

UNIVERSITATEA TEHNICĂ DIN CLUJ-NAPOCA

Contract ID_1024/2007

**„MODEL MATEMATIC PENTRU STUDIUL
INFLUENȚEI POLUĂRII ELECTROMAGNETICE
ÎN C.A. A CONDUCTELOR METALICE
SUBTERANE DE GAZ, CU ȘI FĂRĂ PROTECȚIE
CATODICĂ, AFLATE ÎN VECINATATEA UNEI
STAȚII DE TRANSFORMARE”**

Etapa III / 2009

**DEZVOLTAREA UNUI MODEL MATEMATIC ȘI A SOFTWARE-LUI
AFERENT PENTRU STUDIUL RĂSPUNSULUI UNEI REȚELE DE
CONDUCTOARE ÎNGROPATE**

Termen: 10.09.2009

COLECTIV DE REDACTARE

Prof. dr. ing. Emil SIMION – director proiect

Conf.dr.ing.mat. Dan Doru MICU

Conf.dr.ing. Laura DĂRĂBANT

As.ing.drd. Denisa ȘTEȚ

As.ing.drd. Mihaela PLEȘA

Drd.ing. Andrei CECLAN

CUPRINS

I. INTRODUCERE

II. ANALIZA RĂSPUNSULUI REȚELEI CONDUCTOARELOR DE LEGARE LA PĂMÂNT ȘI A CONDUCTOARELOR ÎNGROPATE DIN APROPIEREA LOR

III. IMPLEMENTAREA MODELELOR MATEMATICE DE CALCUL ÎN ALGORITMI NUMERICI DEDICAȚI STUDIUL COMPORTĂRII UNEI REȚELE DE CONDUCTOARE ÎNGROPATE

IV. ETAPELE MODELULUI MATEMATIC PE BAZA CĂRUIA SE DEZVOLTĂ ALGORITMI SOFTWARE

V. REALIZAREA UNUI SOFTWARE DE REZOLVARE A PROBLEMELOR DE INTERFERENȚĂ ELECTROMAGNETICĂ DINTRE LINIILE ELECTRICE AERIENE ȘI CONDUCTELE METALICE SUBTERANE

VI. VERIFICARE CALITĂȚII IZOLAȚIEI UNEI CONDUCTE DE GAZ CU AJUTORUL UNEI STAȚII MOBILE DE PROTECȚIE CATODICA MĂSURÂNDU-SE POTENȚIALELE INDUSE CONDUCTA-SOL PRIN INTERMEDIUL UNUI ELECTROD DE CU/CUSO₄

VII. BIBLIOGRAFIE

I. INTRODUCERE

În cele mai multe cazuri, rețeaua de conductoare și conducte din sol este analizată la energizarea cu curenți la frecvență joasă dar apar probleme la studiul performanțelor rețelei la frecvență înaltă sau/și în condiții de regim tranzitoriu. Această analiză constă în rezolvarea ecuațiilor lui Maxwell în spațiul tridimensional neuniform; spațiul de sus este aerul iar spațiul de jos, modelat ca un mediu infinit extins, reprezintă solul. Distribuția curenților longitudinali și transversali de-a lungul conductoarelor îngropate poate fi determinată prin segmentarea conductoarelor. În majoritatea cazurilor practice, conductoarele liniilor de înaltă tensiune fac parte din categoria conductoarelor lungi din punct de vedere electric, în vreme ce rețeaua conductoarelor subterane și conductelor va aparține categoriei conductoarelor scurte. Categoria în care se încadrează liniile și conductele îngropate depinde și de tipul problemei considerate, precum și de amplasarea și caracteristicile acestora [1]. Determinarea soluției analitice exacte pentru probleme electromagnetice ce implică prezența conductoarelor energizate de către liniile electrice - în prezența unui mediu conductor cum este pământul - este deosebit de dificilă, chiar pentru configurații simple ale rețelei de conductoare îngropate. Din fericire, făcând anumite aproximații adecvate problemei, aceasta poate fi soluționată mult mai ușor.

