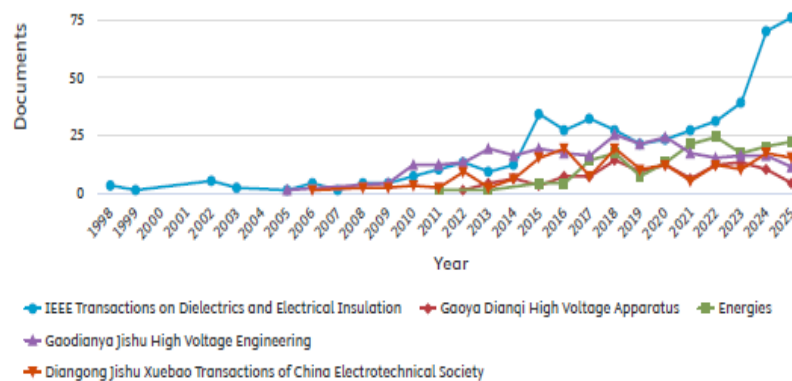


Fig. 3. – Număr total de documente publicate anual.

Cazul I:  
”transformer”  
AND ”aging”



Cazul II:  
”transformer”  
AND ”thermal  
ageing



Case III:  
”power  
transformer”  
AND ”lifetime”

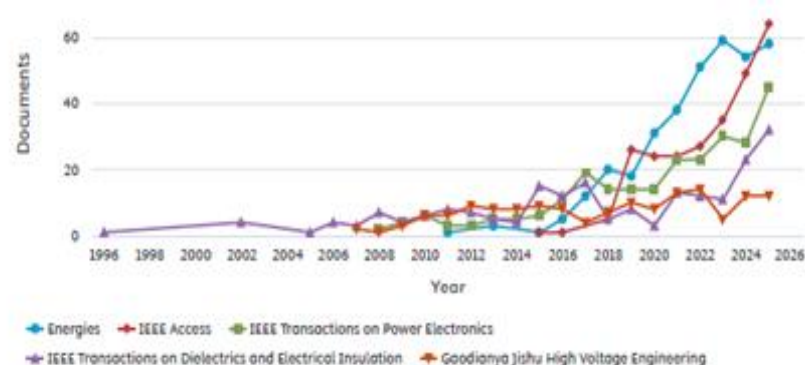
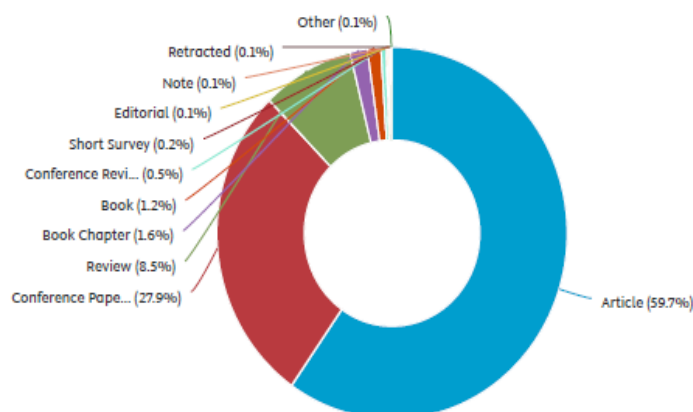
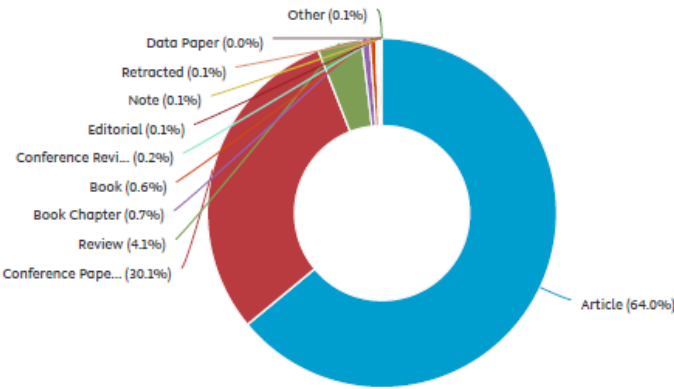


Fig. 4 – Număr de documente publicate anual după sursele de publicare.

Cazul I:  
”transformer” AND  
”aging”



Cazul II:  
“transformer” AND  
“thermal ageing



Case III: “power  
transformer” AND  
“lifetime”

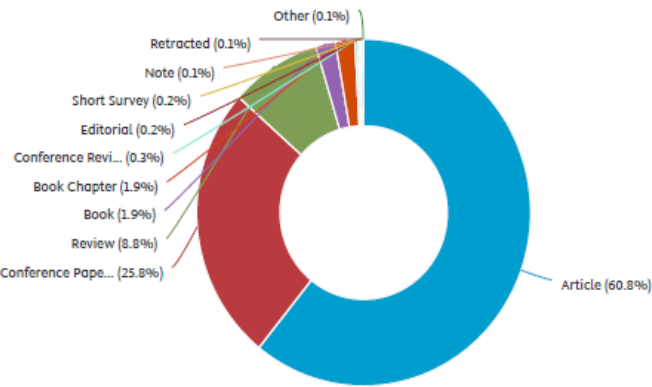
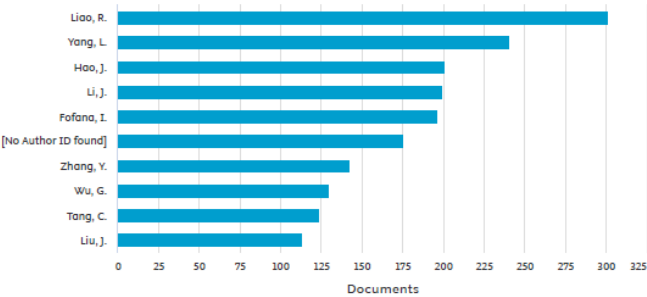
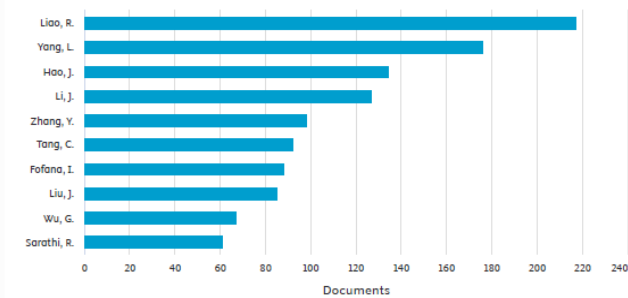


Fig. 5 – Documente publicate in perioada 1953-2024, după tipul documentului.

Cazul I:  
”transformer” AND  
“aging”



Cazul II:  
“transformer” AND  
“thermal ageing



Case III: “power transformer” AND “lifetime”

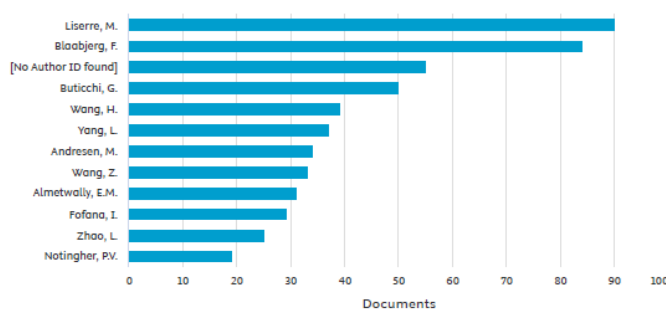


Fig. 6 – Autori cu numărul total de documente publicate în perioada 1953-2024.

