

Programul:	IDEI
Tipul proiectului:	Proiecte de cercetare exploratorie
Cod proiect:	ID_320

RAPORT

DENUMIREA PROIECTULUI:

SPECTROSCOPIA DIELECTRICA DE BANDA LARGA, CA METODA COMPARATIVA, NEDISTRUCTIVA SI NEINVAZIVA DE DETERMINARE A COMPUSILOR CU POTENTIAL DE RISC DIN PRODUSELE ALIMENTARE

2007

○ ***CUPRINSUL DESCRIERII STIINTIFICE SI TEHNICE***

1. INTRODUCERE IN METODOLOGIA ELEMENTULUI FINIT (FEM)

2. EXTINDEREA ALGORITMILOR PRIVIND SUPTUL FIZIC AL LEGATURII DINTRE STRUCTURA COMPOZITIEI ALIMENTARE SI DINAMICA SARCINII ELECTRICE SPATIALE IN BANDA LARGA DE FRECVENTA, IN CONTEXTUL APLICARII TEORIEI ELEMENTULUI FINIT

3. MODELAREA CALITATII PRODUSELOR ALIMENTARE PE BAZA PARAMETRILOR DERIVATI DIN ANALIZA SARCINII ELECTRICE SPATIALE; ELEMENTE DE ELECTRO-RHEOLOGIE BAZATE PE TEORIA ELEMENTULUI FINIT.

4. EXEMPLU DE MODELARE A CALITATII PRODUSELOR ALIMENTARE INCALZITE IN CONDITII DE MICROUND, BAZATA PE TEORIA ELEMENTULUI FINIT.

CONCLUZII PARTIALE

○ ***OBIECTIVELE ETAPEI / 2007***

- **Simularea si modelarea caracteristicilor dielectrice si electrorheologice ale produselor alimentare pe baza teoriei elementului finit.**

1. INTRODUCERE IN METODOLOGIA ELEMENTULUI FINIT (FEM)

Metoda elementului finit (FEM) este utilizata pentru a gasi solutiile aproximative a ecuatiilor cu diferente partiale (PDE) la fel ca si a ecuatiilor integrale, de exemplu ecuatia transferului de caldura. Abordarea solutiei este bazata de asemenea pe eliminarea completa a ecuatiilor diferentiale ori interpretarea PDE intr-o ecuatie diferentiale ordinara echivalenta care sa poata fi rezolvata utilizand tehnici standard cum ar fi diferentele finite.

In rezolvarea ecuatiilor cu diferente partiale, prima provocare o constituie crearea unei ecuatii care sa aproximeze ecuatia ce urmeaza a fi studiata, dar este numeric stabila, ceea ce inseamna ca erorile in datele de intrare si calculele intermediare sa nu se acumuleze si sa determine rezultate fara inteles. Sunt multe cai de realizare, toate cu avantaje si dezavantaje, insa metoda elementului finit poate rezolva cu succes ecuatii cu diferente partiale peste domenii complexe, cind domeniul se modifica ori cind precizia dorita variaza peste intreg domeniul. ***De exemplu in simularea dielectricelor, este mult mai important sa avem o predictie precisa in zonele de interes decit in zonele cu rol de sustinere, o cerinta care poate fi indeplinita cu ajutorul metodei elementului finit.***

Amestecurile omogene sunt în general caracterizate de o singură temperatură de tranziție sticloasă și cu proprietăți mecanice situate între cele ale componentilor, în strânsă legătură cu compoziția, fapt ce oferă posibilitatea obținerii unui spectru larg de produse cu proprietăți predictibile și bine definite.

Frecvent, polimerii sunt nemiscibili din punct de vedere termodinamic, ceea ce exclude obținerea unor produse cu adevărat omogene. Acest lucru este important, deoarece se formează o structură bifazică, interacțiunile dintre cele două faze la interfață determinând proprietățile materialului realizat. În acest caz situația de la interfața dintre cele două faze este foarte importantă. O tensiune interfacială mare și o slabă adeziune între faze, asociată cu vâscozitățile mari specifice compușilor macromoleculari duce la dificultăți în obținerea gradelor de dispersie dorite, instabilitate în prelucrare, separarea fazelor pe parcursul operațiilor ulterioare de prelucrare sau de utilizare. Adeziunea slabă între faze conduce pe de o parte la o comportare mecanică nesatisfăcătoare și pe de altă parte face imposibilă realizarea unei morfologii omogene bine structurată.

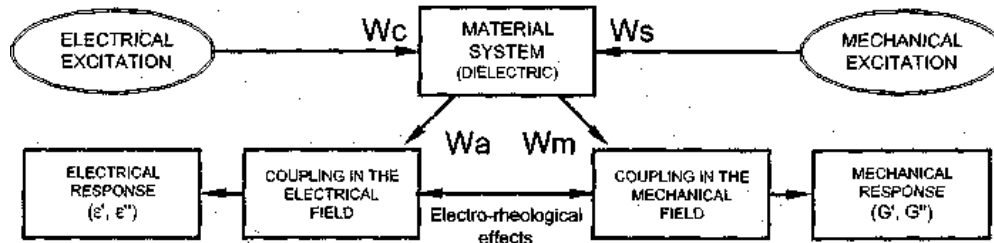
Reologia poate fi definita ca stiinta care se ocupa cu deformarea si curgerea materiei. Deformarea este un termen general care se refera la modificarea suprafetelor sau marimii unui material (corp deformabil, fluid, etc) atunci cand este aplicata o forta externa. Termenul de curgere este utilizat atunci cand deformatia este dependenta de timp.

Electro-reologia studiaza din punct de vedere mecanic si electric raspunsul materialului. Aceasta este relevanta in multe domenii cum ar fi izolatori lichizi si nanostructuri. Mai mult, in acest moment electro-reologia cunoaste o importanta crescanda in domeniul tehnologiei alimentare. Un punct cheie in domeniul ingineriei este prezicerea diferitelor raspunsuri a unui sistem dat (mecanic, electric, chimic etc.) intr-o stare predeterminata a unor excitatii externe. Mai mult, in multe cazuri de interes mai multe raspunsuri sunt suprapuse. De aceea, este necesar sa se dezvolte modele electro-reologice adecvate aplicatiilor ingineresti.

Noua descrierea electro-reologica pentru procese de transfer de energie in materialele dielectrice este bine adaptata scopurilor de analiza alimentara. Aceste abordari sunt diferite de cele clasice intalnite in teoria energiei libere a lui Helmholtz.

De obicei, materialele dielectrice sunt caracterizate prin raspunsul lor electric (permitivitate si conductivitate), la excitarile electrice (campurile E si D) si raspunsul lor mecanic (modulul elastic si „damping”) la excitarile mecanice („stress” si „strain”). Intr-un prim nivel de analiza acestea sunt adecvate deoarece raspunsul electric si respective mecanic pot fi considerate ca independente. De exemplu, proprietatile electrice sunt deseori considerate ca fiind independente de nivelul de „stress” si „strain” din materialul dielectric. Oricum, intr-o analiza

mai detaliata este necesar sa se ia in considerare cuplarea electro-reologica care descrie efectele excitarii electrice la raspunsul mecanic si efectele excitarii mecanice la raspunsul electric al dielectricului, ca in figura urmatoare, care prezinta o diagrama de fluz a interrelatiilor dintre excitariile electrice si mecanice si raspunsul lor.



In aplicatiile tehnologice este mai de interes modelarea fluxurilor de energie de la excitarea electrica (W_c) si excitarea mecanica (W_s) asupra raspunsului electric (W_a) si a raspunsului mecanic (W_m) incluzand cuplarea electro-reologica.

Modelul a fost dezvoltat luand in considerare conditiile de continuitate pentru fortele mecanice si electrice. In plus, materialul dielectric este considerat ca avand numai sarcini de polarizare, sarcinile de conductie fiind absente.