Curenții longitudinali și transversali, potențialele în sol și câmpurile magnetice sunt influențate de frecvență, de punctele de injecție ale curentului și de configurația rețelei de conductoare îngropate [2].

Metoda, pe care se construiește algoritmul utilizat pentru crearea softului de calcul și pentru a contracara dificultățile de calcul, constă în divizarea spațiului de studiu al interferenței în zone în care să se utilizeze exclusiv metode bazate pe teoria câmpului sau teoria circuitelor. Toate zonele unde s-au aplicat metode bazate pe teoria câmpului sunt transformate în zone echivalente realizate din elemente de circuit [3]. Această metodă presupune că interacțiunile între diferite zone sunt neglijate sau sunt reprezentate prin conexiuni de circuite.

II. ANALIZA RĂSPUNSULUI REȚELEI CONDUCTOARELOR DE LEGARE LA PĂMÂNT ȘI A CONDUCTOARELOR ÎNGROPATE DIN APROPIEREA LOR (CONDUCTE TEHNOLOGICE)

Sistemele tipice de conductoare îngropate constau în conductoare cilindrice fără înveliș conectate între ele, de obicei, în mai multe puncte. Conductoarele orizontale și extremitățile superioare ale conductoarelor verticale sau oblice sunt îngropate la cel puțin un metru sub suprafața solului. Unul sau mai multe dintre conductoarele îngropate sunt conectate cu conductoare speciale (prin care se realizează injecția de curent) prin care curenții de defect pătrund în rețeaua de legare la pământ; aceste conductoare speciale pot fi utilizate temporar sau permanent pentru circulația unor curenți test prin rețeaua de pământare [4].

În apropierea acestei rețele pot exista și conductoare îngropate, ca de exemplu conducte tehnologice (de obicei izolate și se ține cont de înveliș prin aplicarea unor condiții de frontieră la interfața conductor – înveliș) [5].

Se dorește determinarea comportării (răspunsului) rețelei conductoarelor de legare la pământ și a conductoarelor îngropate din apropierea lor (conduce tehnologice) atunci când este energizată de curenți injectați cunoscuți.

Primul pas în algoritmul de calcul creat pentru dezvoltarea softului de analiză a cuplajelor conductive și inductive este utilizarea teoriei câmpului (teoria conductoarelor scurte) pentru determinarea impedanțelor proprii și mutuale pe unitate de lungime a tuturor conductoarelor din rețeaua de pământare, incluzând protecția catodică specifică pentru conductele metalice. Se utilizează apoi teoria circuitelor pentru determinarea căderilor de tensiune în fiecare conductor, datorită curenților longitudinali care circulă prin el. Fiecare conductor îngropat este subdivizat în segmente cu lungimi mici în comparație cu lungimea de undă a semnalului transmis și cu lungimea totală a sistemului de pământare astfel încât să se poată crea un model de circuit echivalent care conține și impedanțele interne și externe ale segmentelor. Drept urmare, sistemul de pământare și conductoarele îngropate învecinate sunt analizate ca o rețea de conductoare scurte [6].

Conductoarele îngropate sunt subdivizate în segmente de lungimi scurte. Presupunem că există un număr de n segmente în rețea și considerăm un segment k din acest grup. Acest segment are un curent transversal (de scurgere în sol) total I_{gk} presupus distribuit uniform pe suprafața segmentului, deci curentul longitudinal în fiecare punct $u=q$ al segmentului conductor este de forma:

$$I_k(q) = a_k q + b_k \quad (1)$$

unde a_k și b_k sunt constante.