### 3.2. Discuții

Informațiile prezentate în Fig. 3 și Tabelul 2 arată că temele de cercetare pentru înțelegerea proceselor de îmbătrânire a izolațiilor electrice și pentru dezvoltarea de metode de determinare a duratei de viață a izolațiilor electrice sunt încă de mare actualitate. În perioada analizată (1953-2024), peste 6000 de documente au fost elaborate și publicate abordând problema îmbătrânirii, respectiv, peste 2000 de documente tratează problema duratei de viață a izolațiilor electrice. Ponderea mai mică a cercetărilor în domeniul îmbătrânirii termice arată că se acordă atenție, din ce în ce mai mult, proceselor de îmbătrânire combinate, de tip electric-termic-radiativ etc.

Datele din Fig. 4 pun în evidență amploarea revistelor care diseminează rezultatele temelor abordate:

- Revista IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation abordează în special procesele de îmbătrânire, inclusiv îmbătrânirea termică;
- Revista IEEE Access a căpătat în perioada 2016-2024 o mare vizibilitate, în special în cazul temelor legate de durata de viață;
- Revista Energies abordează, printr-un număr tot mai mare de documente publicate, problematica îmbătrânirii și duratei de viață a materialelor polimere.

Tematica îmbătrânirii și a duratei de viață a izolațiilor electrice este frecvent abordată în revistele din Vhina Gaodianya Jishu High Voltage Engineering, Diangong Jishu Xuebao Transactions of China Electrotechnical Society.

După cum se observă în Fig. 5, în structura documentelor publicate ponderea mai mare o ocupă articolele publicate în reviste (îmbătrânirea cu 59,7 %, îmbătrânirea termică cu 64,0 % și durata de viață cu 60,8 %), urmat de articolele publicate în volumele conferințelor (îmbătrânirea cu 27,9 %, îmbătrânirea termică cu 30,1 % și durata de viață cu 25,8 %). Ponderile articolelor de tip review și a cărților sunt reduse, fapt care atestă că încă cercetarea este în faza de dezvoltare.

În Fig. 6 se pune în evidență eficiența cercetării în domeniul abordat: există autori care au un număr semnificativ de publicații, numele cărora se regăsesc în două sau toate cele trei teme abordate (exemplu, Fofana I.).

Merită subliniată performanța colectivului de cercetare din Laboratorul de Materiale Electrotehnice (ELMAT) din UNST Politehnica din București, condus de prof. Petru Nottingher, cu cele peste 20 de lucrări menționate (Fig. 6) în domeniul evaluării duratelor de viață ale izolațiilor polimere ale transformatoarelor de putere, precum și ale mașinilor electrice și cablurilor de energie [16]-[18].

## 4. SOLICITĂRI, EFECTE, DEGRADARE ȘI ÎMBĂTRÂNIRE

### 4.1. Solicitări și efectele lor asupra izolației polimere

Cerințele care stau la baza selectării materialelor polimere care intră în structura sistemelor de izolație a echipamentelor electrice sunt complexe, deseori cu caracter antagonist: să aibă proprietăți dielectrice, mecanice și termice adecvate, rezistența mare la agenți chimici, îmbătrânire lentă, durată de viață în serviciu mare, procesabilitate ușoară, cost redus. Selectarea este un proces complex, care necesită în primul rând cunoașterea modului cum se comportă materialul electroizolant la solicitările din funcționarea echipamentului electric.

Solicitățile la care sunt supuse sistemele de izolație a echipamentelor electrice (mașini electrice, transformatoare, întrerupătoare, cabluri etc.) pot fi grupate în patru mari categorii, descrise prin principalii factori de influență: electrici, mecanici, termici și de mediu (Fig. 7), care determină degradarea proprietăților materialelor electroizolante componente. Acestea pot fi permanente sau accidentale, independente sau combinate, constante sau variabile în timp, care pot acționa simultan sau consecutiv [19].

Solicitățile electrice sunt determinate de prezența și acțiunea tensiunilor de serviciu, de supratensiuni (de regim tranzitoriu) și frecvență, descărcări parțiale, conturnări electrice și căile de curent. Efectele solicitărilor electrice sunt: dezvoltarea de descărcări parțiale, arborescențe electrice, încărcarea cu sarcină electrică.

Solicitățile mecanice includ: vibrațiile și șocurile electrodinamice, vibrațiile și șocurile mecanice, îndoiri repetate, presiune, tensiuni de tracțiune/compresiune, torsionări. Efectele acestor solicitări sunt: apariția de tensiunile mecanice și termo-mecanice în timpul fabricației, transportului, instalării și, cel mai important, în timpul funcționării echipamentelor.

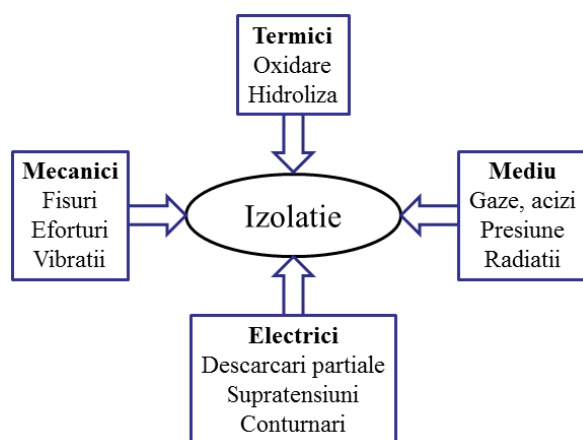


Fig. 7 – Factori de stres care determină degradarea și îmbătrânirea izolației.

Solicitățile termice sunt date de temperaturile maxime de lucru, temperaturi ambientale scăzute/ridicate, gradienti de temperatură, șocuri termice. Efectele solicitărilor termice sunt: modificări continue și progresive ale structurii chimice și fizice a izolațiilor, datorate reacțiilor de degradare chimică, polimerizării, depolimerizării, difuziei etc.; efecte termo-mecanice produse de forțele generate de procesele de dilatare și contracție.

Solicitățile de mediu sunt generate de prezența aerului, oxigen, hidrogen, azot, gaze inerte, SF<sub>6</sub>, poluarea industrială (NaCl, SO<sub>2</sub>), radiațiile ultraviolete și nucleare, solvenți, lubrifianți, apa, acizi, baze, praf semiconductor, praf și nisip, umiditate, termite. Efectele solicitărilor de mediu sunt multiple: mediul înconjurător poate intensifica degradările generate de factorii care apar în mod normal în timpul funcționării echipamentelor (câmp electric, solicitări mecanice).



Studiile și cercetările făcute pun în evidență modificările de compoziție, structură și proprietăți ale materialelor polimere electroizolante sub acțiunea unor factori de stres [20]-[25].

