

## Cap. 7. EVALUAREA DURATEI DE VIAȚĂ

---

### 7.1. Prezentarea sintetică a problematicei

### 7.2. Teorii ale duratei de viață

---

#### 7.1. Prezentarea sintetică a problematicei

Calitatea unui material electrotehnic în general este determinată, în principal, de nivelul proprietăților sale precum și de stabilitatea acestora în timp. În acest sens, se definește durabilitatea materialelor ca fiind capacitatea acestora de a face față solicitărilor funcționale și de mediu un anumit interval de timp.

Durabilitatea unui material este legată de procesele de degradare sau de îmbătrânire. Îmbătrânirea unui material este definită ca un proces de transformări ireversibile de natură fizică și chimică în urma cărora sunt înrăutățite anumite proprietăți sub limitele impuse.

Se pot distinge două tipuri de îmbătrâniri :

- îmbătrânire intranzitivă caracterizată prin modificarea diferitelor proprietăți la trecerea timpului;
- îmbătrânire tranzitivă caracterizată printr-o degradare rapidă la solicitări ce diferă de utilizarea normală.

Interesul pentru evaluarea procesului de îmbătrânire în exploatare este legat de evaluarea duratei în care un echipament își realizează funcția sau a duratei de viață referitoare la o anumită proprietate. Se definește durata de viață ca fiind intervalul de timp scurs de la începerea procesului de degradare până la stadiul limită considerat.

Evaluarea stării de îmbătrânire se poate realiza după diferite criterii cum ar fi  $\tan \delta$ ,  $E_{str}$ , duritatea, rezistența la rupere etc.

#### 7.2. Teorii ale duratei de viață

##### *Factori de stres*

Solicitățile la care sunt supuse materialele electroizolante în timpul funcționării pot fi :

- electrice;
- termice;
- mecanice.

Solicitățile de mediu pot fi :

- temperatura ambiantă;
- radiații luminoase;
- radiații ultraviolete;
- gaze din componența atmosferei;
- umiditatea;
- praf, nisip, praf semiconductor;
- agenți biologici;
- agenți chimici solizi, lichizi și gazoși.

În tabelul de mai jos sunt enumerați cei mai importanți factori de stres ce afectează durata de viață a materialelor electroizolante.

<b>Solicitări funcționale</b>	<b>Solicitări de mediu</b>
<i>Solicitări electrice</i>	<i>Gaze din componența atmosferei</i>
Tensiunea de serviciu	Oxigenul
Supratensiunea tranzitorie	Hidrogenul
Frecvența	Azotul
Descărcările parțiale	Gazele inerte
<i>Solicitări termice</i>	<i>Umiditatea</i>
Temperatura maximă	<i>Temperatura ambiantă</i>
Gradientul de temperatură	<i>Agenți chimici</i>
<i>Solicitări mecanice</i>	Industriali (acizi, baze, SF <sub>6</sub> , SO <sub>2</sub> , NaCl uleiuri, solvenți, etc)
Întindere	<i>Praf semiconductor</i>
Compresiune	<i>Praf și Nisip</i>
Îndoire	<i>Agenți biologici</i>
Răsucire	Ciuperci
Șoc	Rozătoare, termite
Vibrații	<i>Radiații luminoase</i>
Presiune	<i>Radiații ultraviolete</i>

## 2.2. Solicitări singulare și compuse

Solicitările sau factorii de stres pot acționa:

- simultan;
- succesiv.

Între factorii de stres pot apărea interacțiuni care sunt de tip:

- direct atunci când influența acestora este diferită dacă aceștia acționează simultan sau succesiv;
- indirect dacă influența lor rămâne neschimbată indiferent dacă aceștia acționează simultan sau succesiv.

Există o varietate de interacțiuni între factorii de stres de aceeași natură sau de naturi diferite. Spre exemplu, trebuie luată în considerație interacțiunea dintre efectele termice induse de câmpul electric și stresul termic impus din exterior.