Considerăm $A_k(q)$ -potențialul magnetic vector; $E_k(q)$ -vectorul intensității câmpului electric; $V(q)$ - potențialul electric scalar în fiecare punct $u=q$ de pe suprafața conductorului k și fie $A_e(x,y,z)$, $E_e(x,y,z)$, $V_e(x,y,z)$ aceleași mărimi în punctul $M(x,y,z)$ care înconjoară sistemul. Fie E_{ek} , A_{ek} componentele vectorilor față de axa u în același punct $u=q$ al segmentului k . Dacă \underline{A}_{ik} și \underline{V}_{ik} sunt utilizate pentru a reprezenta contribuția potențialului magnetic vector și potențialului electric scalar al unui segment i asupra unui segment k atunci după integrarea între două limite $q=s$ și $q=f$ și rezultă:

$$\int_s^f \underline{Z}_k I_k + j\omega \sum_{i=1}^n \int_s^f \underline{A}_{ik} + \sum_{i=1}^n [V_{ik}(f) - V_{ik}(s)] = 0 \quad (2)$$

Cu unele simplificări uzuale se obține:

$$\underline{Z}_S \cdot \underline{I}_{kp} + \sum_{i=1, i \neq k}^n [\underline{Z}_{ik} \underline{I}_{ip}] + \underline{U}_k = 0 \quad (3)$$

ecuația sugerând existența circuitului echivalent reprezentat în figura 1 și care conține:

- Conductoare cuplate mutual, reprezentate de impedanțele mutuale care se scriu sub forma:

$$\underline{Z}_{ik} = j\omega \cdot \int_s^f \frac{A_{ik}}{I_i} \quad (4)$$

- Impedanța proprie a jumătății unui segment k , \underline{Z}_S

$$\underline{Z}_S = \left[\underline{Z}_k \frac{I_k}{2} + \underline{Z}_{kk} \right] \quad (5)$$

unde \underline{Z}_{kk} poate fi aproximată cu valoarea impedanței externe:

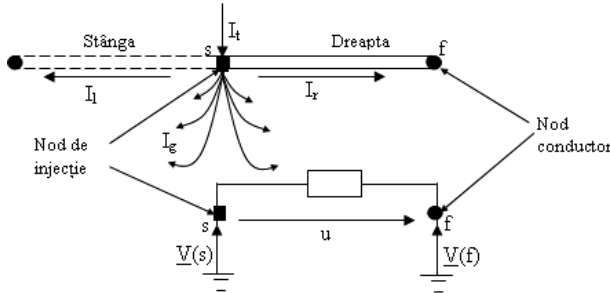
$$\underline{Z}_{kk} \cong \underline{Z}_e = \frac{j\omega\mu l}{2\pi} \cdot \left[\frac{1}{\sinh\left(\frac{l}{a}\right)} + \frac{a}{l} - \sqrt{1 + \frac{a^2}{l^2}} \frac{\gamma \cdot l}{3} + \frac{\gamma^2 \cdot l^2}{24} + \frac{\gamma^2 \cdot a^2}{8} \cdot \frac{1}{\sinh\left(\frac{l}{a}\right)} - \frac{\gamma^3 \cdot a^2 \cdot l}{20} - \frac{\gamma^3 \cdot l^3}{120} + \dots \right] \quad (6)$$

iar \underline{Z}_k poate fi aproximată cu impedanța internă;

- Este alimentat de o tensiune \underline{U}_k aplicată la extremitățile segmentului:

$$\underline{U}_k = \sum_{i=1}^n [\underline{V}_{ik}(f) - \underline{V}_{ik}(s)] \quad (7)$$

Efectele acestor simplificări asupra preciziei rezultatelor vor varia cu următorii parametri: frecvența, caracteristicile mediului, configurația geometrică a rețelei de conductoare, metode de segmentare și număr de segmente.



Precizia formulelor la frecvență joasă este excelentă și este aproape echivalentă cu precizia obținută utilizând metoda bazată pe teoria câmpului. La frecvențe foarte înalte sau în cazul regimului tranzitoriu, disiparea energiei în mediul conductor face ca cuplajul inductiv dintre conductoare să poată fi neglijat în comparație cu efectele cuplajelor prin conducție și efectele datorită existenței curenților de deplasare.