2. EXTINDEREA ALGORITMILOR PRIVIND SUPORTUL FIZIC AL LEGATURII DINTRE STRUCTURA COMPOZITIEI ALIMENTARE SI DINAMICA SARCINII ELECTRICE SPATIALE IN BANDA LARGA DE FRECVENTA, IN CONTEXTUL APLICARII TEORIEI ELEMENTULUI FINIT

În substanță, curentul electric apare ca urmare a aplicării unei tensiuni electrice sau ca efect al câmpului electromagnetic; particulele încărcate electric capătă o mișcare ordonată a cărei cauză este câmpul electric. Astfel, orice substanță poate conduce în măsură mai mare sau mai mică dacă conține particule electrice libere. Cantitativ procesul poate fi descris prin expresia forței și respectiv a densității de curent care ia naștere:

$$\vec{F} = q_e \vec{E}; \quad \vec{J} = Nq_e v_m \quad (1)$$

unde

v_m reprezintă viteza medie de deplasare a sarcinilor. Aplicând Legea lui Ohm generalizată se obține:

$$\sigma = \frac{Nq_e v_m}{E} = \frac{Nq_e^2}{m_e \Gamma}; \quad \mathbf{M} = \frac{v_m}{E}; \quad \sigma = Nq_e \mathbf{M} \quad (2)$$

unde

\mathbf{M} este mobilitatea sarcinilor electrice. Relațiile (2) sunt valabile pentru următoarele tipuri de conducție electrică :

a) conducție electronică (în metale și grafit, alți semiconductori, etc.): sarcinile electrice sunt constituite din electroni;

b) conducția ionică/electrolitică: sarcinile electrice sunt ioni, părți de atomi sau molecule, atomi sau grupuri de atomi având sarcină electrică;

c) conducție de tip molionic /electroforetic: purtătorii sunt constituiți în acest caz din grupuri de molecule (molionii).

Ultimele două tipuri de conducție sunt caracteristice unor dielectrici și lichidelor.

Așa cum am arătat, expresia conductivității electrice se poate calcula funcție de N , q_e , v_m , și E . Sarcina electronului și câmpul electric sunt valori cunoscute, iar N și v_m se pot calcula

conform principiilor enunțate în continuare. Astfel, numărul de electroni liberi în unitatea de volum este dat de relația:

$$N \cong \frac{(2m_e)^{3/2}}{3\pi^2\eta^3} (W_F - W_C)^{3/2}; T_F = \frac{W_F}{k} \quad (3)$$

unde avem următoarele semnificații ale mărimilor:

h - constanta lui Planck;

W_F - potențialul Fermi sau nivelul energetic cel mai înalt ocupat cu electroni la $T=0^0\text{K}$;

W_C - limita inferioară a benzii de conducție;

k - constanta lui Boltzmann;

T_F - temperatura Fermi a metalelor (deoarece T_F este de ordinul 10^4 ^0K se poate arăta că în domeniul temperaturilor ambiante $W_F \cong F$ unde F este potențialul chimic al materialului).

Se poate scrie deci:

$$N \cong \frac{(2m_e)^{3/2}}{3\pi^2h^3} (F - W_C)^{3/2} \quad (4)$$

În ceea ce privește viteza de deplasare medie, aceasta este chiar accelerația înmulțită cu timpul dintre ciocniri, adică:

$$v_m = \frac{q_e E}{m_e} \tau = \frac{q_e E}{m_e \Gamma} = \frac{q_e E}{m_e} \frac{\tilde{l}}{v_T} \quad (5)$$

Viteza unui electron este egală de fapt cu suma dintre viteza ordonată v_E și viteza de agitație termică v_T ; deoarece direcțiile vitezei de agitație sunt haotice și deci $v_T=0$, rezultă că viteza medie a electronului $v_m \equiv v_m = v_E$ ($v_T \gg v_E$; $v_T \approx 10^6$ m/s iar $v_E \approx 10^2$ m/s). Ținând seama de aceste considerații putem scrie $\tau = l/v_T$ unde l este drumul liber mijlociu al electronului. Dacă facem o aproximație foarte largă și admitem că ciocnirile electronilor se produc asemănător cu cele ale moleculelor de gaz, atunci prin folosirea relației $\tilde{l} = \sqrt{2}(N_0\pi r^2)^{-1}$ în care N_0 este numărul de atomi pe unitatea de volum al materialului iar r este raza activă a unui atom, se obține:

$$\tilde{l} = \frac{\chi}{3\sqrt{2}N_0\pi kT}; \quad \tilde{r}^2 = \frac{3kT}{\chi} \quad \text{si} \quad \chi \cong 20 \left[\frac{N}{m} \right] \quad (6)$$

Din (32) și (35) și apoi ținând seama de (36) se obține succesiv:

$$\sigma = \frac{Nq_e^2}{m_e} \frac{\tilde{l}}{v_T}; \quad \sigma = \frac{Nq_e^2 \chi}{3\sqrt{2}\pi N_0 v_T m_e kT} = \frac{const.}{T} \quad (7)$$

deoarece v_T nu depinde practic de T la temperaturi uzuale. În continuare sunt tabelate câteva date pe baza cărora se poate calcula conductivitatea metalelor:

	σ [$\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$]	$\Gamma^{-1} \equiv \tau$ [s]	N [m^{-3}]	l [\AA]	W_F [eV]	$T_F \times 10^4$ [K]	v_T	$v_E \equiv v_m$
Cu	$\cong 6 \times 10^7$	$2,7 \times 10^{-14}$	$8,5 \times 10^{28}$	420	$\cong 7$	8,1	$1,6 \times 10^6$	
Ag	$\cong 6,8 \times 10^7$	$4,1 \times 10^{-14}$	$5,8 \times 10^{28}$	570	$\cong 5,5$	6,4	$1,4 \times 10^6$	6,5 mm/s

Folosind prima relație s-a calculat $\sigma_{Cu} = 6,27 \times 10^7 \Omega^{-1} m^{-1}$ și $\sigma_{Ag} = 6,63 \times 10^7 \Omega^{-1} m^{-1}$, valori aproximativ corecte. Relațiile (2) și (7) se pot demonstra conform principiilor Fizicii statistice.

Așadar, fenomenele care au loc în mediile materiale la interacțiunea cu radiația electromagnetică își au explicația în structura microscopică (ionică, electronică, moleculară) modelată cu ajutorul oscilatorului electric de ordinul doi. Astfel, parametrii macroscopici ϵ , μ , σ au un corespondent direct în teoria microscopică (clasică sau cuantică):

ELECTRONI LIBERI \leftrightarrow curent electric $\leftrightarrow \sigma$

ELECTRONI LEGAȚI \leftrightarrow polarizare electrică $\leftrightarrow \epsilon$

ELECTRONI ORBITALI \leftrightarrow magnetism $\leftrightarrow \mu$

În acest capitol s-a făcut abstracție de μ pentru simplificarea demonstrațiilor, dar modul de calcul și expresiile obținute sunt analoge cu acelea pentru ϵ . Luând în considerație numai parametrii ϵ și σ se constată că *diferența dintre dielectrici și conductori se reflectă numai în neglijarea termenului k_x al ecuației generale; de fapt în ambele situații pot avea loc "rezonanțe" (relativ la sarcini legate și respectiv libere)*. Ceea ce face ca în mod obișnuit să nu se țină seama de rezonanțele electronilor liberi - situație în care $\sigma(\omega)$ poate deveni complex sau chiar imaginar, - este faptul că aceste fenomene apar la frecvențe foarte mari, în afara domeniilor de interes pentru electrotehnică ($\omega \gg \Gamma \cong 10^{13}$ Hz). O exemplificare practică în legătură cu ϵ și σ este "recepționarea" radiației termice pentru două corpuri diferite: dielectric și conductor. Conductorul se încălzește mult mai puternic sub influența radiației electromagnetice datorită faptului că electronii liberi pot oscila într-o gamă de frecvențe mult mai extinsă în raport cu dielectricul care prezintă absorbție/ disipare de energie termică doar în zona rezonanțelor dielectrice. Expresia cea mai generală a termenului liber al unei ecuații analoge ecuației (1), adică forța care acționează asupra unei sarcini electrice q , într-un mediu izotrop este:

$$\bar{F} = q\bar{E} + q\frac{\bar{v}_1}{v}(\bar{n} \times \bar{E}) \quad \text{sau} \quad \bar{F} = q\bar{E} + q\bar{v}_1 \times \bar{B} \quad (10)$$

unde

v_1 este viteza sarcinii q , v este viteza de fază a unei electromagnetice și n este versorul pe direcția propagării. Deoarece $v_1 \ll v$, al doilea termen al expresiei (10) care reprezintă *forța lui Lorentz* este mic în raport cu primul. Rezultă că forța care acționează asupra sarcinii depinde în principal de vectorul câmp electric E numit vector luminos în cazul undelor plane și al mediilor cu $\mu_r \cong 1$.