În privința factorilor de stres de naturi diferite care acționează simultan, trebuie ținut seama de efectul de sinergism care amplifică degradarea materialului izolan mult mai mult decât în cazul aplicării succesive a solicitărilor.

### 2.3. Modele ale duratei de viață

Sub acțiunea prelungită a solicitărilor de diferite naturi, în materialele electroizolante se desfășoară procese fizico-chimice ireversibile care duc la degradarea lor.

Procesele de degradare a materialelor electroizolante sunt constituite din reacții de oxidare (din care rezultă produși acizi cu conductivitate electrică ridicată), reticulare care contribuie la diminuarea elasticității și plasticității, depolimerizare (care duc la micșorarea rezistenței mecanice precum și la apariția unor incluziuni gazoase). La acestea se adaugă contribuția proceselor de hidroliză, a reacțiilor de incompatibilitate între constituenți sau agresiunea solvenților.

Îmbătrânirea materialelor electroizolante este manifestarea macroscopică a desfășurării unor reacții chimice ireversibile cu anumite viteze.

La nivel microscopic, în cazul unui proces de degradare influențat numai de temperatură, pe baza teoriei cineticii reacțiilor chimice, se poate deduce expresia duratei de viață considerând o reacție simplă (monomoleculară) prin care din substanțele A' și B' rezultă substanța A'B'. Viteza de desfășurare a reacției chimice se definește ca fiind variația (scăderea) în timp a concentrațiilor A și B ale substanțelor A' și B' care este proporțională cu concentrațiile acestora :

$$v_{A,B} - \frac{dA}{dt} = -\frac{dB}{dt} = K \cdot A^{n_A} \cdot B^{n_B}$$

În această relație,  $n_A$  și  $n_B$  reprezintă ordinele parțiale ale reacției chimice, iar factorul  $K$ , numit constanta vitezei de reacție, reprezintă numărul reacțiilor din unitatea de timp și depinde de temperatură fie conform relației lui Arrhenius :

$$K = G \exp\left[-\frac{W_a}{RT}\right]$$

unde  $W_a$  reprezintă energia de activare,  $R=8314,3$  J/kmol·K,  $T$  este temperatura absolută, iar  $G$ , numit factor de șoc sau de frecvență, este legat de numărul de ciocniri dintre molecule în unitatea de timp și este proporțional cu  $T^{1/2}$ , fie conform relației lui Eyring :

$$K = \kappa \cdot T \cdot \exp\left[-\frac{W_F}{RT}\right]$$

în care  $W_F$  este energia liberă de reacție, iar  $\kappa$  este o constantă.

În cazul reacțiilor de ordinul întâi, care sunt cele mai frecvente reacții, alături de cele de ordinul al doilea, dacă reacționează între ele numai moleculele unei singure substanțe A', se obține :

$$\frac{1}{A} - \frac{1}{A_0} = K t$$

unde  $A_0$  reprezintă concentrația inițială a substanței A' (la  $t=0$ ).

Dacă se consideră un anumit criteriu de evaluare a stării de îmbătrânire, a cărei valoare  $P$  este dependentă de concentrația  $A$  prin relația  $A=f(P)$  și care are valoarea inițială  $P_0$  corespunzătoare concentrației  $A_0$ , durata reacției de degradare la temperatura  $T$  prin care concentrația se modifică de la  $A_0$  la  $A_r$  este dată de relația :

$$t = \frac{1}{G} \left[ \frac{1}{f(P_r)} - \frac{1}{f(P_0)} \right] \exp \left[ \frac{W_a}{RT} \right]$$

Deoarece valoarea  $P$  a criteriului de evaluare nu depinde decât de concentrația ce se modifică prin reacție, durata reacției se poate scrie sub forma generală :

$$t = a \exp \left[ \frac{b}{T} \right]$$

care sub forma :

$$\ln t = \ln a + \frac{b}{T}$$

poate fi reprezentată grafic sub forma unei drepte și are utilizare cvasi-generară.