Figura1. Circuit electric echivalent al segmentului de conductor

III. IMPLEMENTAREA MODELELOR MATEMATICE DE CALCUL ÎN ALGORITMI NUMERICI DEDICAȚI STUDIUL COMPORTĂRII UNEI REȚELE DE CONDUCTOARE ÎNGROPATE

Rețeaua de conducte și conductoare din sol poate fi modelată ca o structură de secțiuni cilindrice; datorită faptului că secțiunea transversală a acestora este mult mai mică decât lungimea de undă este validă aproximația: curentul circulă paralel cu axa segmentului. Din punct de vedere matematic, aceasta reprezintă reducerea integralelor de suprafață la integrale curbilinii. Relația de bază pentru determinarea distribuției de curent este condiția de frontieră la suprafața conductorului. Intensitatea câmpului electric total este:

$$\bar{E}_T = \bar{E}_i + \bar{E}_s \quad (8)$$

unde E_i este câmpul incident iar E_s este câmpul reflectat datorat curenților induși în structura conductei.

Câmpul reflectat poate fi exprimat în funcție de curentul indus sub forma:

$$\bar{E}_s = -j\sqrt{j\omega\mu/\sigma} \cdot \left[\gamma \cdot L \cdot \bar{I} + (1/\gamma)\nabla\nabla(L \cdot \bar{I}) \right] \quad (9)$$

unde:

$$L \cdot \bar{I} = \int_l \bar{I} \cdot \frac{e^{-j\gamma R}}{4\pi R} \cdot dl,$$

cu R – distanța dintre punctul de referință și punctul de integrare (punctul inițial); $\eta = \sqrt{j\omega\mu/\sigma}$ - impedanța mediului exterior (120π pentru vid); γ - constanta de propagare.

Înlocuind în (9), se obține o ecuație integrală în care curentul este cantitatea necunoscută. Integrarea se face în lungul întregii structuri și se poate scrie:

$$L \cdot \bar{I} = \sum_{n=1}^N \int_{\Delta l_n} I_n \cdot \frac{e^{-j\gamma R}}{4\pi R} \cdot dl_n, \quad (10)$$

ecuația integrală inițială fiind redusă la o ecuația matricială de forma:

$$[\underline{Z}][\underline{I}] = [\underline{V}] \quad (11)$$

unde $[\underline{Z}]$ este matricea impedanță care descrie interacțiunile electromagnetice dintre secțiuni iar $[\underline{V}]$ este matricea coloană a tensiunilor induse în secțiuni datorită excitațiilor electromagnetice exterioare. Dacă matricea impedanță nu este rău condiționată, atunci rezolvarea numerică a sistemului devine foarte simplă, iar problema se poate considera rezolvată [7], [8]. Dacă numărul de condiționare este mare se aplică un algoritm iterativ propriu de rezolvare care să țină seama de caracterul rău condiționat al sistemului care apare în modelul matematic creat.

După determinarea curenților induși, sarcina indusă pe suprafața structurii conductive poate fi determinată din relația:

$$\rho_s = \frac{1}{j\omega\pi} \cdot \frac{I_n - I_{n+1}}{l_n a_n + l_{n+1} a_{n+1}} \quad (12)$$

unde a_n și l_n sunt raza, respectiv lungimea segmentului de conductor n . La joncțiunea dintre cel puțin trei conductoare, ecuația devine puțin mai complicată, dar ideea generală este aceeași. În final, câmpul electric normal la suprafața structurii conductoare este:

$$E_{\text{normal}} = \frac{\rho_s}{\epsilon_0} \quad (13)$$

Ținând cont de relația câmpului electric reflectat, potențialul magnetic vector devine, conform notațiilor din figura 2:

$$\bar{A} = \frac{\mu}{4\pi} \cdot \sum \bar{I}_n \int_{\Delta l_n} \frac{d\bar{y}'}{\sqrt{\bar{x}^2 + \bar{z}^2 + (\bar{y} - \bar{y}')^2}} dl = \frac{\mu}{4\pi} \cdot \sum \bar{I}_n \cdot \ln \frac{\bar{y} + \Delta l_n / 2 + D_1}{\bar{y} - \Delta l_n / 2 + D_2} \quad (14)$$

unde:

$$D_3 = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{z}^2 + (\bar{y} - \bar{y}')^2}; \quad D_2 = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{z}^2 + (\bar{y} - \Delta l_n / 2)^2}; \quad D_1 = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{z}^2 + (\bar{y} + \Delta l_n / 2)^2} \quad (15)$$