În [24] este evidențiată influența frecvenței tensiunii electrice și a temperaturii asupra permitivității electrice ( $\epsilon_r'$ ) pentru probe de polietilenă (PE) cu 10% SiO<sub>2</sub> utilizată pentru izolație la cablurile electrice (Fig. 8). În domeniul de frecvență ( $10^{-2} - 10^6$ ) Hz, permitivitatea dielectrică scade de la 3.5 la 2.2. Influența variației temperaturii, între (300-350) K, este de asemenea semnificativă

În [20] este prezentată influența temperaturii și a tensiunii electrice asupra factorului de pierderi ( $\tan \delta$ ) la probe de cauciuc siliconic – sticlă utilizat pentru izolarea conductoarelor electrice (Fig. 9). La temperatura de 20°C, pentru o variație a tensiunii de la 0.75 kV la 2.5 kV, factorul de pierderi crește de la  $0.1 \times 10^{-2}$  la  $3.8 \times 10^{-2}$ . Influența creșterii solicitării termice este semnificativă.

Influența temperaturii și plastifiantului asupra rezistivității de volum ( $\rho_v$ ) a unei izolații din PVC este prezentată în Fig. 10. Pentru o variație a temperaturii, de la -20°C la +100°C, rezistivitatea de volum scade de la  $10^{13} \Omega m$  la  $2 \times 10^7 \Omega m$ . Influența plastifiantului asupra valorilor rezistivității de volum este semnificativă.

Influența temperaturii asupra rigidității dielectrice ( $E_{br}$ ) a unor polimeri electroizolanți este prezentată în Fig. 11 [20]. Probele de PMMA, la temperaturi scăzute au rigiditatea dielectrică ridicată, de ordinul 1350 kV/mm, care la temperaturile de funcționare ca izolant electric, de (+50; +80)°C, scade la 800 kV/mm.

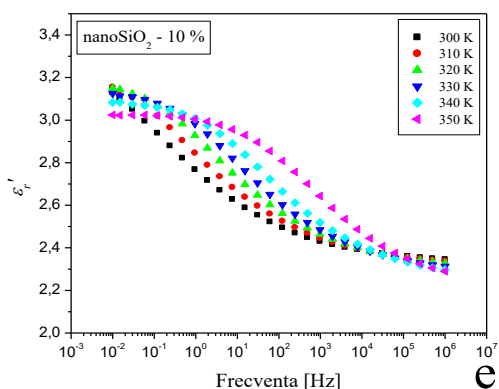


Fig. 8 – Variația permitivității electrice cu frecvența și temperatura pentru PE cu 10% SiO<sub>2</sub> [24].

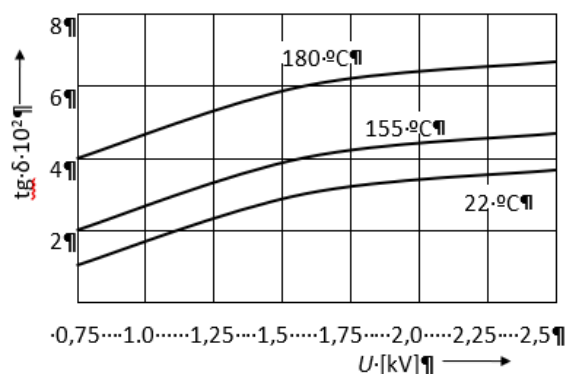


Fig. 9 – Variația factorului de pierderi cu tensiunea și temperatura pentru probe de cauciuc siliconic – sticlă [20].

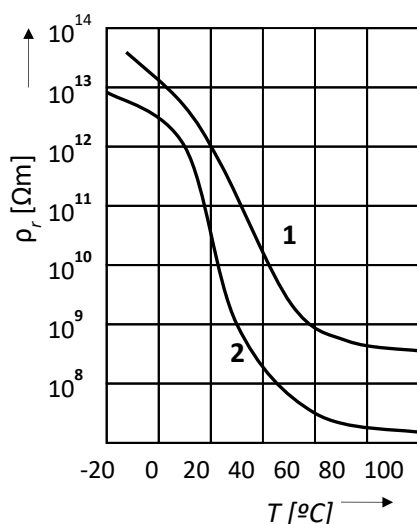


Fig. 10 – Variația rezistivității de volum  $\rho_v$  cu temperatura  $T$  pentru probe de PVC plastifiat cu dioctyl phthalate (1) și tricresyl phosphate (2) [20].

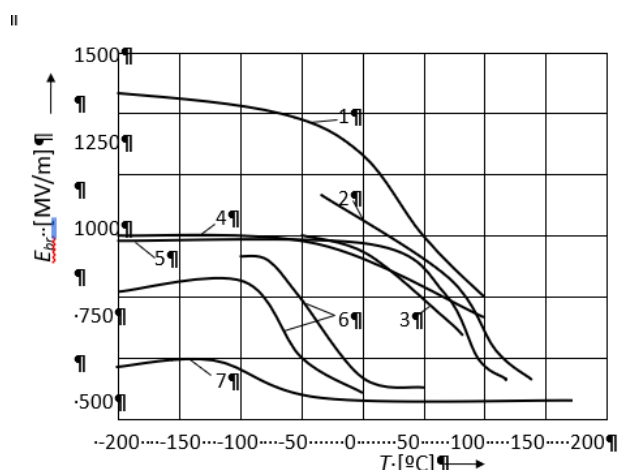


Fig. 11 – Variația rigidității dielectrice la polimeri electroizolanți cu temperatura: 1 – polimetil metacrilat (PMMA); 2 – rășină epoxidică; 3 – poliamidă; 4 – polistiren; 5 – polietilenă (PE); 6 – poliizobutilenă (PIB); 7 – cauciuc siliconic [20].

Polistirenul și polietilena au rigiditatea dielectrică aproape constantă, de 1000 kV/mm, pentru un domeniu larg de temperaturi (-200; +80) °C. Probele de cauciuc siliconic au valori scăzute pentru rigiditatea dielectrică, de ordinul 600 kV/mm, care se modifică puțin cu variația temperaturii.

#### 4.2. Degradare și îmbătrânire

Cercetările actuale [26]-[29] au adus noi contribuții asupra metodologiei de investigare a proprietăților materialelor polimere electroizolante, cu introducerea de noi nomenclaturi și indicatori în structura matricei de proprietăți pentru această clasă de materiale. Astfel, se face distincție între degradarea izolației și îmbătrânirea izolației electrice.

Degradarea izolației este setul de modificări structurale ireversibile care duc la pierderea proprietăților electrice și, potențial, la defectarea izolației.

Îmbătrânirea izolației este setul de modificări structurale ireversibile pe care le suferă izolația unui echipament electric, datorită acțiunii unuia sau mai multor factori de solicitare (influență), dar care nu duc la o deteriorare semnificativă a caracteristicilor acestuia (în limitele pentru care au fost selectate materialele constitutive pentru izolație).

O imagine asupra distincției dintre acești termeni este prezentată în Fig. 12, pentru cazul unui material polimer electroizolant supus la solicitare electrică, caracterizată prin anumite valori ale intensității câmpului electric  $E$  [26]

Intervalele de timp în care se inițiază și se manifestă mecanismele de străpungere, degradare și îmbătrânire în cazul solicitării electrice sunt diferite, în funcție de intensitatea și forma solicitării electrice:

- În câmpuri electrice înalte, cu valori ale intensității câmpului electric  $E$  de ( $10^2$ - $10^4$ ) MV/m, este posibil să se producă procesul de străpungere (electrică, termică, electromecanică, etc.), pentru care durata este mică, de ordinul ( $10^{-9}$ - $10^{-3}$ ) secunde;
- În câmpuri electrice de intensități mai mici, se pot iniția procese de descărcări parțiale (DP), cu formarea de arborescențe electrice și/sau arborescențe de apă, care contribuie la modificarea proprietăților de material și la declanșarea mecanismelor de îmbătrânire și/sau de degradare, conducând la apariția unei defectări a izolației și scoaterea din funcțiune a echipamentului electric. Timpul de apariție a defectării este diferit: de

ordinul ( $10^{-1}$  -  $10^8$ ) secunde în cazul mecanismelor de degradare electrică, de ordinul ( $10^7$  -  $10^{11}$ ) secunde în cazul mecanismelor de îmbătrânire electrică.