Expresii mai complicate ale duratei de viață dar greu de utilizat, se obțin dacă se ia în considerație variația în timp a temperaturii  $T$  la care se află izolantul.

Pentru hârtia impregnată, folosită ca izolație de transformator, Montsinger a stabilit (în 1930) următoarea relație empirică a duratei de viață valabilă pe un interval mic de temperatură (90-110°C), prin determinări asupra rezistenței la tracțiune :

$$t = a \exp[-bT]$$

Analiza mai detaliată a rezultatelor experimentale privind influența temperaturii a relevat că, în relația lui Arrhenius, atât factorul de frecvență  $G$  cât și energia de activare  $W_a$  depind, de asemenea, de temperatură. Kossel a propus pentru constanta vitezei de reacție următoarea expresie :

$$K' = GT^m \exp \left[ -\frac{W'_a}{RT} \right]$$

de unde se poate determina relația dintre energiile de activare  $W'_a$  și  $W_a$  din relația lui Arrhenius :

$$W_a = mRT + W'_a$$

Deoarece în practică interesează evaluarea variației unor parametri macroscopici  $P$  de material, se iau în considerare numai efectele solicitărilor exterioare  $S$  de diferite intensități asupra degradării materialelor.

În general, se poate defini o *funcție de comportament* a sistemului material-solicitări de forma :

$$F(P, S, t) = 0$$

în care  $t$  constituie variabila timp.

La solicitare constantă, funcția respectivă :

$$F(P, t)_{S=ct} = 0$$

reprezintă geometric *curba de îmbătrânire* sau *degradare*, în timp ce, la parametru constant, funcția respectivă :

$$F(S, t)_{P=ct} = 0$$

reprezintă geometric *curba de duranță*.

Durata de viață  $L$  a unui material este intervalul de timp în care o mărime fizică de material  $P$ , numită indicator de degradare, variază sub acțiunea solicitării de intensitate  $S$  de la o valoare inițială  $P_0$ , ce caracterizează starea nedegradată, până la o valoare  $P_{cr}$ , numită criteriu de sfârșit de viață, pentru care se consideră că materialul nu mai satisface cerințele funcționale.

În practică, valoarea limită a indicatorului de degradare se fixează prin convenție. De exemplu, în cazul solicitării electrice, când interesează evoluția rigidității dielectrice, se consideră valoarea critică ca fiind jumătate din valoarea inițială a acesteia.

Curba duratei de viață este deci curba de duranță pentru cazul limită  $P = P_{cr}$ , adică :

$$F(S, L)_{P=P_{cr}} = 0$$

Pentru a deduce curba duratei de viață, teoretic se pornește de la funcția de comportament. Însă, în practică, se deduc experimental curbele de degradare.

Forma analitică generală a curbelor de degradare se obține de la ecuația propusă de Simoni:

$$\frac{dp}{dt} = -K(S) \cdot p^\alpha$$

în care  $\alpha \in \mathbb{R}$ ,  $K(S) = \text{ct.}$  pentru  $S = \text{ct.}$ , iar  $p(t)$  este valoarea normată a proprietății  $P(t)$ , adică :

$$p(t) = \frac{P(t)}{P_0}$$

Din rezolvarea ecuației lui Simoni, se obține expresia duratei de viață, având drept criteriu de sfârșit de viață valoarea  $p_{cr}$  :

$$L = -\frac{1 - p_{cr}^\alpha}{1 - \alpha} \cdot \frac{1}{K(S)} \quad \text{pentru } \alpha \neq 1$$

$$L = -\ln p_{cr} \cdot \frac{1}{K(S)} \quad \text{pentru } \alpha = 1$$

rezultând ca o primă concluzie că durata de viață este invers proporțională cu viteza de îmbătrânire  $K(S)$ .