Potențialul electric scalar este:

$$\nabla V_n(x) = \frac{\bar{x}}{4\pi(\bar{x}^2 + \bar{z}^2)} \cdot \left(\frac{\bar{y} - \Delta l_n / 2}{D_2} - \frac{\bar{y} + \Delta l_n / 2}{D_1} \right) \quad (16)$$

$$\nabla V_n(y) = \frac{1}{4\pi} \cdot \left(\frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_2} \right) \quad (17)$$

$$\nabla V_n(z) = \frac{\bar{z}}{4\pi(\bar{x}^2 + \bar{z}^2)} \cdot \left(\frac{\bar{y} - \Delta l_n / 2}{D_2} - \frac{\bar{y} + \Delta l_n / 2}{D_1} \right) \quad (18)$$

Câmpul magnetic reflectat se determină prin aplicarea operatorului rotor relației $\bar{E}_s = -j\omega\bar{A} - \nabla V$:

$$\bar{B}_s = \frac{-\mu}{4\pi} \cdot \int \left(\bar{I}(l) \times \frac{\bar{r} - \bar{r}'}{R^2 |\bar{r} - \bar{r}'|} \right) dl \quad (19)$$

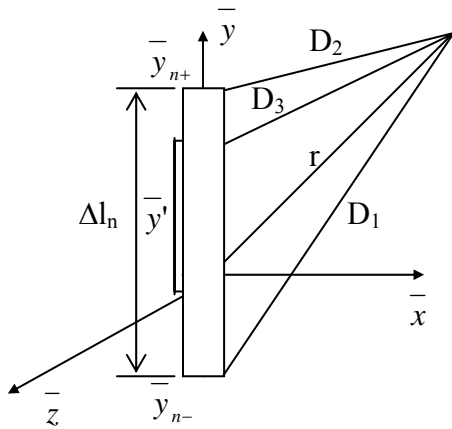


Figura 2. Călea de integrare

IV. ETAPELE MODELULUI MATEMATIC PE BAZA CĂRUIA SE DEZVOLTĂ ALGORITMIILE SOFTWARE

Primul pas este calcularea distribuției curentului în sistemul de conductoare din pământ ca răspuns la injecția de curent în puncte arbitrare din rețeaua de conductoare pentru diferite frecvențe [9]. Problema se rezolvă în doi pași:

primul constă în determinarea soluției pentru un mediu conductor nemărginit (infini extins); al doilea pas este determinarea soluției atunci când se ia în considerare efectul suprafeței de separație aer – sol (semispațiu conductor). Rețeaua de conductoare este subdivizată într-un număr de segmente conductoare scurte fictive [10], poziția unui punct pe axa unui segment este definită de vectorul r iar a unui punct de pe suprafața S a unui segment, de vectorul r . Vectorul \vec{t} reprezintă versorul de-a lungul axei segmentului și vectorul t reprezintă versorul axial tangent la suprafața segmentului [11], [12]. În caz general, câmpul electromagnetic total (E,H) în pământ este considerat ca fiind egal cu suma câmpului incident (E^i, H^i) generat de sursele independente și a câmpului reflectat (E^s, H^s) generat de sursele induse (curenți și sarcini) în rețeaua de conductoare de către câmpurile incidente. Expresia curenților induși este dată prin scrierea condițiilor de frontieră (condițiile la suprafața de separație) pentru componenta tangențială a câmpului electric la suprafața segmentului conductor. Aproximația de *conductor filiform* nu implică faptul că grosimea segmentului conductor este neglijată din moment ce condițiile de frontieră sunt aplicate la suprafața fiecărui segment conductor. Datorită acestei aproximații, ecuația are nevoie doar de componenta axială a câmpului electric la suprafața segmentului conductor:

$$\vec{t} \cdot (\vec{E}^i + \vec{E}^s) = 0 \quad (20)$$

Câmpul electric reflectat $E^s(r)$ la un punct r produs de un curent electric axial $I_1(r')$ și o sarcină $\sigma_1(r')$, se poate exprima sub forma:

$$\vec{E}^s(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi j \omega \epsilon_1} (\nabla \nabla \cdot \omega^2 \mu_1 \epsilon_1) \int_1 \vec{t}' \cdot I_1(\vec{r}') \cdot g_1(\vec{r}, \vec{r}') d\vec{l}' = \frac{1}{4\pi j \omega \epsilon_1} (\Delta^2 - \gamma_1^2) \int_1 \vec{t}' \cdot I_1(\vec{r}') \cdot g_1(\vec{r}, \vec{r}') d\vec{l}' \quad (21)$$

unde integrarea se face de-a lungul axei l a segmentului de conductor, iar g_1 este funcția Green pentru un mediu infini extins [13].

Modelul matematic rezultat din înlocuirea relației (20) în (21) furnizează ecuația integrală a câmpului:

$$\vec{t} \cdot \vec{E}^i = - \frac{j \omega \mu_1}{4\pi} \int_1 I_1(\vec{r}') \cdot G_1(\vec{r}, \vec{r}') d\vec{l}', \quad (22)$$

unde G_1 este funcția diadică Green pentru câmpul electric la r dat de un curent elementar la r' :

$$G_1(\vec{r}, \vec{r}') = \left[\frac{1}{\gamma_1^2} (\vec{t}' \cdot \nabla) (\vec{t} \cdot \nabla) - \vec{t} \cdot \vec{t}' \right] \cdot \underbrace{\frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \cdot e^{-\gamma_1 |\vec{r} - \vec{r}'|}}_{g_1(\vec{r}, \vec{r}')} \quad (23)$$

Următorul pas în dezvoltarea modelului matematic este evaluarea câmpului electric (dat de distribuția de curent) în puncte de observație arbitrare. Tensiunea dintre două puncte 1 și 2 de-a lungul drumului l_{12} , în caz general, este:

$$U_{12} = \int_{l_{12}} \vec{E} \cdot d\vec{l} = (V_1 - V_2) - \frac{\partial}{\partial t} \int_{l_{12}} \vec{A} \cdot d\vec{l} \quad (24)$$

unde V_1 și V_2 sunt valorile potențialului electric scalar în punctele 1 și 2, iar A este potențialul magnetic vector.

Pentru sistemul nostru de conductoare, conectate sau deconectate, câmpul electric poate fi calculat prin suprapunerea contribuțiilor câmpurilor generate de fiecare segment de conductor. Influența interfeței aer - sol se ia în considerare prin aplicarea metodei imaginii modificată. Prin această aproximare, analiza se reduce la studiul unui spațiu omogen, fie sol fie aer, depinzând de poziția punctului de observație. Distribuția curentului axial în rețea se aproximează printr-o combinație liniară de M funcții treaptă, în general, curentul $I(l)$ în punctul l în rețeaua de conductoare este dat de relația:

$$I(l) = \sum_{i=1}^M c_i \cdot F_i(l) \quad (25)$$

unde $c_i = I_i$ pe segmentul i și $c_i = 0$ în rest iar $F_i(l) = 1$ pe segmentul i și zero în rest.