Din punct de vedere fenomenologic principalele efecte ale impactului radiației electromagnetice cu substanța sunt:

1. REFLEXIA = la suprafața de separație a două medii, o fracțiune din radiația incidentă se întoarce în primul mediu (cu parametrii caracteristici - amplitudine, fază, eventual polarizare - modifi cați);

2. REFRAȚIA = la suprafața de separație a două medii, radiația transmisă în al doilea mediu se propagă, în cazul cel mai general, cu amplitudine, viteză și direcție modificate (modificări exprimate prin indicele de refracție n);

3. DISPERSIA = fenomenul dependenței indicelui de refracție n de frecvența radiației (dependența parametrilor macroscopici ϵ , σ , μ de frecvență);

4. DIFUZIA = fenomenul de transformare a radiației electromagnetice în substanță (medii neomogene) prin variația direcției de propagare, numit și împrăștiere, care se manifestă printr-o luminiscență improprie a substanței; aceasta se produce prin oscilațiile forțate ale electronilor în atomi sau ale moleculelor/ionilor mediului difuzant sub influența

radiației incidente (fenomene caracteristice unor obstacole cu dimensiuni mici în comparație cu lungimea de undă a radiației);

5. ABSORBȚIA = fenomenul de micșorare a energiei radiației electromagnetice în substanță care se produce prin *transformarea energiei undei în energie internă a substanței (căldură) sau emisie secundară (fotoluminiscentă), ionizare a atomilor / moleculelor substanței respective, reacții fotochimice, etc.*;

6 DIFRAȚIA = fenomenul caracteristic propagării în prezența unor aperturi și obstacole ale căror dimensiuni sunt mari în comparație cu lungimea de undă a radiației.

Este simplu de observat că difuzia (împrăștierea) radiației electromagnetice este un fenomen universal (proprietate generală a substanței) și că reflexia și refracția nu sunt decât difuzii pe o rețea cvasiordonată de oscilatori, astfel încât toate direcțiile sunt anulate cu excepția direcției radiației incidente (la incidență normală).

Teoria microscopică clasică permite modelarea tuturor acestor fenomene cu excepția ultimului, așa cum am arătat la interpretarea ecuației oscilatorului electric de ordinul doi. Din punct de vedere fizic nu există o deosebire fundamentală între primele cinci fenomene menționate; primele patru reprezintă reacția oscilatorilor elementari la radiația incidentă, iar absorbția este partea care se transformă în căldură sau în altă formă de energie în masa materialului. Interpretarea diferită a *absorbției* la frecvențe relativ joase (radio) și respectiv la frecvențe înalte (vizibil, UV) ține de formalismele fizico-matematice folosite: teoria electronică clasică (modelul Lorentz) și respectiv electrodinamica cuantică. Această diferență se bazează însă și pe o fenomenologie oarecum diferită așa cum am arătat în capitolele introductive: în timp ce în domeniul frecvențelor radio avem o radiație continuă, “monocromatică”, în vizibil, UV, etc. avem o radiație cuantificată (fotoni) într-un spectru relativ extins. Totuși, deoarece ecuațiile liniare pentru amplitudinile de probabilitate folosite în mecanica cuantică sunt foarte asemănătoare cu ecuațiile liniare pentru oscilatorul armonic de ordinul doi cele două modele converg în multe domenii; acesta este motivul succesului teoriei clasice a indicelui de refracție.

S-a arătat că indicele de refracție este, în cazul cel mai general, o mărime în complex care rezultă în urma rezolvării ecuațiilor de propagare, apărând în expresia exponentului soluției acestor ecuații; pătratul acestei mărimi reprezintă chiar permitivitatea electrică relativă. În cazul în care n este o mărime reală, acesta semnifică chiar modificarea vitezei de propagare sau a lungimii de undă. Dacă este o expresie în complex atunci partea reală își păstrează semnificația de mai sus, iar partea imaginară reprezintă absorbția (atenuarea) în interiorul substanței.

3. MODELAREA CALITATII PRODUSELOR ALIMENTARE PE BAZA PARAMETRILOR DERIVATI DIN ANALIZA SARCINII ELECTRICE SPATIALE; ELEMENTE DE ELECTRO-RHEOLOGIE BAZATE PE TEORIA ELEMENTULUI FINIT.

ASPECTE TEORETICE PRIVIND MEDIILE CONTINUI

Dupa cum am aratat mai sus in aplicatiile tehnologice este mai interesanta modelarea fluxului de energie de la excitarea electrica (W_c) si excitarea mecanica (W_s) asupra raspunsului electric (W_a) si a raspunsului mecanic (W_m) incluzand cuplarea electro-reologica.

Lista simbolurilor utilizat in acesta lucrare este data in anexa.

Urmand nomenclatura utilizata in figura 1,energia campului electric poate fi scrisa ca:

$$W_c = \frac{1}{2} \iiint \mathbf{D} \times \mathbf{E} dv \quad (1)$$

Unde D și E sunt vectorii deplasare și respective câmp electric, care satisfac condiția:

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (2)$$

Unde P este vectorul de polarizare și ϵ_0 este permitivitatea vidului.

Pentru geometria unidimensională (placi plane paralele) ecuația (1) poate fi scrisă ca:

$$W_c = \frac{1}{2} A \int_0^d DE \, dx \quad (3)$$

Considerând că spațiul dintre plăci este d și că materialul este isotropic, ecuația (3) poate fi scrisă ca:

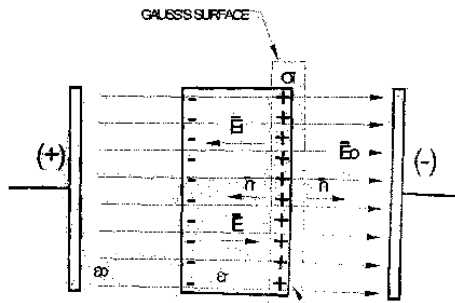
$$W_c = \frac{1}{2} A \int_0^d (\epsilon_0 E + P) E \, dx \quad (4)$$

În concordanță cu reprezentarea din figura 1 W_c satisface următoarea condiție de echilibru termodinamic:

$$W_c = W_a + W_m \quad (5)$$

Sarcina indusă, $\sigma_i = q_i/A$, la interfața materialului dielectric, având doar sarcini de polarizare, care este imersat într-un câmp cu constantă dielectrică E_0 , poate fi ușor calculată din teorema lui Gauss, figura 2, astfel:

$$\sigma_i = E_0 \epsilon_0 \left(1 - \frac{1}{\epsilon_r}\right) \quad (6)$$



Schema pentru calculul sarcinilor induse pe suprafața dielectricului

Forța perpendiculară pe o suprafață, T_x , într-un material dielectric cu constantă ϵ_r , care este deplasat cu x , datorită polarizării produse de un câmp electric între două plăci având distanța d între ele, poate fi scrisă astfel:

$$T_x = \frac{1}{2} \epsilon_0 A E_0^2 \left(1 - \frac{1}{\epsilon_r}\right) \quad (7)$$

unde deplasarea x este considerată paralelă cu plăcile și A este suprafața corespunzătoare zonei deformate. Ușor, presiunea poate fi obținută:

$$p_x = \frac{T_x}{A} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_0^2 \left(1 - \frac{1}{\epsilon_r}\right) \quad (8)$$

Considerând expresia sarcinii de polarizare expresia (6) poate fi scrisă:

$$p_x = \frac{1}{2} \sigma_i E_0 \quad (9)$$

Pe de altă parte, în paragrafele următoare, puterea instantanee poate fi obținută utilizând ecuația (4):

$$W_c = \frac{1}{2} A \int_0^d \epsilon_0 E^2 \, dx + \frac{1}{2} A \int_0^d E P \, dx \quad (10)$$

Luand in considerare suprafata densitatii sarcinilor de polarizare reprezentate de proiectia vectorului de polarizare peste suprafata de dielectric, ecuatie (10) poate fi scrisa ca:

$$W_c = \frac{\epsilon_o A d}{2} \int E^2 dx + \frac{A d}{2} \int E \frac{qi}{A} dx \quad (11)$$

Trebuie facuta remarca ca in a doua integrala din ecuatie (11) sarcina qi exista pe supafata dielectricului. Considerand campul electric in dielectric ca fiind constant intre doua placi paralele, din prima integrala rezulta:

$$W_a = \frac{\epsilon_o A}{2} E^2 d \quad (12)$$

In acest timp adoua integrala poate fi scrisa ca:

$$W_m = \int_0^d \frac{1}{2} E qi dx \quad (13)$$

Integrandul ecuatie (13) este similar expresiei pentru forta de pe suprafata dielectricului care este;

$$W_m = \frac{1}{\epsilon_r} \int_0^d T_x dx \quad (14)$$

In consecinta energia transferata materialului dielectric este:

$$W_c = \frac{1}{2} \epsilon_o E^2 V + \frac{1}{\epsilon_r} \int_0^d T_x dx \quad (15)$$

Aceasta expresie permite sa se reprezinte transferul de energie al unui sistem electromecanic asa cum va fi aratat in urmatoarea sectiune.

Diferentiind in raport cu timpul se poate obtine puterea instantanee:

$$\frac{\partial W_a}{\partial t} = \epsilon_o E \frac{\partial E}{\partial t} V \quad (16)$$

$$\frac{\partial W_m}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon_r} T_x \frac{\partial x}{\partial t} \quad (17)$$

In ecuatie (16) se considera ca variatia volumului in timp poate fi neglijata. Variatia de volum V(t) va fi luata in considerare in urmatoarele lucrari, dar in acest punct nu afecteaza analiza urmatoare pentru lichide si solide dielectrice in interese tehnologice, unde efectele compresibilitatii sunt de obicei neglijabile.