Forma completă a expresiei duratei de viață se stabilește prin stabilirea valorii parametrului  $\alpha$  și a vitezei de îmbătrânire  $K(S)$  pe baza teoriilor fizico-chimice (cum ar fi cea de tip Arrhenius sau Eyring).

Dintre toate solicitările exercitate asupra materialelor electroizolante, cele mai importante solicitări sunt cea termică și cea electrică ca urmare a influenței lor asupra duratei de viață.

*Durata de viață termică* este prin definiție intervalul de timp  $L_T$  în care proprietatea  $p$ , numit indicator de viață termică, a atins valoarea limită  $p_{cr}$ , numit criteriu de sfârșit de viață, sub acțiunea solicitării termice la temperatură constantă.

Teoriile fenomenologice ale degradării termice iau în considerație transformări ireversibile care pot fi evidențiate prin modificări macroscopice de material în urma unor reacții chimice.

În cazul procesului de degradare termică, se utilizează expresii de tip Arrhenius, având forma generală:

$$L_T = L_{T_0} \exp(B/T)$$

în care  $L_T$  este durata de viață,  $L_{T_0}$  și  $B$  sunt constante de material, iar  $T$  este temperatura absolută.

Însă, cel mai utilizat model este modelul de stres unic propus de Dakin, utilizat la interpretarea datelor provenite din încercările accelerate :

$$L = a \exp(-bT)$$

unde  $a$  și  $b$  sunt constante. Se ține seama că, în anumite limite, poate fi utilizat principiul echivalenței durată-nivel solicitare :

$$K_i \cdot S_i \cdot t_i = ct$$

adică se poate înregistra același nivel de degradare la diferite intensități ale unei solicitări dar la intervale de timp diferite, ceea ce ar justifica încercările accelerate.

*Durata de viață electrică* este prin definiție intervalul de timp  $L_E$  în care proprietatea  $\rho$ , numit indicator de viață electrică, a atins valoarea limită  $\rho_{cr}$ , numit criteriu de sfârșit de viață, sub acțiunea solicitării electrice constante. Deoarece tensiunile mai mari decât cele nominale pot provoca străpungerea unui material electroizolant, implicit degradarea sa ireversibilă, mărimea ce caracterizează degradarea electrică este rigiditatea dielectrică, intensitatea câmpului electric fiind caracteristica solicitării electrice.

Datele experimentale arată că la majoritatea materialelor electroizolante se înscriu în legi de tip putere sau de tip exponențial.

Modelul puterii inverse furnizează o expresie a duratei de viață de forma:

$$L_E = L_{E0} \left( \frac{E}{E_s} \right)^{-n}$$

în care  $L_{E0}$  și  $n$  sunt constante de material,  $E$  este intensitatea câmpului electric ce solicită materialul, iar  $E_s$  este limita până la care este valabil modelul și până la care se poate calcula durata de viață.

Fundamentarea teoretică a legii de tip putere este legată de mecanismul descărcărilor parțiale dar și al procesului aleatoriu de străpungere electrică ce se încadrează în statistica Weibull.

O expresie mai simplă a duratei de viață este :

$$L_E = \frac{C}{E^n}$$

Expresia de tip exponențial este de forma :

$$L_E = C' \exp(-n' \cdot E)$$

în care  $C$ ,  $C'$ ,  $n$  și  $n'$  sunt constante care depind de material și condițiile de încercare. Constanta  $n$  se mai numește și exponent de viață sau coeficient de duranță.

Degradarea dielectricilor polimerici sub acțiunea descărcărilor parțiale respectă, de asemenea, o lege de tip putere de forma :

$$L_E = \frac{C''}{(E - E_0)^{n''}}$$

unde  $E_0$  este intensitatea câmpului electric de inițiere a descărcărilor parțiale, iar  $C''$  și  $n''$  sunt constante dependente de material și de condițiile de încercare.