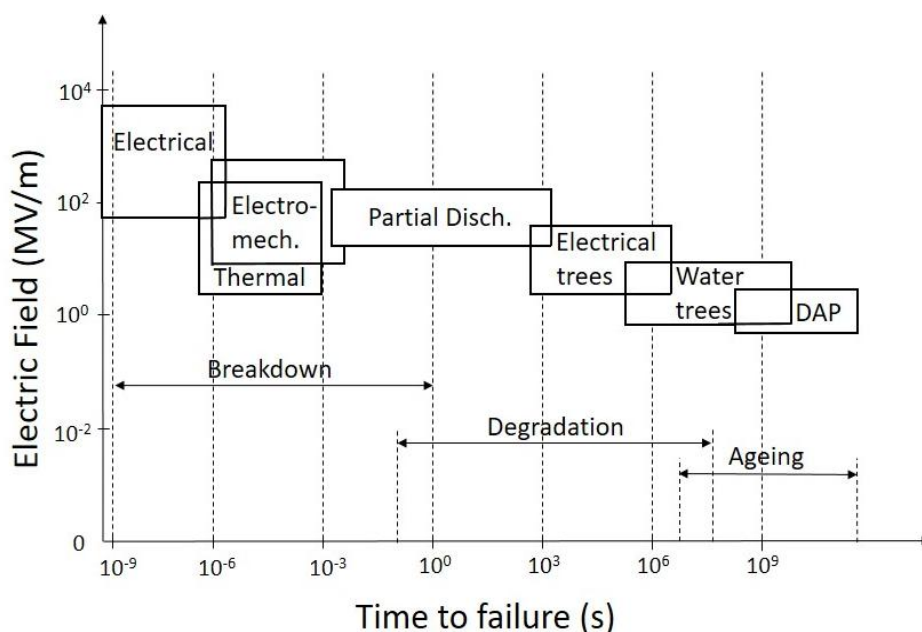


Fig. 12 – Relația între intensitatea câmpului electric și dependența de timp a proceselor de străpungere, degradare și îmbătrânire [26].

- În unele cazuri, aceste procese pot apărea simultan. De exemplu, pentru câmpuri electrice mici (2 - 3) MV/m, pot apărea atât îmbătrânirea, cât și degradarea izolației, iar pentru câmpuri electrice medii (10 MV/m), pot apărea degradarea și străpungerea electrică.

Îmbătrânirea este un proces fizico-chimic complex care are loc pe un interval de timp relativ lung sub influența factorilor de îmbătrânire asupra izolației, care determină modificarea uneia sau mai multor proprietăți ale izolației. În funcție de natura și magnitudinea acestor factori, în cadrul izolației are loc îmbătrânirea fizică, chimică, electrică și mecanică. Procesul de îmbătrânire are loc (cu o viteză relativ redusă) pe întreaga durată de viață estimată a unei izolații care funcționează într-un regim stabilit (nominal). Evident, aceasta îmbătrânire se manifesta prin înrăutățirea proprietăților electrice și mecanice ale izolațiilor, care contribuie la reducerea duratelor de viață și, în anumite cazuri, la defectarea acestora. De aceea, cunoașterea duratelor de viață estimate ale izolațiilor, și mai ales ale duratelor de viață estimate și rămase, este o problema crucială pentru toți producătorii și utilizatorii echipamentelor electrice.

## 5. PROGRESE ÎN ESTIMAREA DURATEI DE VIAȚĂ

### 5.1. Curbe de îmbătrânire și durata de viață

Procesele de îmbătrânire ale izolațiilor polimere sunt puse în evidență prin testări experimentale: sunt aplicați factori de stres constanți sau variabili în timp (continuu, pe termen scurt, intermitent, etc.) și, prin testări, se obțin curbele de îmbătrânire care descriu modul de variație în timp a unor parametri specifice  $p(t)$ , ca indicatori de îmbătrânire. De obicei, se consideră valorile raportate ale indicatorilor de îmbătrânire față de valoarea aceluiași indice în absența stresului, raportul  $\lambda(t) = p(t)/p_0$  este denumit factor de diagnostic.

Sub efectul solicitărilor operaționale, proprietățile izolației se modifică în funcție de natura lor chimică și structura fizică. În timp, ca urmare a proceselor de îmbătrânire și degradare, aceste caracteristici pot atinge valori critice la care izolația se deteriorează, iar echipamentele electrice sunt scoase din funcțiune.

Durata de viață este intervalul de timp în care, sub anumite solicitări (factori de stres), valoarea unei proprietăți, respectiv, factorul de diagnostic ( $\lambda$ ) se modifică până la o valoare limită numită criteriu de sfârșit de viață ( $\lambda_a$ ) până la care materialul polimer își mai îndeplinește funcția de izolanț în echipamentul respectiv [16].

În Fig. 13 sunt prezentate: curba de îmbătrânire termică ( $T$ ) și curba de îmbătrânire radiativă ( $R$ ), care descriu procesele de îmbătrânire sub acțiunea singulară a solicitărilor termice, respectiv, când factorul de stres singular este radiația ionizantă.

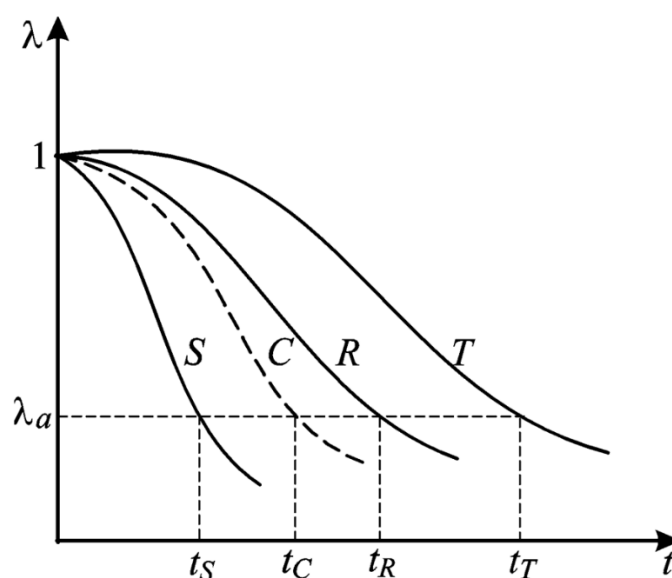


Fig. 13 – Curbe de îmbătrânire termică ( $T$ ), radiativă ( $R$ ), combinată ( $C$ ) și sinergică ( $S$ ).

Acțiunea simultană a celor doi factori (căldură și radiație) determină o accelerare a proceselor de îmbătrânire, reflectată în forma curbei de îmbătrânire combinată ( $C$ ).

În timpul aplicării simultane a factorilor de stres, este posibil să apară un efect sinergic, care constă în neaditivitatea efectelor factorilor de stres, cu amplificarea efectului rezultat al acțiunii simultane a factorilor de stres, astfel că degradarea/îmbătrânirea este mult mai rapidă, decât cea obținută prin simpla însumare (prin relații liniare) a efectelor corespunzătoare fiecărui factor de stres (Fig. 13, curba  $S$ ).