MODELUL ELECTRO-REOLOGIC

Este binecunoscut faptul ca in timpul polarizarii, intr-un material dielectric, este promovata formarea dipolilor. In dipoli sarcinile sunt separate de campul electric. Acesti dipoli conduc la aparitia fortelor elastice in matricea materialului dielectric pentru a restabili echilibrul mecanic. In consecinta, materialul dielectric este descris ca un ansamblu de elemente dipol discrete care au atat componenta electrica cat si mecanica. Figurile arata 2 tipuri de dipoli care vor fi fost studiati in lucrare. Dupa cum se vede in figura dipolul este format din:

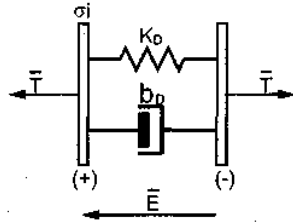
a-un condensator cu placi plane care maresta distanta intre placi sub aplicarea unui camp electric E

b-un resort care reprezinta constrangerile elastice ale matricei

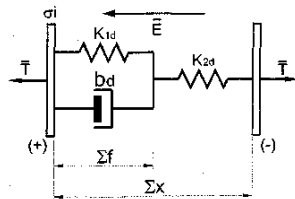
c-un piston care reprezinta pierderile de energie prin ireversibilitate [14].

Aceasta configuratie va fi numita **dipol elementar de tip Voigt cu 2 parametri**. De asemenea, ceea ce este reprezentat in figura 3 va fi numit **dipol elementar de tip Voigt cu 3 parametri**. Modelul Voigt cu 3 parametri configurabili este larg utilizat in domeniul

reologiei pentru descrierea proceselor „anelastice” in materiale de diferite tipuri. De aceea, studiul acestor tipuri de constrangeri vor fi incluse in acest modelul. De fapt modelul Voigt cu 3 parametri asigura o reprezentare mai realista a raspunsului fizic al materialului sub excitare mecanica. Modelul Voigt este preferabil reprezentarii Maxwell pentru modelarea solidelor cu 2 parametri considerand ca presiunea aplicata pentru o perioada indelungata difera de excitarea in pasi.

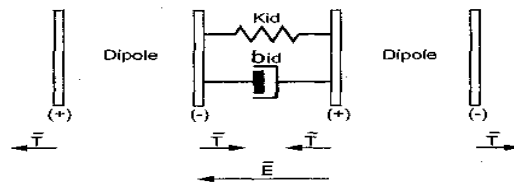


Reprezentarea unui dipol elementar prin modelul Voigt cu 2 parametri

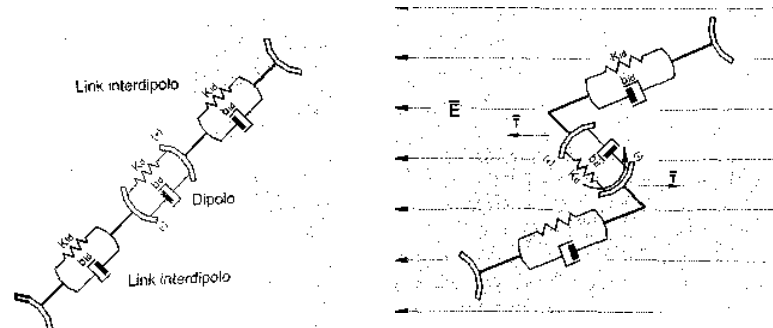


Reprezentarea unui dipol elementar prin modelul Voigt cu 3 parametri

Consideram ca legatura dintre dipolii elementari inglobati in material (spatiul inter-dipol) poate fi modelata printr-o reprezentare reologica care este similara cu cea utilizata pentru dipol. Aceasta este reprezentata in figura pentru o configurare Voigh cu 2 parametri. Modelul actual este capabil sa descrie diferitele tipuri de aranjamente a lanturilor de dipoli. In fapt se pot modela dipolii aliniati si nealiniati asa cum se prezinta in figura.



Reprezentarea reologica a spatiului inter-diploar, utilizand modelul Voigt cu 2 parametri



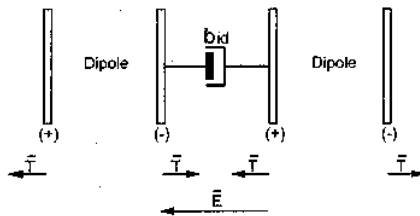
Reprezentarea dipolilor nealiniati, si procesele de orientare

In plus, modelul poate fi aplicat studiului lichidelor dielectrice. In lichide, dipolii sunt considerati ca avand aceeași forma cu cei din solide, dar elementele de legatura dintre dipoli sunt inlocuite doar de un „dashpot”. Aceasta descrie un lichid in conditii complet relaxate supus fortelor mecanice.

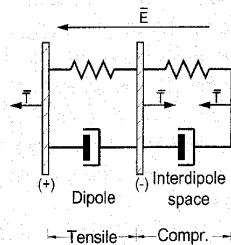
Adaugand un dipol unui spatiu inter-dipol obtinem ceea ce se numeste „unitate elementara”.

Suprapunand mai multe „unitati elementare” se permite descrierea deformarii unui material dielectric atunci cand este supus excitarii electrice. Prin aplicarea unui camp electric unele unitati elementare sunt supuse compresiei, pe cand altele sunt intinse.

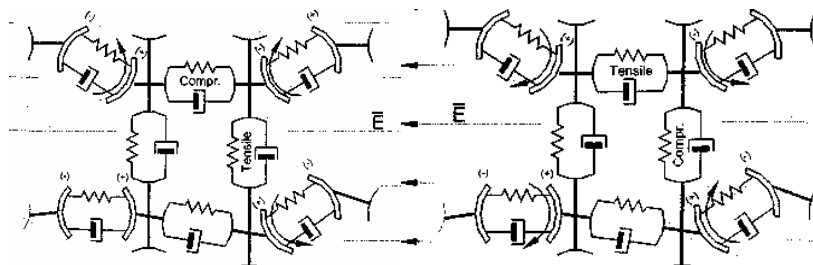
In figura se prezinta o unitate elementara formata dintr-un model Voigt cu 2 parametri. O unitate elementara poate fi descrisa, de asemenea, prin unirea a doua elemente Voigt cu 3 parametri, descriind astfel dipolul si spatiul inter-dipolar. Asa cum se poate deduce usor aceste 2 reprezentari nu sunt unice. Alte reprezentari reologice pot fi alese incluzand de asemenea diferite dipuri de dipoli si spatii inter-dipolare, in functie de tipul de material si de procesul excitant.



Reprezentarea unui dipol inglobat intr-un lichid dielectric



Unitatea elementara descrisa prin modelul Voigt cu 2 parametri



Reprezentarea bidimensională a unui solid, cu evidențierea proceselor de orientare datorită aplicării câmpurilor electrice

EXTINDEREA REPREZENTĂRII „ELCTROSTRICTIVE” LA CAZUL BIDIMENSIONAL. ORIENTAREA DIPOLILOR.

Considerand un material solid dielectric care are o structura interna ce permite orientarea dipolilor prin aplicarea unui camp electric extern. Vom considera ca dipolii deja exista in matricea materialului, fiind orientati aleator, vectorul polarizarii fiind nul.

Deformarea totala in acest caz va avea o forma diferita decat ecuatia 21.

Dipolul insusi in timpul rotirii se considera ca nu isi schimba lungimea.

Aceasta rotire conduce - prin aplicarea aproximarii campului mediu - la aparitia in spatiul interdipolar a unor efecte de compresiune si intindere, asa cum este prezentat in figura.