*Efectul de synergism* apare în timpul utilizării unui material electroizolant, când factorii care determină îmbătrânirea, solicită materialul simultan câte doi sau mai mulți, iar efectul rezultat nu este pur cumulativ. Efectul de synergism constă deci în neaditivarea efectelor factorilor de stres.

În absența efectului de synergism, durata de viață, corespunzătoare unui anumit indice de îmbătrânire, se calculează cu relația :

$$\frac{1}{L} = \sum \frac{1}{L_i}$$

iar în cazul synergismului, cu relația :

$$\frac{1}{L} = \sum \frac{s_i}{L_i}$$

relație în care intervine indicele de synergism  $s_i$ .

Modelele de îmbătrânire multistres oferă relații analitice de tipul:

$$L = f(E, T)$$

între durata de viață  $L$  și factorii de stres (câmpul electric  $E$  și temperatura  $T$ ), stabilite pe baza unor teorii microscopice sau fenomenologice.

În cazul solicitărilor combinate, termică și electrică, expresiile duratei de viață conțin un factor de corecție a synergismului și sunt de forma :

$$L(T, E) = L_0 \left( \frac{E}{E_s} \right)^{-(n + \frac{s}{T})} \cdot \exp(B/T)$$

sau :

$$L(T, E) = L_0 \left( \frac{E}{E_s} \right)^{-(n - cT)} \cdot \exp(-bT)$$

Se poate constata că, la creșterea temperaturii, datorită factorilor de synergism  $s$  și  $c$ , se diminuează efectul solicitării electrice.

Observații experimentale arată că există unele materiale la care degradarea, sub acțiunea diferiților factori de stres, este neglijabilă la valori ale acestora sub anumite valori de prag.

Comportamentul izolanților la solicitări electrice le împarte în două categorii :

- materiale cu prag de câmp  $E_t$ , la care solicitarea sub prag nu influențează durata de viață;

- materiale la care durata de viață depinde de solicitarea electrică (considerându-se că există totuși un prag de valoare foarte scăzută).

Ca exemplu, rășinile termoplaste sunt materiale cu prag, în timp ce polietilena de joasă densitate este un material fără prag.

Materialele din prima categorie, au valori de prag  $E_t$  ale intensității câmpului electric până la care solicitarea electric nu mai are influență asupra duratei de viață. De asemenea, în cazul solicitării termice există valori de prag  $T_t$  ale temperaturii sub care durata de viață termică este practic nelimitată.

Diferitele modele ale materialelor cu prag furnizează expresii ale duratei de viață care conțin la numitor factori ce se anulează pentru solicitări la nivel de prag. Spre exemplu, pentru stresul electric, o expresie a duratei de viață este de forma :

$$L_{Et} = L_{E0t} \left( \frac{E}{E_s} \right)^{-n} \left( \frac{E - E_t}{E_s - E_t} \right)^{\mu_E}$$

Pentru stresul termic, expresia duratei de viață se exprimă în funcție de stresul termic convențional  $T_C$ , definit prin relația :

$$1/T_C = 1/T_0 - 1/T$$

în care  $T_0$  este o temperatură care poate fi cea a mediului sau cea mai mică valoare până la care modelul este valabil. Expresia duratei de viață termică, pentru materiale cu prag termic, este :

$$L_{Tt} = L_{T0t} \frac{\exp(-BT_C)}{\left( \frac{T_C}{T_{Ct}} - 1 \right)^{\mu_T}}$$

în care  $T_{Ct}$  este valoarea de prag a stresului termic convențional. Mărimile  $\mu_E$  și  $\mu_T$  sunt parametri care ajustează concordanța relațiilor respective cu datele experimentale. Prin anularea acestora, se poate trece la modelele materialelor fără prag.

Aceste expresii ale duratelor de viață nu sunt însă aplicabile solicitărilor electrică și termic sub valorile de prag, când  $L_{Et}$  și  $L_{Tt}$  trebuie să tindă spre infinit.