Dacă considerăm distribuția de curent din relația (21) pentru funcții de dezvoltare constante, câmpul electric $E(r)$ poate fi calculat, în fiecare punct dat de vectorul de poziție r în sol, prin însumarea contribuțiilor date de curenți în fiecare segment:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi j \omega \epsilon_1} \sum_{n=1}^N I_n \left(\frac{\partial^2}{\partial l^2} - \gamma_1^2 \right) \int_{\Delta l_n} \vec{t}' \cdot g(\vec{r}, \vec{r}') d\vec{l}' \quad (26)$$

unde g este funcția Green pentru semispațiul conductor. În puncte foarte apropiate de suprafața unui electrod, se utilizează o expresie aproximativă pentru a evita instabilitatea numerică:

$$E_{1\rho} \cong \frac{1}{2\pi j \omega \epsilon_1 \rho} \cdot \frac{\partial I(l)}{\partial l} \quad (27)$$

unde $E_{1\rho}$ este componenta normală a câmpului electric direct iar ρ este distanța radială de la axa segmentului. Densitatea curentului de scăpări poate fi evaluată ca fiind produsul dintre componenta normală a câmpului electric la suprafața unui conductor îngropat și conductivitatea solului:

$$J_1(\vec{r}) = E_\rho(\vec{r}) \cdot \sigma_1. \quad (28)$$

Evaluarea distribuției curentului axial (longitudinal) poate fi calculată din sistemul de ecuații matriciale $[Z][I]=[V]$, unde elementele matricei coloană $[I]$ sunt curenții necunoscuți iar elementele matricei $[Z]$ exprimă toate interacțiunile electromagnetice mutuale între diferite componente ale rețelei de conductoare (segmente conductoare), elementele matricei $[V]$ sunt în legătură cu excitația [14].

Tensiunea de-a lungul segmentului i este suma contribuțiilor curenților din fiecare segment:

$$\underline{V}_i = I_1 Z_{i1} + I_2 Z_{i2} + \dots + I_N Z_{iN} \quad (29)$$

iar Z_{im} corespunde, în teoria circuitelor, cu impedanța unui circuit deschis. În teoria câmpului electromagnetic, se numește impedanță generalizată și reprezintă interacțiunile electromagnetice dintre segmente, depinzând de geometria rețelei de conductoare îngropate, de frecvența de excitație și de caracteristicile mediului. În cazul conductoarelor fără pierderi, valoarea lui \underline{V}_i din (25) este zero iar tensiunea \underline{V}_n se exprimă ca produsul dintre componenta tangențială a câmpului electric pe suprafața unui segment la un punct în centrul segmentului și lungimea lui:

$$\underline{V}_n = -\Delta l_n \cdot \vec{t}(\vec{r}_n) \cdot \vec{E}^i(\vec{r}_n) = \sum_{m=1}^N I_m \left\{ \frac{\Delta l_n j \omega \mu_1}{4\pi} \int_{\Delta l_m} G(\vec{r}_n, \vec{r}'_m) dl \right\} \quad (30)$$

unde Δl_n , Δl_m reprezintă lungimile segmentelor n și m , iar funcția Green este:

$$G(\vec{r}, \vec{r}') = G_1(\vec{r}, \vec{r}') - G_1(\vec{r}, \vec{r}') + G_s(\vec{r}, \vec{r}') \quad (31)$$

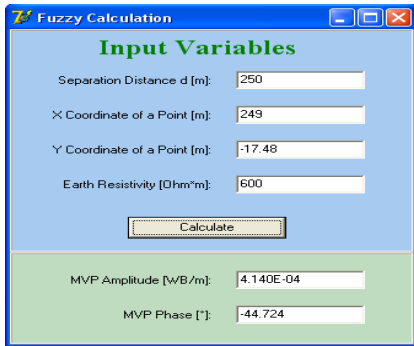
Primii doi termeni din expresie se pot determina ușor, dar termenul de corecție G_s (integrala Sommerfeld) trebuie integrat numeric; problema care se pune fiind evaluarea integralelor semiinfinite complexe lucru rezolvat în cadrul Obiectivului 1/2008.