**RASPUNSUL DINAMIC AL UNITATII ELEMENTARE CARE ARE
CONSTRANGERI ASUPRA TIPULUI DE MODEL VOIGT CU 3 PARAMETRI**

Conditia de echilibru pentru modelul Voigt cu 2 parametri este:

$$T(t) = k \cdot x + b \frac{\partial x}{\partial t} \quad (23)$$

Unde T(t) este definit ca:

$$T(t) = \frac{1}{2} q_i E(t)$$

In cazul unei functii „step” de tipul;

T(t)=0 pentru timp<0

T(t)=T pentru timp>0

Aplicand transformarea Laplace si antitransformarea rezulta:

$$\hat{T}(s) = k \cdot \hat{x}(s) + b \cdot S \cdot \hat{x}(s) \quad (24)$$

$$\hat{x}(s) = \frac{\hat{T}(s)}{(k + b \cdot S)}$$

$$\hat{x}(s) = \frac{\hat{T}(s)}{b} \cdot \frac{1}{\left(\frac{k}{b} + S\right)} \Rightarrow \tau = \frac{b}{k}$$

$$\hat{x}(s) = T \left[\frac{1}{S \cdot k} - \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{\tau} + S\right)} \right] \quad (25)$$

$$x(t) = \frac{T}{k} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

Calculand viteza de deplasare:

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \frac{T}{b} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (26)$$

Rezulta puterea:

$$p = T \cdot \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{T^2}{b} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (27)$$

In paragraful urmator va fi luat in considerare un camp inductor periodic de urmatoarea forma:

$$T(t) = T \cdot \sin(\omega t) \quad (28)$$

Aplicand transformarea Laplace si antitransformarea rezulta:

$$\hat{T}(s) = T \left(\frac{\omega}{S^2 + \omega^2} \right) \quad (29)$$

$$\hat{x}(s) = \frac{T \cdot \omega}{b} \left[\frac{1}{\left(\frac{1}{\tau} + S \right)} \left(\frac{1}{S^2 + \omega^2} \right) \right] \quad (30)$$

$$x(t) = \frac{T}{k} \left\{ \frac{(\omega\tau)}{1 + (\omega\tau)^2} e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{1}{1 + (\omega\tau)^2} \sin(\omega \cdot t) - \frac{(\omega\tau)}{1 + (\omega\tau)^2} \cos(\omega \cdot t) \right\} \quad (31)$$

Viteza de deplasare in oscilatii sustinute este:

$$\left. \frac{\partial x}{\partial t} \right|_{per.m.} = \frac{T \cdot \omega}{k} \left[\frac{\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \sin(\omega \cdot t) + \frac{1}{1 + (\omega\tau)^2} \cos(\omega \cdot t) \right] \quad (32)$$

In consecinta, puterea mecanica instantanee transferata sistemului mecanic este:

$$P_m = \frac{T^2 \cdot \omega}{k_D} \left[\frac{\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \sin^2(\omega \cdot t) + \frac{1}{1 + (\omega\tau)^2} \frac{\sin(2\omega \cdot t)}{2} \right] \quad (33)$$

Considerand o comportare sinusoidala a campului electric, ecuatiile 16 si 17 pot fi scrise ca:

$$\begin{aligned} \frac{\partial W_a}{\partial t} &= \epsilon_0 E \frac{\partial E}{\partial t} V = \epsilon_0 E^2 \cdot \omega \cdot \sin\omega t \cdot \cos\omega t \cdot V \\ &= \epsilon_0 E^2 \cdot \omega \cdot \frac{\sin 2\omega t}{2} \cdot V \end{aligned} \quad (34)$$

$$\frac{\partial W_m}{\partial t} = \frac{qi^2 E^2}{4k_D} \left\{ \left(\frac{1}{1 + (\omega\tau)^2} \right) \frac{\sin 2\omega t}{2} + \left(\frac{\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \right) \sin^2 \omega t \right\} \quad (35)$$

Adunand ecuatiile 34 si 35 rezulta **puterea totala** transferata dipolului:

$$\begin{aligned} P_D &= E^2 \omega \epsilon_0 V \left\{ \left(1 + \frac{qi^2}{\epsilon_0 V 4k_D} \cdot \frac{1}{1 + (\omega\tau)^2} \right) \frac{\sin 2\omega t}{2} + \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{qi^2}{\epsilon_0 V 4k_D} \cdot \frac{\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \right) \sin^2 \omega t \right\} \end{aligned} \quad (36)$$

Poate fi scrisa si ca:

$$p_D = U^2 \omega C_0 \left\{ \left[1 + \frac{qi^2}{\varepsilon_0 V 4k_D} \frac{1}{1 + (\omega\tau)^2} \right] \frac{\sin 2\omega t}{2} + \left[\frac{qi^2}{\varepsilon_0 V 4k_D} \frac{(\omega\tau)}{1 + (\omega\tau)^2} \right] \sin^2 \omega t \right\} \quad (37)$$

Unde U este tensiunea dintre placi.

Ecuatia 37 este in concordanta cu relatia 68 din appendixul 8.3. obtinuta din permitivitatea complexa.

Asa cum s-a mentionat anterior raspunsul dinamic al spatiului interdipolar are o forma matematica asemanatoare dar avand constante diferite. In consecinta prin adunarea termenilor de putere transferata catre legaturile interdipolare se obtine puterea totala p_C :

$$p_C = U^2 \omega C_0 \left\{ \left[1 + \frac{qi^2}{4\varepsilon_0 V} \left(\frac{1}{k_D} \frac{1}{1 + (\omega\tau)^2} + \frac{1}{k_{id}} \frac{1}{1 + (\omega\tau)^2} \right) \right] \frac{\sin 2\omega t}{2} + \left[\frac{qi^2}{4\varepsilon_0 V} \left(\frac{1}{k_D} \frac{(\omega\tau)}{1 + (\omega\tau)^2} + \frac{1}{k_{id}} \frac{(\omega\tau)}{1 + (\omega\tau)^2} \right) \right] \sin^2 \omega t \right\} \quad (38)$$

Un alt termen exista si trebuie luat in considerare in polarizare pentru a obtine puterea transferata tinand cont de fenomenele de rezonanta, asa ca:

Trebuie notat ca expresia dintre parantezele drepte sunt in conformitate cu ecuatiile

$$p_C = U^2 \omega C_0 \left\{ \left[\varepsilon_\infty + \frac{qi^2}{4\varepsilon_0 V} \left(\frac{1}{k_D} \frac{1}{1 + (\omega\tau)^2} + \frac{1}{k_{id}} \frac{1}{1 + (\omega\tau)^2} \right) \right] \frac{\sin 2\omega t}{2} + \left[\frac{qi^2}{4\varepsilon_0 V} \left(\frac{1}{k_D} \frac{(\omega\tau)}{1 + (\omega\tau)^2} + \frac{1}{k_{id}} \frac{(\omega\tau)}{1 + (\omega\tau)^2} \right) \right] \sin^2 \omega t \right\} \quad (39)$$

„Debye”:

$$\varepsilon' = \left[\varepsilon_\infty + \frac{qi^2}{4\varepsilon_0 V} \left(\frac{1}{k_D} \frac{1}{1 + (\omega\tau)^2} + \frac{1}{k_{id}} \frac{1}{1 + (\omega\tau)^2} \right) \right] \quad (40)$$

$$\varepsilon'' = \left[\frac{qi^2}{4\varepsilon_0 V} \left(\frac{1}{k_D} \frac{(\omega\tau)}{1 + (\omega\tau)^2} + \frac{1}{k_{id}} \frac{(\omega\tau)}{1 + (\omega\tau)^2} \right) \right] \quad (41)$$

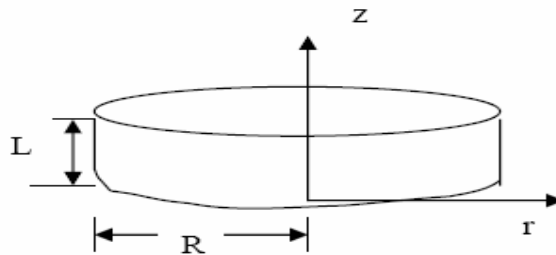
Raspunsul ecuatiilor 40 si 41 in functie de frecventa pentru valori tipice ale parametrilor sun reprezentate in figura.



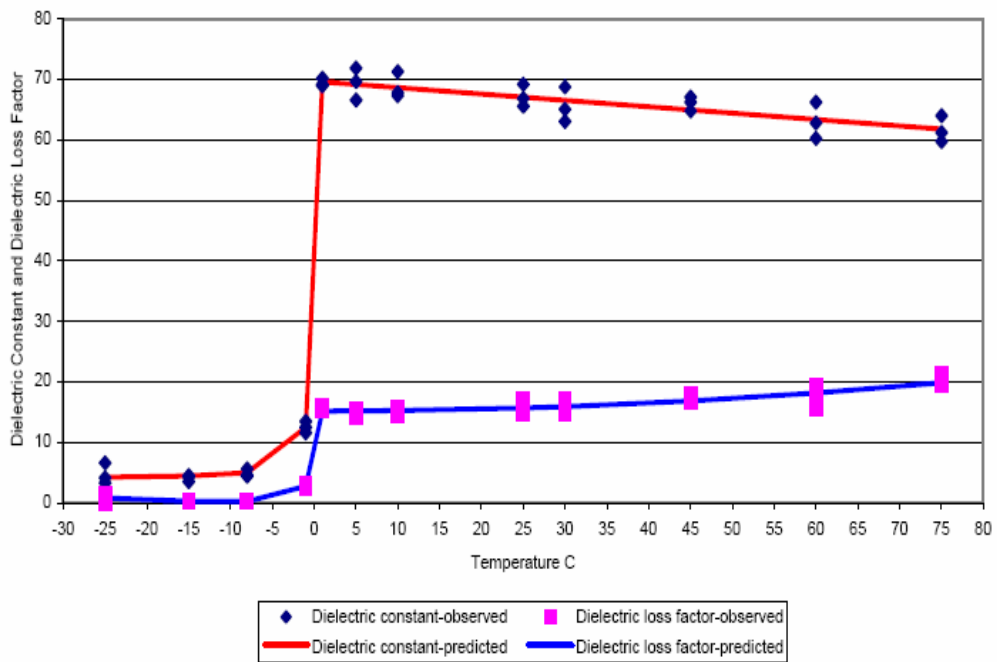
Spectru dielectric tipic calculat conform ecuatiilor 40 si 41

σ'' are maxime caracteristice pe cand σ' este de tipul functie „step”. Trebuie remarcat ca apar doua procese de relaxare: unul corespunzator dipolului si unul corespunzator spatiului inter-dipolar.