Pentru a nu modifica expresiile duratei de viață a materialelor cu prag solicitate electric sau termic, trebuie introduși la numitorul acestor relații factori  $F_{Et}$  sau  $F_{Tt}$  cu proprietatea:

$$F_{Et} = 0 \text{ pentru } E < E_t ; \quad F_{Et} = 1 \text{ pentru } E > E_t$$

$$F_{Tt} = 0 \text{ pentru } T < T_t ; \quad F_{Tt} = 1 \text{ pentru } T > T_t$$

Pentru extinderea valabilității expresiei duratei de viață la solicitare electrică, se propune introducerea unui factor  $F_{Et}$  de forma:

$$F_{Et} = \frac{1}{\exp\left(\frac{E_t - E}{K E_t}\right) + 1}$$



în care constanta  $K$  controlează rapiditatea saltului factorului  $F_{Et}$  între 0 și 1 într-un interval  $\Delta$ . Mărimea acestui interval poate fi aleasă procentual din valoarea lui  $E_t$ , ținând seama de gradul preciziei de determinare a valorii de prag. Cu  $K=1/500$ , rezultă intervalul  $\Delta$  ca fiind 2% din valoarea de prag.

Rezultă următoarea expresie generală a duratei de viață la solicitare electrică a materialelor cu prag:

$$L_{Et} = L_{E0t} \frac{\left(\frac{E}{E_s}\right)^{-n}}{\left(\frac{E - E_t}{E_s - E_t}\right)^{\mu_E}} \left[\exp\left(\frac{E_t - E}{K E_t}\right) + 1\right]$$

În mod similar, se poate extinde valabilitatea expresiei duratei de viață la solicitarea termică:

$$L_{Tt} = L_{T0t} \frac{\exp(-BT_c)}{\left(\frac{T_c}{T_{Ct}} - 1\right)^{\mu_T}} \left[\exp\left(\frac{T_{Ct} - T_c}{KT_{Ct}}\right) + 1\right]$$

Aceste relații generale de evaluare a duratei de viață pot fi utilizate în cazul solicitărilor singulare, care sunt cele mai importante din punct de vedere practic. În cazul solicitărilor combinate, electrică și termică, există mai multe expresii ale duratei de viață care generalizează relația generală pentru materiale electroizolante fără prag electric și termic. Dar nici aceste expresii ale duratei de viață nu sunt valabile sub valorile de prag. Deoarece în aceste relații cele două tipuri de solicitări nu au contribuție aditivă, este imposibil de a le generaliza sub valorile de prag prin procedeul aplicat la solicitările electrică sau termică singulară.

Expresiile duratelor de viață sunt, în general, relații complicate și neadecvate unei utilizări practice, operative, în condițiile în care, în general, interesează evaluarea efectului unui singur tip de solicitare variabilă. Aceste relații se utilizează întotdeauna ajustate pentru a se conforma datelor experimentale.

### 3. Metode de evaluare experimentală a duratei de viață

#### 3.1. Norme de evaluare

Evaluarea îmbătrânirii termice, pe plan mondial, se realizează prin standarde de degradare. În practică, interesează evaluarea duratei de viață la îmbătrânire accelerată. În acest caz, predicția duratei de viață la stres normal, se realizează printr-un model matematic de extrapolare a rezultatelor obținute la îmbătrânirea accelerată pornind de la modelul lui Dakin al duratei de viață :

$$L = a \exp(-bT)$$

care stă la baza mai multor standarde de evaluare (IEC 216, IEEE 275/81 etc).

În cazul îmbătrânirii electrice, se utilizează modelul puterii inverse în funcție de tensiunea aplicată  $U$  :

$$L = K \cdot U^{-n}$$

în care constantele  $K$  și  $n$  se determină în conformitate cu standardul IEEE 930/87.