Figura 13 pune în evidență modul de stabilire a duratei de viață a materialului polimer. Pentru o anumită valoare a criteriului de sfârșit de viață  $\lambda_a$  considerată ca limita până la care materialul polimer își mai îndeplinește funcția de izolanț, rezultă duratele de viață  $t_T$ ,  $t_R$ ,  $t_C$ ,  $t_S$  corespunzătoare acțiunii separate (singulare) a căldurii (curba  $T$ ) sau a radiațiilor ionizante (curba  $R$ ), acțiunii simultane combinate celor doi factori (căldură și radiație, curba  $C$ ) și acțiunii sinergice (căldură și radiație, curba  $S$ ). Valoarea duratelor de viață depinde de modul de variație a curbelor de îmbătrânire  $\lambda(t)$  și de valoarea criteriului de sfârșit de viață  $\lambda_a$ .

Estimarea duratei de viață este de mare importanță în mentenanța echipamentelor electrice. Durata de viață depinde de felul solicitării (electrice, termice, mecanice, de radiație). De obicei se utilizează modele de îmbătrânire accelerată (uni-factor sau multi-factor). Considerații despre aceste modele sunt date în [16], [25], [30]-[32].

În absența sinergismului, durata de viață combinată (termică și radiativă)  $t_c$  corespunzătoare valorii criteriului de sfârșit de viață  $\lambda_a$ , se obține cu relația [20]:

$$\frac{1}{t_c} = \frac{1}{t_T} + \frac{1}{t_R} \quad (1)$$

Sub acțiunea simultană a mai multor factori de stres, durata de viață sub efectul combinat a celor  $N$  factori de stres este:

$$\frac{1}{t_c} = \frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} + \dots + \frac{1}{t_N} \quad (2)$$

Cu considerarea efectului sinergic, durata de viață sub efectul sinergic al celor  $N$  factori de stres este:

$$\frac{1}{t_s} = \frac{s_1}{t_1} + \frac{s_2}{t_2} + \dots + \frac{s_N}{t_N} \quad (3)$$

unde,  $s_1, s_2, \dots, s_N$  sunt coeficienții sinergici, stabiliți prin testări experimentale.

Estimarea duratelor de viață (notate de obicei cu  $L$ ) este de o importanță deosebită pentru determinarea mentenanței echipamentelor.

## 5.2. Modele de estimare a duratei de viață

Pentru estimarea duratei de viață s-au dezvoltat diferite modele, în funcție de tipurile de solicitări (electrice, termice, mecanice, radiații), majoritatea având la bază rezultatele obținute din testele de îmbătrânire accelerată (uni-factor, multi-factor).

### Modelul îmbătrânirii termice

Durata de viață  $L$  pentru un sistem de izolație îmbătrânit sub acțiunea temperaturii  $\Theta$ , corespunzătoare temperaturii absolute  $T$ , poate fi determinat cu considerarea unor relații exponențiale [31]:

- Legea Montsinger:

$$L(\theta) = A \cdot \exp(-m\theta) \quad (4)$$

- Legea Dakin:

$$L(T) = B \cdot \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \quad (5)$$

În aceste relații, coeficienții  $A$  și  $B$  sunt constante de material, care depind de condițiile de testare,  $m$  și  $E_a$  caracterizează energia de activare a reacției chimice dominante în procesul de îmbătrânire termică,  $\theta$  este temperatura măsurată în  $^{\circ}\text{C}$ ,  $T = \theta + 273.15$  este temperatura măsurată în  $\text{K}$ ,  $k$  este constanta lui Boltzmann.

### Modelul îmbătrânirii electrice

Durata de viață pentru sisteme de izolație îmbătrânite sub acțiunea câmpului electric de intensitate  $E$  se determină cu relații de tip invers putere sau exponențiale [16]:

- Legea invers putere:

$$L(E) = C_1 \cdot E^{-n} \quad (6)$$

- Legea exponențială:

$$L(E) = C_2 \cdot \exp(-gE) \quad (7)$$

În aceste relații, coeficienții  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $n$  și  $g$  sunt constante de material, depinzând de factorii de influență caracteristici solicitării electrice.

Prin logaritmarea relațiilor (4) - (7), se obțin relații liniare pentru durata de viață în cazul îmbătrânirii uni-stres termică și electrică. Aceasta permite o extrapolare facilă a duratei de viață

pentru condițiile de funcționare de regim nominal, față de situația obținută din testări de îmbătrânire accelerată.

### 5.3. Exemplificare - Dreapta duratei de viață termică

În cazul îmbătrânirii uni-stres, când factorul de influență este doar temperatura, prin logaritizarea relațiilor (4) și (5), relațiile Montsinger și Dakin iau forma:

$$\ln L_M = a_M - b_M \cdot \theta \quad (8)$$

$$\ln L_D = a_D - b_D \cdot 1/T \quad (9)$$

care sunt relații liniare în raport cu  $\theta$  (în legea Montsinger) și cu  $1/T$  (în legea Dakin). În aceste relații,  $L_M$  și  $L_D$  sunt duratele de viață Montsinger, respectiv, iar ceilalți coeficienți sunt:  $a_M = \ln C_3$ ,  $b_M = m$ ,  $a_D = \ln C_4$  și  $b_D = E_a/k$ .

Astfel, cunoscând parametrii ( $a_M$ ,  $a_D$  și  $b_M$ ,  $b_D$ ) al dreptelor duratei de viață termică se pot estima duratele de viață ale materialului polimeric corespunzătoare unor temperaturi constante de funcționare.

Determinarea dreptei duratei de viață termice a izolației implică realizarea de teste experimentale de îmbătrânire accelerată, în care se monitorizează variația unui indicator de îmbătrânire (proprietate electrică, mecanică sau chimică) în timpul îmbătrânirii termice la cel puțin 3 temperaturi ( $T_1 < T_2 < T_3$ ). Publicațiile IEC 60216-1 și IEC 60505 recomandă ca cea mai mică temperatură de testare, respectiv  $T_1$ , să fie cât mai apropiată de temperatura nominală de funcționare a izolației.

Metodologia de obținere a dreptei duratei de viață termice este descrisă în [16] Ca exemplu, în Fig.14 și 15 sunt prezentate curbele de îmbătrânire  $\lambda(t)$  corespunzătoare temperaturilor ( $T_1 < T_2 < T_3$ ) și modul de extrapolare pentru obținerea dreptei  $\ln L_D = f(1/T)$ .

Duratele de viață  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$  din Fig. 14, corespunzătoare fiecărei temperaturi de îmbătrânire  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ , rezultă din intersecția curbelor de îmbătrânire termică la temperaturi constante cu linia orizontală care specifică criteriul de sfârșit de viață ales ( $\lambda_a$ ).

Folosind modelul Dakin (9), se determină punctele  $D_1(1/T_1, \ln \tau_1)$ ,  $D_2(1/T_2, \ln \tau_2)$  și  $D_3(1/T_3, \ln \tau_3)$  care se folosesc în trasarea dreptei duratei de viață termică în coordonate semilogaritmice, de coordonatele  $1/T$  și  $\ln L_D$  (Fig. 15).