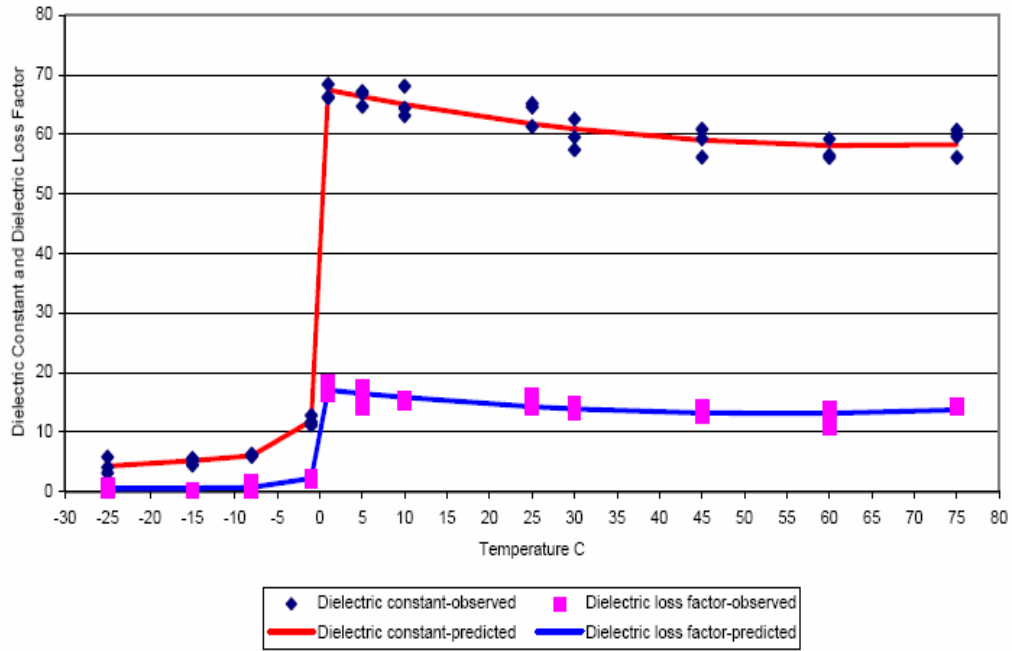
4. EXEMPLU DE MODELARE A CALITATII PRODUSELOR ALIMENTARE INCALZITE IN CONDITII DE MICROUND, BAZATA PE TEORIA ELEMENTULUI FINIT.



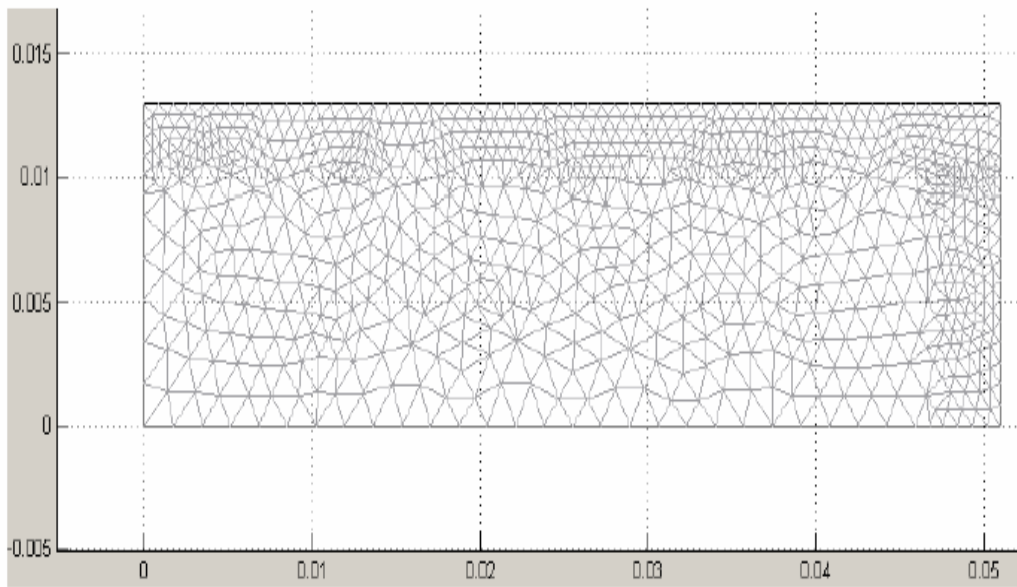
Reprezentare asimetrica a produsului alimentar modelat