În condiții de solicitare multistres, se utilizează expresia duratei de viață :

$$L = K \cdot U^{-n} \cdot \exp(-bT)$$

în care constantele  $K$ ,  $n$ ,  $b$  se determină în conformitate cu standardele IE 1064/91 și IEC 792.

Trebuie subliniat că testele de evaluare a duratei de viață pot fi distructive sau nedistructive.

### 3.2. Metode de măsură

În cazul degradării termice, metoda de determinare a duratei de viață constă în înregistrarea continuă sau la intervale regulate a valorii unei proprietăți alese drept indicator de viață termică atunci când materialul este menținut la o temperatură constantă.

În cazul degradării electrice, pentru evaluarea experimentală a duratei de viață, se utilizează, în principal, metoda solicitării la tensiune cu amplitudine constantă, prin care se determină timpul până la străpungere. Timpul mediu până la străpungere va fi funcție de intensitatea câmpului electric  $E$  aplicat și de condițiile de încercare. Modelul puterii inverse pare a fi cel mai practic pentru că este legat de statistica Weibull în care se încadrează procesul aleatoriu de străpungere și, prin intermediul căreia, se poate determina parametrul  $n$  pe baza unor încercări de scurtă durată.

### 3.3. Limite ale tehnicilor de evaluare a duratei de viață

Chiar dacă se poate prezice durata de viață prin metode standardizate, în condiții de laborator, rezultatele sunt mai mult sau mai puțin conforme cu realitatea deoarece condițiile simulate sunt depărtate de condițiile concrete de utilizare.

De asemenea, procedeele standard sunt discutabile datorită neechivalenței dintre solicitările accelerate și cele din timpul funcționării reale. Prin urmare, evaluarea cea mai sigură a degradării se poate realiza numai în timpul funcționării.

#### 5.1.1. Limite ale modelelor teoretice ale duratei de viață

Modelele de viață utilizate provin din două abordări :

- studiul teoretic și experimental al procesului de degradare;
- tratarea fenomenologică a procesului de degradare prin încadrarea rezultatelor obținute într-un anumit model.

În primul caz, există limite de înțelegere a mecanismelor de modificare a diferitelor proprietăți. Spre exemplu, se are în vedere ipoteza că solicitările mecanice induc procese chimice.

În al doilea caz, ce se încadrează în practica inginerescă, adevăratul model poate fi ascuns de dependența rezultatelor obținute de acuratețea tehnicii de măsurare.

Se apreciază că numai în cazul degradării termice, există acoperire teoretică, dar nu în totalitate, prin modelul Arrhenius.

În cazul degradării electrice, modelul puterii inverse a fost consacrat de încadrarea rezultatelor experimentale în statistica Weibull.

Dar se apreciază că și simulările statistice sau numerice pot conduce la concluzii eronate.

De asemenea, modelele de îmbătrânire multistres nu sunt acoperitoare în ce privește sinergia.

#### 5.1.2. Limite ale metodelor de evaluare experimentală

În stadiul actual al tehnicii, se consideră că procedeele standard privind evaluarea duratei de viață sunt imprecise.

Există de fapt două abordări practice :

- caracterizarea tuturor materialelor din componența unui agregat electrotehnic din punctul de vedere al duratei de viață;

- caracterizarea întregului agregat electrotehnic privitor la durata de viață.

La evaluarea duratei de viață, trebuie avut în vedere acțiunea complexă a diferiților factori de stres dintre care cei mai importanți se consideră solicitările electrică și termică. Nu trebuie însă neglijată importanța solicitării mecanice sub formă de vibrație precum și cea a radiațiilor ionizante în special asupra materialelor macromoleculare sintetice.

Se poate aprecia că în cazul echipamentelor de joasă tensiune stresul este în special de natură termică, în timp ce în cazul celor de înaltă tensiune domină factorii de stres de natură electrică și mecanică.