Astfel, în intervalul  $(1/T_1, 1/T_3)$  se poate stabili valoarea duratei de viață termice pentru o izolație electrică solicitată cu temperatură constantă, cu valori în intervalul  $(T_1, T_3)$ . O estimare a duratei de viață termice, cu o anumită probabilitate, se poate face și în afara acestui interval de temperatură.

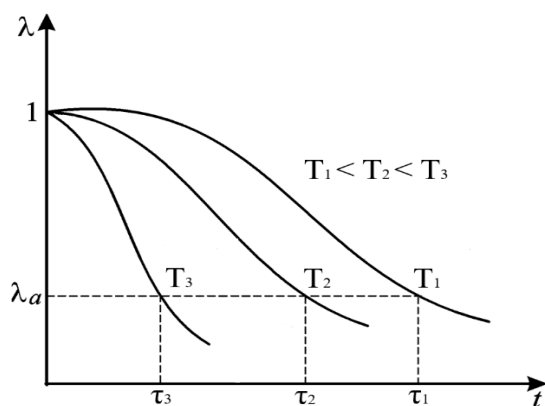


Fig. 14 - Curbele de îmbătrânire termică la trei temperaturi  $T_1 < T_2 < T_3$ .

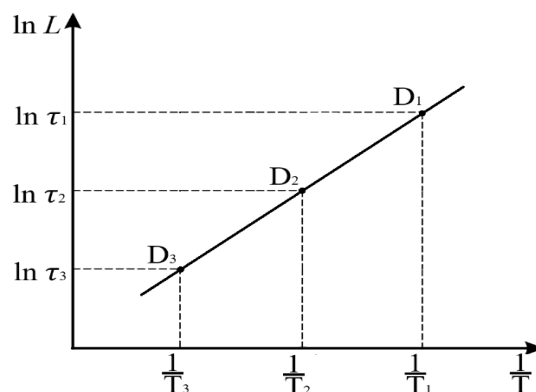


Fig. 15 - Trasarea dreptei duratei de viață termică  $\ln L (1/T)$ .

#### 5.4-Durate de viață termice consumate și rămase pentru funcționarea izolației la temperatură variabilă

În cazul izolației electrice care este solicitată cu o temperatură variabilă  $T(t)$  (respectiv,  $\theta(t)$ ), durata de viață consumată relativă  $L_{cr}$  pe un interval de timp ( $\Delta t$ ) se calculează folosind relațiile (10) și (11), corespunzătoare modelelor Montsinger și Dakin [31]:

$$L_{crM}(\Delta t) = \frac{1}{A_M} \cdot \int_0^{\Delta t} e^{b_M \theta} dt \quad (10)$$

$$L_{crD}(\Delta t) = \frac{1}{A_D} \int_0^{\Delta t} e^{-\frac{b_D}{T(t)}} dt \quad (11)$$

Durata de viață consumată  $L_{cD,M}(T, \theta)$  și durata de viață rămasă  $L_{rD,M}(T, \theta)$  se calculează cu relațiile:

$$L_{cD,M}(T, \theta) = L_{D,M}(T, \theta) \cdot L_{crM}(\Delta t) \quad (12)$$

$$L_{rD,M}(T, \theta) = L_{D,M}(T, \theta) - L_{crM}(\Delta t) \quad (13)$$

Astfel, cunoscând valorile parametrilor  $A_{M,D}$  și  $b_{M,D}$ , este posibil să se determine duratele de viață estimate, consumate și rămase ale izolațiilor, corespunzătoare funcționării la o temperatură cunoscută, constantă sau variabilă. Dacă parametrii duratei de viață a izolației nu sunt cunoscuți, aceștia pot fi determinați prin măsurarea valorilor anumitor indicatori de îmbătrânire a izolației.

#### 5.5-Durate de viață estimate pentru funcționarea izolației la solicitări multiple constante

Durata de viață  $L_e(T, E, M)$  estimată pentru funcționarea unei izolații polimere la solicitări multiple – termice, electrice și mecanice ( $T$ ,  $E$  și  $M$ ) - presupuse constante în timp se poate calcula cu relația:

$$L_e(T, E, M) = K(T, M) \cdot E^{-n(T, M)} \cdot M^{-m} \cdot \exp(b/T) \quad (14)$$

unde  $T$  – reprezintă temperatura,  $E$  - intensitatea câmpului electric,  $M$  - o solicitare mecanică,  $b = E_a/k$ ,  $E_a$  – energia de activare,  $k$  - constanta lui Boltzmann, iar  $K$ ,  $m$  și  $n$  - constante de material dependente, mai mult sau mai puțin, de  $T$  și  $M$ .

Valoarea duratei de viață estimate pentru solicitări nominale termice ( $T_0$ ), electrice ( $E_0$ ) și mecanice ( $M_0$ ), respectiv  $L_e(T_0, E_0, M_0) = L_{e0}$ , fiind:

$$L_e(T_0, E_0, M_0) = K(T_0, M_0) \cdot E_0^{-n(T_0, M_0)} \cdot M_0^{-m} \cdot \exp(b/T_0) \quad (15)$$

cu relațiile (14) și (15) rezultă :

$$L_e(T, E, M) = L_{e0} \frac{K(T, M)}{K(T_0, M_0)} \left( \frac{E}{E_0} \right)^{-n(T, S)} \left( \frac{M}{M_0} \right)^{-m} \exp \left[ b \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (16)$$

Valorile parametrilor  $E_a$ ,  $K$ ,  $m$  și  $n$  se determină prin încercări (accelerate) de laborator ale izolațiilor supuse la solicitări unifactor (electrice, termice și mecanice) sau multifactor (electrice+termice+meccanice).

Încercările efectuate de Srinivas și Ramu [17] arată că o creștere de temperatură și de solicitare mecanică determină o creștere a valorilor parametrilor  $K$  și  $n$ , iar valorile lui  $m$  se pot considera invariabile cu  $T$  și  $M$ . Pentru  $L_{e0}$  se considera valori în funcție de natura și

caracteristicile sistemului de izolație (20.000 h, 25 ani, 30 ani, 40 ani etc. [17]. Drept urmare, cunoscând valorile mărimilor  $E_a$  (respectiv,  $b$ ),  $K$ ,  $m$  și  $n$ , cu relația (16) se pot determina valorile duratei de viață estimate  $L_e$  pentru diferite valori ale solicitărilor electrice, termice și mecanice ale izolațiilor în exploatare, considerate constante în timp.