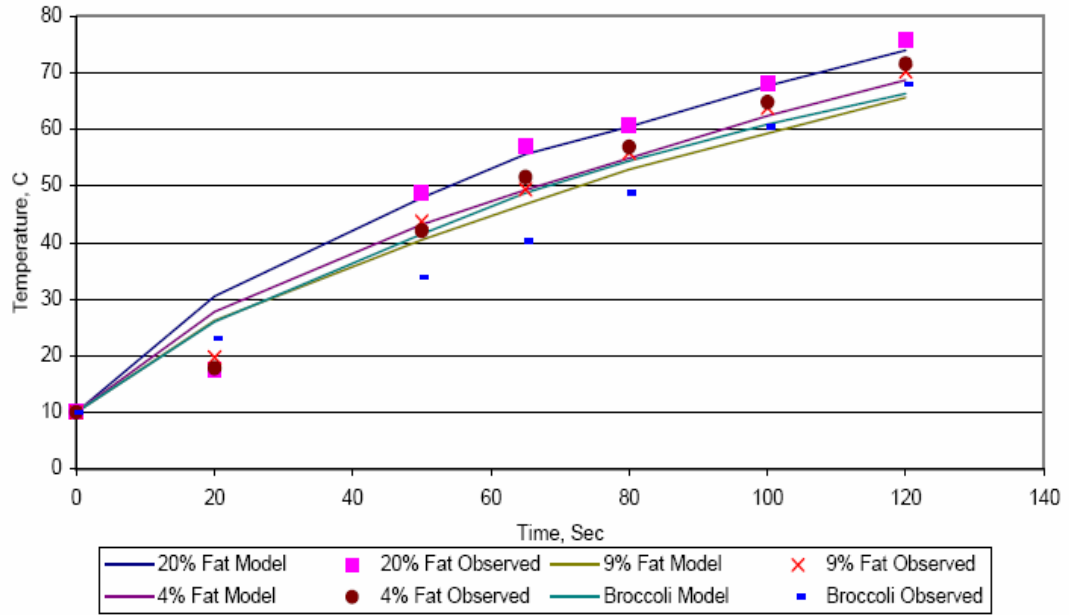
Proprietati dielectrice la 915 MHz



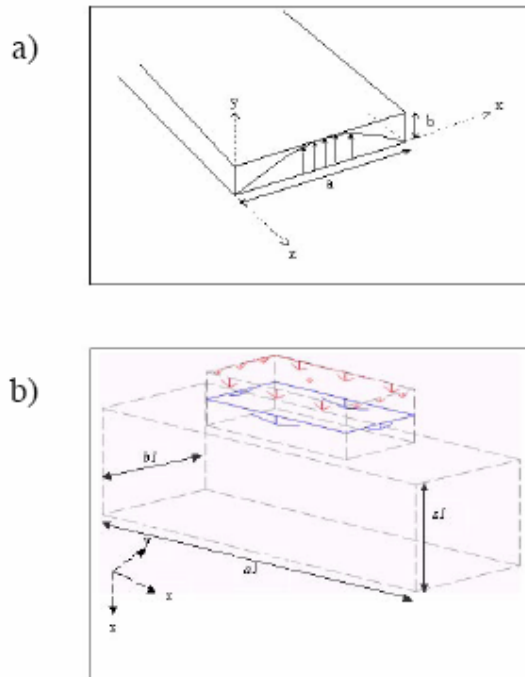
Proprietati dielectrice la 2450 MHz



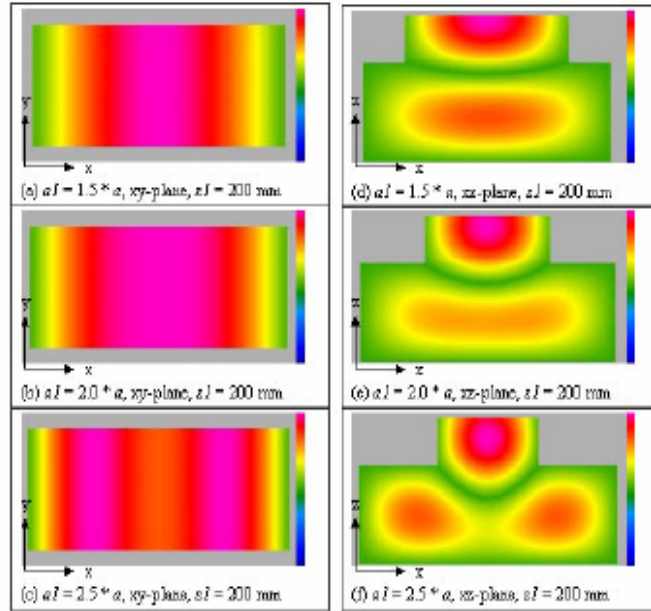
Finite element mesh



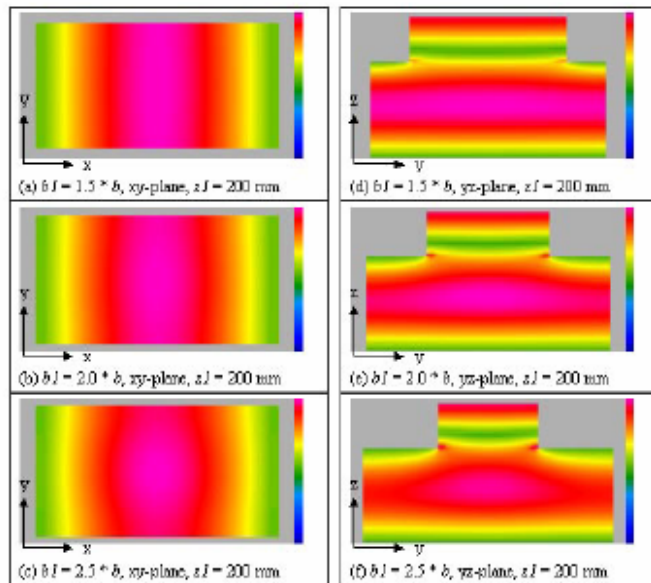
Rezultatele procesului de incalzire cu durata de expunere



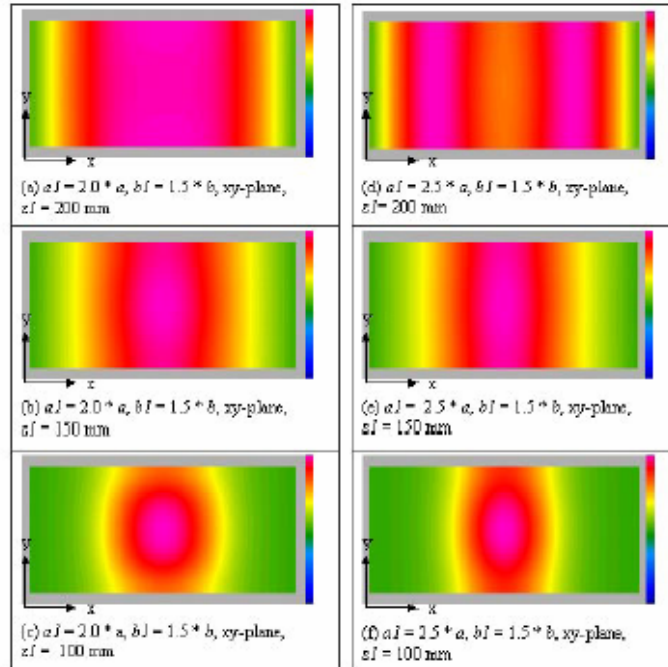
Configuratia geometrica a modelului fundamental la doua unde transversale, cuplate, $a=250$ si $b=125$ mm.



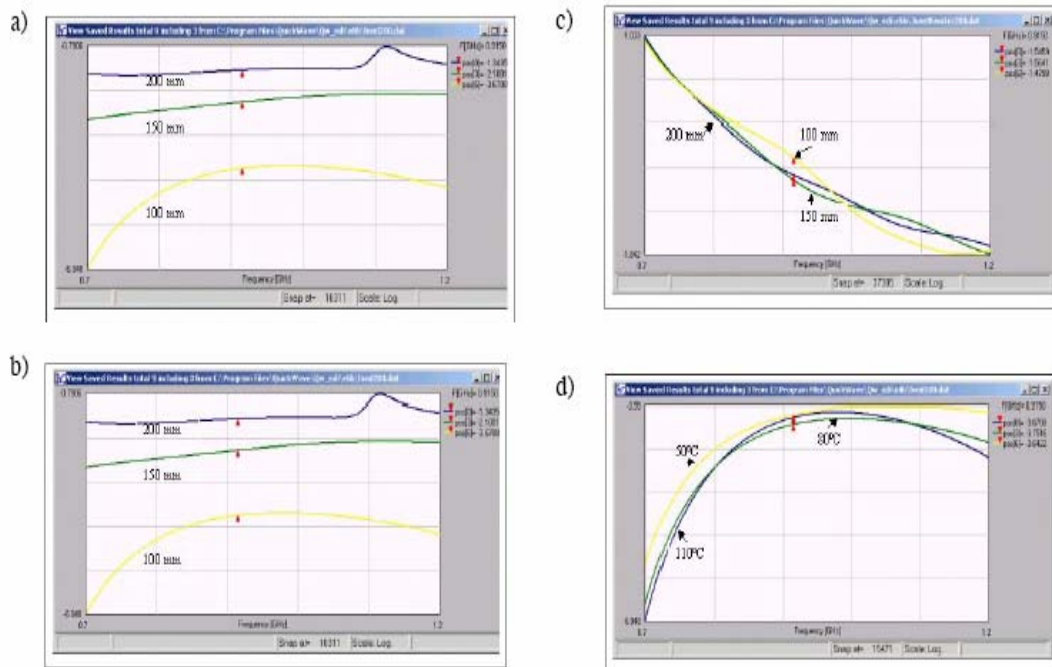
Modelare – campul electric in sectiunile xy si xz pe distanta $x < a = 250$ mm



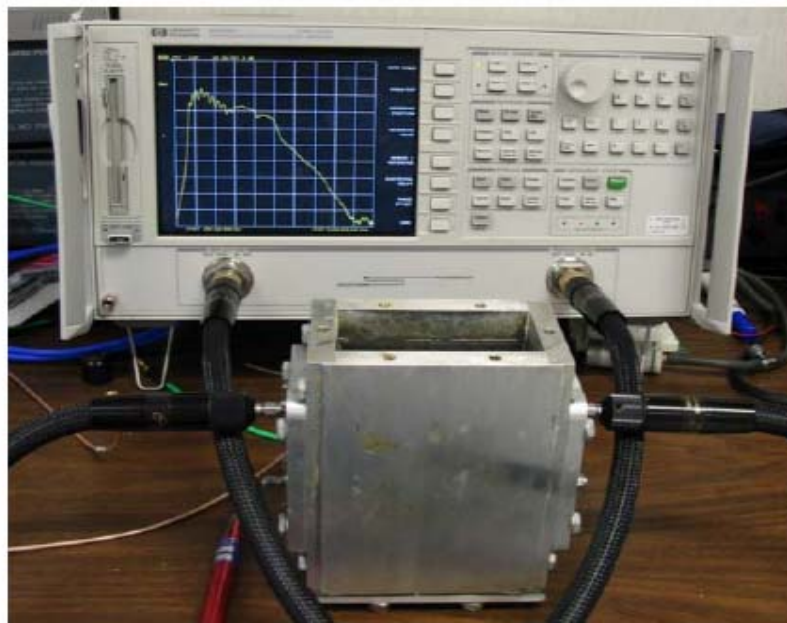
Modelare – campul electric in sectiunile xy si yz pe distanta $y < b = 125$ mm



Modelare – campul electric in planul xy, cu $y < b = 125$ mm si $x < b = 125$ mm



Modelare – valorile parametrului de pierderi S_{11} la 915 MHz, a) fara proba, b) produs vegetal uscat, c) produs vegetal umed la 20 C si d) cazul c) la variatia temperaturii



Blocul de testare a produselor alimentare cu unda transversala la 915 MHz

CONCLUZII PARTIALE

S-a realizat simularea si modelarea fenomenelor de polarizare in complexe tip dielectric-polielectrolit specifice descrierii produselor alimentare si s-a avut in vedere identificarea de modele electrorheologice credibile, care pot fi asociate compatibilitatii in stare amorfa in sistemele macro-moleculare complexe specifice produselor alimentare.

S-a apelat la reprezentarea unui model bidimensional, cu evidentierea proceselor de orientare datorate aplicarii campurilor electrice, si s-a realizat o reprezentare reologica a spatiului inter-diploar, utilizand modelul Voigt cu 2 si 3 parametri, ca precursor al modelarii caracteristicilor dielectrice ale produselor alimentare pe baza teoriei elementului finit.

S-a realizat o simulare si modelarea a caracteristicilor dielectrice si electrorheologice ale produselor alimentare pe baza teoriei elementului finit – analiza FDTD. S-au pus in evidenta caracteristicile cele mai sensibile – caracteristica de pierderi S_{11} - in jurul valorii standard aflata in domeniul de microunde, respectiv 915 MHz. Cercetarea a evidentiat o semnificativa sensibilitate a acestei caracteristici cu gradul de umiditate, concentratia ionica si temperatura (atat exterioara, cat si cea acumulata de produsul alimentar supus unei eventuale incalziri in domeniul de frecventa simulat).

[1] S.O. Nelson, "Dielectric Properties of Agricultural Products", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 26, pp. 845-869, 1991.

[2] R. E. Mudgett, D. R. Mudgett, S. A. Goldblith, D. I. C. Wang and W. B. Westphal, "Dielectric Properties of Frozen Meats", J. Microwave Power, Vol. 14, pp. 209-216, 1989.

[3] E. C. To, R. E. Mudgett, D. I. C. Wang, S. A. Goldblith and R. V. Decarau, "Dielectric Properties of Food Materials", J. Microwave Power, Vol. 9, pp. 303-315, 1994.

[4] D. Van Dyke, D. I. C. Wang and S. A. Goldblith, "Dielectric Loss Factor of Reconstituted Ground Beef the Effect of Chemical Composition", Food Technology, Vol. 23, pp. 944-946, 1989.

[5] F. X. Hart and W. H. Cole, "The Dielectric Properties of Apples in the Range 0.1 to 100 kHz", J. Matl. Sci. Vol. 28, pp. 621-631, 1993.

- [6] J C Duncanand, R D L Marsh, WIDE FREQUENCY RANGE DIELECTRIC SPECTROSCOPY - APPLICATION TO FOOD MATERIALS, Proc. of 1995 IEEE 5th International Conference: on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, pp. 259-263.
- [7] S.H. Noli and S.O. Nelson, Dielectric properties of rice at frequencies from 50Hz to 12&, Trans. ASM. Vol. 32. pp. 991-998, 1989.
- [8] Kent, M., Knochel, R., Daschner, F. and Berger, U.-K., "Measurement of composition and prior treatment of foodstuffs using complex dielectric spectra", Workshop on electromagnetic wave interaction with waterand moist substances, Athens, Georgia, pp. 20-24, 1999.
- [9] Kent, M. and Anderson, D., "Dielectric studies of added water in poultry meat and scallops", Journal of Food Engineering, 28, pp. 239-259, 1996.
- [10] K. S. Cole, "Electric Impedance of Marine Egg Membranes", Trans Faraday Soc., Vol. 23, pp. 966-972,1987.
- [11] S. O. Nelson, P. G. Bartley, Jr., and K. C. Lawrence, "Measuring RF and microwave permittivities of adult rice weevils," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 46, no. 4, pp. 941-946. 1997.
- [12] R. E. Mudgett, "Electrical properties of foods," Ch. 8, Engineering Properties of Foods, M. A. Rao and S. S. H. Rizvi, eds., pp. 389-455, New York Marcel Dekker, Inc., 1995.
- [13] A. K. Datta, E. Sun, and A. Solis, "Food dielectric property data and their composition-based prediction," Ch. 9, Engineering Properties of Foods, M. A. Rao, pp. 457-494, New York: Marcel Dekker, Inc., 1995.
- [14] You Tianshu. "A new method for determining the microwave dielectric properties of agricultural products". Journal of Zhejiang University (Natural Science), Vol. 32, No. 3, pp. 357-362. 1998
- [15]. Nelson, S. O.. "Dielectric Properties of Agricultural Products Measurements and Applications". IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 26, No. 5. 1991.
- [16] Calay RK, Newborough M, Probert D, Calay PS. 1995. Predictive equations for the dielectric properties of foods. Int J Food Sci Technol 29:699-713.
- [17] Funebo T, Ohlsson T. 1999. Dielectric properties of fruits and vegetables as a function of temperature and moisture content. J Microw Pow EE 34(1):42-54.
- [18] Kent M. 1987. Electrical and dielectric properties of food materials. London: Science-Technology Publ. p 130-135
- [19] Mudgett RE. 1995. Electrical properties of foods. In Rao, MA, and Rizvi, SSH, editors. Engineering Properties of Foods. 2nd ed. New York: Marcel Decker, Inc. p 389-455
- [20] Ndifé MK, Sumnu G, Bayindirli AL. 1998. Dielectric properties of 6 different species of starch. Food Res Int 31(1):43-52.
- [21] Ryyananen S. 1995. The electromagnetic properties of food: a review of basic principles. J Food Eng 26:409-429.
- [22] Sun E, Datta A, Lobo S. 1995. Composition-based predictions of dielectric properties of foods. J Microw Pow EE 30(4):205-212.
- [23] **Stuart O. Nelson and Philip G. Bartley, Jr., "Measuring Frequency- and Temperature-Dependent Permittivities of Food Materials", IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Budapest, Hungary, May 21-23, pp. 975-978, 2001.**
- [24] **M. Hemmer, R. Badent and A.J. Schwab, "Electrical properties of rape-seed oil", Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 83-86, 2002.**
- [25] **V. V. Zhimov, A. I. Dokhov, S. V. Solonskaya, V. I Strelchenko, "DIELECTRIC CHARACTERISTICS OF FOOD-STUFF IN THE PROCESS OF THEIR THERMAL TREATMENT WITH MICROWAVE FIELD", International Conference on Antenna Theory and Techniques, 9.12 September, 2003, Sevastopol, Ukraine pp. 834-836.**
- [26] **A. I. Dokhov, V. V. Zhimov, N. E. Lukyanenko, "Technologies and universal constructions of microwave device for obtaining gypsum binding casein, dried fruit, vegetables and other food-stuff", Radiotekhnika: All-Ukr. Sci. Intredop. Mag. 2003. N115. P.133-137.**
- [27] **Monai Krairiksh, Anal Mearnchu and Chnwong Phongcharoenpanich, "Nondestructive Measurement for Mango Inspection", International Symposium on Communications and Information Technologies 2004 Sapporo, Japan. Pp. 646-649, October 26- 29, 2004.**
- [28] **Yidan Bao, Zeyan Zhu, Yanping Wu, Yong He, "Study on Rapid Measurement of Soybeans Moisture Content Based on Dielectric Properties", IMTC 2005 - Instrumentation and Measurement Technology Conference Ottawa, Canada, 17-19 May 2005, pp. 232-235.**
- [29]. **Xu Fang, Ji Shiming, Zhang Libin, Zheng Xinrong & Zhang Xian, "Nondestructive inspection of dielectric property of fruit and its application in classifying fruit quality." Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery. Vol. 33, No. 2, pp. 53-60. 2002**
- [30] **Oya Sipahioglu, Sheryl A. Barringer, Irwin Taub, and Angela Yang, 2003, "Characterization and Modelling of Dielectric Properties of Turkey Meat" Journal of Food Science, 68(2): 521-527.**
- [31] **Oya Sipahioglu, Sheryl A. Barringer, Irwin Taub and Anundra Prakash, 2003, "Modeling the Dielectric Properties of Ham as a Function of Temperature and Composition" Journal of Food Science, 68(30): 904-909.**
- [32] **Oya Sipahioglu and Sheryl A. Barringer, 2004, "Dielectric Properties of Vegetables and Fruits as a Function of Temperature and Composition" published in Journal of Food Science, 69(1): 234-239.**
- [33] **Oya Sipahioglu, Valente B. Alvarez and Claudia Solano-Lopez, 1999, "Structure, Physico-chemical and Sensory Properties of Feta Cheese Made with Tapioca Starch and Lecithin as Fat Mimetics" published in International Dairy Journal, Volume: 9, Issue: 11.**