Dacă izolația funcționează la solicitări constante nominale ( $T_0$ ,  $E_0$ ,  $M_0$ ) pentru un interval de timp  $\Delta t$ , durata de viață consumată  $L_{c0}$  este:

$$L_{c0} = \Delta t \quad (17)$$

iar durata de viață rămasă  $L_{r0}$  este:

$$L_{r0} = L_{e0} - \Delta t. \quad (18)$$

Dacă solicitările diferă de cele nominale, dar rămân constante în timp, cu relația (16) se calculează durata de viață estimată  $L_e(T, E, M)$ , rezultând durata de viață consumată:

$$L_c(T, E, M) = \Delta t \quad (19)$$

și durata de viață rămasă:

$$L_r(T, E, M) = L_e(T, E, M) - \Delta t. \quad (20)$$

#### *5.6-Durate de viață consumate și rămase estimate pentru funcționarea izolației la solicitări multiple variabile în timp*

În cazul în care, în intervalul de funcționare  $\Delta t$ , temperatura, tensiunea aplicată (respectiv, intensitatea câmpului electric  $E$ ) și solicitarea mecanică nu sunt constante, mărimile  $T$ ,  $E$  și  $M$  sunt funcții de timp, respectiv  $T = T(t)$ ,  $E = E(t)$  și  $M = M(t)$ , funcții ale căror valori se determină experimental (prin măsurători on-line) și care se consideră cunoscute pentru calculul duratelor de viață consumate ( $L_c(E, S, T)$ ) și rămase ( $L_r(E, S, T)$ ) în intervalul de timp  $\Delta t$ . Pentru calculul mărimilor  $L_c$  și  $L_r$  în intervalul  $\Delta t$  se definesc duratele de viață consumate relative în unitatea de timp și în intervalul  $[0, \Delta t]$ .

a) Durata de viață consumată relativă  $L_{rc0}$  în unitatea de timp a izolației (uzura) aferentă funcționării izolației în condiții nominale este:

$$L_{rc0} = \frac{1}{L_{e0}} \quad (21)$$

b) Durata de viață consumată relativă  $L_{rc}(\Delta t)$  în intervalul  $[0, \Delta t]$  în cazul solicitărilor variabile raportate la solicitările de referință ( $T_r(t) = T(t)/T_0$ ,  $E_r(t) = E(t)/E_0$ ,  $M_r(t) = M(t)/M_0$ ) se calculează cu relațiile:

$$L_{rc}(\Delta t) = \frac{I(\Delta t)}{L_{e0}} \quad (22)$$

unde:

$$I(\Delta t) = \int_0^{\Delta t} f(t) dt \quad (23)$$

și:

$$f(t) = (E_r(t))^n \cdot (M_r(t))^m \cdot \exp \left[ -b \cdot \frac{T(t) - T_0}{T(t) \cdot T_0} \right] \quad (24)$$

Cum funcția  $f(t)$  nu este, în general, integrabilă, calculul integralei  $I(\Delta t)$  (relația (23)) se face printr-o metodă aproximativă. În acest sens intervalul de timp  $\Delta t$  se împarte în  $N$  subintervale egale de lățime  $\Delta t'$ , iar în fiecare subinterval  $i$  funcția  $f(t)$  este aproximată printr-un polinom de gradul I (Fig. 16) [18].



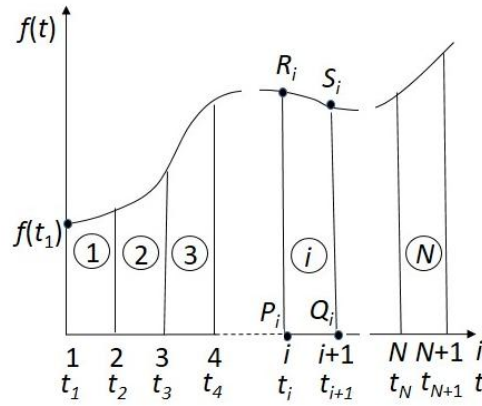


Fig. 16 – Referitor la calculul integralei  $I(\Delta t)$  [18].

Integrala  $I$  se calculează ca suma a ariilor celor  $N$  trapeze determinate de punctele  $P_i(t_i, 0)$ ,  $Q_i(t_{i+1}, 0)$ ,  $R_i(t_i, f(t_i))$  și  $S_i(t_{i+1}, f(t_{i+1}))$  (Fig. 16), respectiv:

$$I(\Delta t) = \sum_{i=1}^{i=N} I(i) \quad (25)$$

unde  $I(i) = (f(t_i) + f(t_{i+1})) \cdot \Delta t / 2$ .

Durata de viață consumată  $L_c(\Delta t)$  în intervalul  $[0, \Delta t]$  este:

$$L_c(\Delta t) = L_{e0} \cdot L_{rc}(\Delta t), \quad (26)$$

iar durata de viață rămasă ( $L_r(\Delta t)$ ) este:

$$L_r(\Delta t) = L_{e0}(E_0, S_0, T_0) - L_c(\Delta t). \quad (27)$$

Calculul duratelor de viață consumate și rămase pentru un cablu de energie izolat cu XLPE supus la solicitări electrice, termice și radiative ( $R_r$ ) cunoscute din măsurătorile efectuate în timpul funcționării acestuia sunt prezentate în [18] și [32]. Variația duratei de viață consumate în 24 h, pentru solicitările variabile alese este prezentată în figura 17.

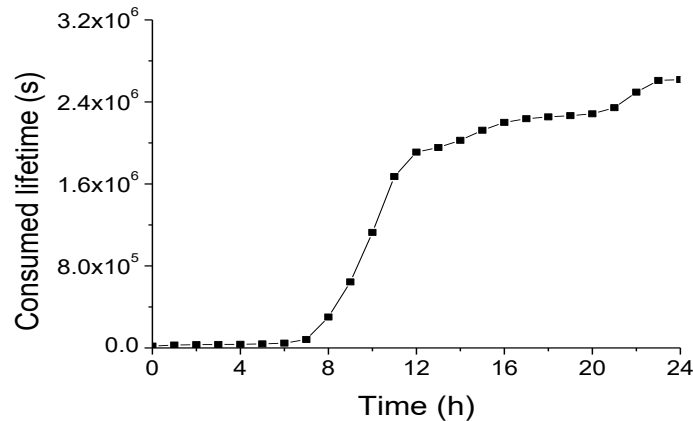


Fig. 17 – Variația în timp a duratei de viață consumate  $L_c$  în intervalul  $\Delta t = 24$  h pentru toate solicitările variabile  $E_r(t)$ ,  $R_r(t)$  și  $T(t)$ .

Se constată că cu creșterea duratei de funcționare (între 0 și 24 h), durata de viață consumată  $L_c$  crește (Fig. 17), iar durata de viață rămasă  $L_r$  se reduce. Astfel, după 24 h,  $L_c$  crește cu cca. 29,3 zile (față de  $\Delta t = 24$  h), iar  $L_r$  scade (față de  $L_{e0} = 40$  ani) cu 30,3 zile. Pentru un interval de timp de un an aceste valori se modifică de cca. 365 ori, ceea ce arată că utilizatorii

acestor sisteme de izolație trebuie să monitorizeze cu atenție variațiile solicitărilor izolațiilor și, în cazul atingerii valorilor duratei de viață estimate, să le scoată din funcțiune.

## 6. CONCLUZII

Materialele polimere, prin proprietățile și caracteristicile lor, joacă un rol esențial în industria electronică și electrică ca izolator electric și suport mecanic.

Studiul bibliometric realizat pune în evidență amploarea activității de cercetare în domeniul degradabilității și durabilității materialelor polimere folosite ca izolanți electrici. Este dezvoltată o analiză detaliată asupra proceselor de degradare și îmbătrânire a materialelor polimere, precum și asupra metodele de calcul al duratelor de viață estimate, consumate și ramase ale echipamentelor electrice cu izolații polimere utilizate în construcția mașinilor electrice, transformatoarelor și cablurilor de energie.

Cercetările actuale și viitoare se orientează spre studiul și explicarea comportamentului noilor materiale compozite la funcționarea pe termen lung. Pe baza acestor studii, se va putea face o estimare mai exactă a duratelor de viață consumate și ramase ale izolațiilor realizate din aceste noi materiale.

O cerință nouă pentru noile materialele polimere electroizolante, pe lângă durabilitate mare, este și posibilitatea reciclării materialelor la epuizarea duratei de viață. Studii noi, interdisciplinare, sunt urgente pentru a stabili strategii eficiente de implementare a modelelor ciclului de viață cu principiul celor 3 R: Reduce, Reutilizează, Reciclează. Sunt necesare studii aprofundate privind efectul nanoparticulelor asupra mediului ambiant și, mai ales, asupra sănătății personalului care lucrează, atât în unitățile de producție a echipamentelor electrice cu sisteme de izolație bazate pe nanocompozite, cât și în unitățile de întreținerea și reparare a acestora.

## CONFIRMARE

Lucrarea a fost prezentată la Simpozionul de Mașini Electrice SME'XXI, ediția 2025.

## BIBLIOGRAFIE

1. M.C. Celina, J.S. Wiggins (Edit.), *Polymeric Degradation and Performances*, American Chemical Society, Washington, DC, 2009.
2. P.V. Notingher, *Materiale electrotehnice*, 1, Politehnica Press, București, 2005.
3. L.M. Dumitran, *Sisteme de izolație electrică*, Editura Printech, București 2008.
4. E. Helerea, R. Țică, L. Dumitrescu, *Materiale electroconductoare, Materiale electroizolante – Interferențe cu mediul*, Editura Universității Transilvania din Brașov, 2003.
5. G. Lattermann, *Polymer Materials. On the Image of Plastics and their Responsible Use*, Kunststoffe, 5, pp. 14-16, 2020.
6. C. Zuidema, W. Kegerise, R. Fleming, M. Welker, S. Boggs, *A short history of rubber cables*, IEEE Electrical Insulation Magazine, 27, 4, pp. 45-50, 2011.
7. D. Hurmuzescu, *Sur un nouvel isolant, la diélectrine. Nouvel électroscope, nouveaux appareils électriques*, Bulletin de la Société Française de Physique, Paris, 19 Février 1894.
8. L. Baekeland, *Method of making insoluble products of phenol and formaldehyde*, US Patent, No. 942699, 1909.
9. C. Reed, *Advances in polymer dielectrics over the past 50 years*, IEEE Electrical Insulation Magazine, 29, 4, pp. 58-62, 2013.
10. Y. Ohki, *Attracted to Dielectric Materials Research*, IEEE Electrical Insulation Magazine, 40, 5, pp. 6-22, 2024.
11. R.J. Arhart, *The chemistry of ethylene propylene insulation. Part I*, IEEE Electrical Insulation Magazine, 9, 5, pp. 31-34, 1993.
12. G. Scott, *Oxidation and stabilization of polymers during processing*, In: Scot G (Ed), *Atmospheric Oxidation and Antioxidants*, Elsevier Science Publishers B.V., 1993.
13. B. Zhang, M. Ghassemi, Y. Zhang, *Insulation Materials and Systems for Power Electronics Modules: A Review Identifying Challenges and Future Research Needs*, IEEE Trans. on Dielectrics and El. Insulation, 28, 1, pp. 290-302, 2021.
14. T. Tanaka, *Multifunctional Quantum Dot Nanofillers in Polymer Nanocomposites*, IEEE Trans. on Dielectrics and El. Insulation, 32, 5, pp. 2631-2638, 2025.
15. O. Ellegaard, *The Application of Bibliometric Analysis: Disciplinary and User Aspects*, Scientometrics, 116, pp. 181–202, 2018.

16. P.V. Notingher, C. Stancu, S. Buşoi, G. Tănăsescu, *Determination of Lifetime Line Parameters for Power Transformer Insulation*, In: Electrotehnica, Electronica, Automatica (EEA), **66**, 4, pp. 59-65, 2018.
17. Al. Iacob, C. Stancu, P.V. Notingher, *Calculation of the Lifetime of Car Alternators*, 2024 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), Craiova, Romania, pp.1-7, 24-26 October 2024.
18. C. Stancu, M. Maftai, P.V. Notingher, *Lifetimes of Cable Insulations Subjected to Thermal and Radiation Stresses*, The International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), pp. 1-6, Bucureşti, România 9-11 October 2025.
19. \*\*\* IEC 60505, *Evaluation and Qualification of Electrical Insulation Systems*, 2011.
20. P.V. Notingher. *Materials for Electrotechnics. Structure. Properties*. (Vol. 1), Politehnica Press, Bucharest, Romania, pp. 350–403, 2004.
21. L. Mariut, E. Helerea, *Multiple stress life analysis on underground power cables from distribution networks*, Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems, Publisher: Springer Berlin Heidelberg, pp. 275-282, 2012.
22. J. Bartnikas, R. Bernstein, *Multi-stress ageing of extruded insulation systems for transmission cables*, IEEE Electrical Insulation Magazine, **9**, 1, pp. 15-17, 1993.
23. E.L. Branco, *An update on multifactor ageing*, IEEE Electrical Insulation Magazine, **14**, 5, pp. 22-24, 1998.
24. I. Pleşa, P.V. Notingher, C. Stancu, F. Wiesbrock, S. Schlögl, *Polyethylene Nanocomposites for Power Cable Insulations*, Polymers, **11**, 1, 24, pp. 1– 71, 2019.
25. I. Pleşa, P.V. Notingher, S. Schlögl, C. Stancu, A.J. Wanner, K. Wewerka, F. Wiesbrock, *Structural Model for the Estimation of the Equivalent Permittivity of Nanodielectrics based on Polyethylene and Epoxy Resins*, IEEE Access, **9**, pp.123927-123938, 2021.
26. P.V. Notingher, C. Stancu, I. Pleşa, *Failure mechanisms in XLPE cables*, In: Crosslinkable Polyethylene: Manufacture, Properties, Recycling, and Applications, Editors: T. Jince, T. Sabu, A. Zakiah, Publisher: Springer, Singapore, pp. 271-347, 2021.
27. N. Rouha, A. Beroual, *Improved Physicochemical Properties of Electrically Aged-Heat Treated Silicone Rubber*, IEEE Trans. on Dielectrics and El. insulation, **32**, 5, pp. 2543-2550, 2025.
28. Z. Li, S. Zhao, Y. Yin, B. Du, *Enhanced Thermo-Oxidative Aging Resistance of Polypropylene Cable Insulation by Grafting Dual-Functional Monomer*, IEEE Trans. on Dielectrics and El. Insulation, **32**, 5, pp. 2559-2567, 2025.
29. H. Ghorbani et al., *Long-term conductivity decrease of polyethylene and polypropylene insulation materials*, IEEE Trans. on Dielectrics and El. Insulation, **24**, 3, pp. 1485-1493, 2017
30. S.N. Zhurkov, V.A. Zakrevskyi, V.E. Korsukov, V.S. Kuksenko, *Mechanism of submicrocrack generation in stressed polymers*, Journal of Polymer Science, Part A-2: Polymer Physics, **10**, 8, pp. 1509-1520, 1972.
31. G.C. Montanari, G. Mazzanti, L. Simoni, *Progress in electrothermal life modeling of electrical insulation during the last decades*, IEEE Trans. on Dielectrics and El. Insulation, **9**, 5, pp. 730 – 745, 2002.
32. A.M. Maftai, C. Stancu, P.V. Notingher, *Calculation of the Lifetimes of Power Cables Polymeric Insulations*, U.P.B. Sci. Bull., Series C, **87**, 3, pp. 371-384, 2025.