Distribuția de curent pe întreaga rețea de conductoare poate fi privită ca o distribuție de dipoli suprapuși, singura excepție fiind segmentul care conține punctul de injecție unde este plasat un monopol. Distribuția de curent este calculată ca răspuns la curentul injectat și duce la o ecuație matricială $[Z][I]=[V]$, iar sistemul de ecuații cerut este:

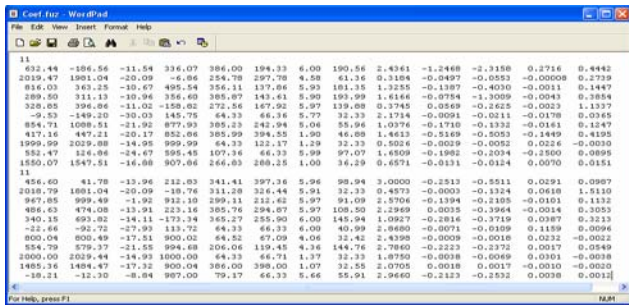
$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2N} \\ Z_{31} & Z_{32} & \dots & Z_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{N1} & Z_{N2} & \dots & Z_{NN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Z_{10} I_S \\ -Z_{20} I_S \\ -Z_{30} I_S \\ \vdots \\ -Z_{N0} I_S \end{bmatrix} \quad (32)$$

unde Z_{mn} sunt elementele matricei impedanțelor generalizate proprii și mutuale, iar termenii din dreapta ($-Z_{k0} I_S$) reprezintă energizarea conductoarelor (Z_{k0} , $k = 1, 2, \dots, N$ sunt impedanțele mutuale dintre cei N dipoli și monopolul sursă care injectează curentul de excitație), [15]. Matricea $[Z]$ este simetrică și deci trebuie evaluate numai jumătate din elemente, fapt ce contribuie la creșterea eficienței de calcul a acestei metode. Integrala din definiția impedanței mutuale Z_{mn} poate fi transformată în integrale cu termeni exponențiali care pot fi rezolvate fără integrare numerică. Funcțiile sinusoidale de dezvoltare pot aproxima mai bine curentul de-a lungul segmentelor de conductoare decât aproximările prin funcții constante treaptă, deci rezultă un număr mai mic de segmente și automat un număr mai mic de ecuații în sistemul S .

V. REALIZAREA UNUI SOFTWARE DE REZOLVARE A PROBLEMELOR DE INTERFERENȚĂ ELECTROMAGNETICĂ DINTRE LINIILE ELECTRICE AERIENE ȘI CONDUCTELE METALICE SUBTERANE



Se realizează implementarea, pe baza algoritmilor dezvoltăți a unui program software creat în mediul de programare Delphi intitulat de autori *Fuzzy Calculation*, pe un studiu de caz a unei probleme de interferență electromagnetică LEA IT – CM, [16], [17]. De asemenea, autorii propun o abordare nouă a problemei folosind rețele neuronale implementând diferite arhitecturi constructive pentru rezolvarea problemei de interferență electromagnetică. Se estimează erorile rezultatelor obținute cu rețele neuronale comparând cu rezultatele furnizate de software și cu cele determinate prin intermediul MEF. În final, sunt prezentate avantajele aduse de aplicarea softwareului și a rețelelor neuronale în studiul problemelor de interferență electromagnetică LEA IT – CM. Pentru o implementare mai ușoară s-a recurs la crearea a două FLS-uri pentru calculul modului, respectiv a



unghiului potențialului magnetic vector (PMV) care să aibă drept mărimi de intrare distanța de separație dintre LEA și CM, rezistivitatea solului și coordonate punctului în care se dorește determinarea PMV. Elementele de bază ale celor două FLS sunt: interfața de fuzzyficare a mărimilor de intrare, baza de legi fuzzy care definesc sistemul, motorul fuzzy și interfața de defuzzyficare a mărimilor de ieșire. Pe baza unui set de date prezentat în [18], [19] s-au antrenat cele două FLS-uri constatându-se că ambele FLS-uri atât cel pentru calculul modului cât și cel pentru calculul fazei PMV au nevoie de 11 legi fuzzy

pentru a îndeplini scopul propus. Folosind acești parametri s-au implementat cele două FLS-uri într-un program software creat în mediul de programare Delphi intitulat *Fuzzy Calculation*. Programul preia de la utilizator cei patru parametri de intrare a FLS. Pe baza acestor mărimi de intrare programul calculează modulul și faza PMV în punctul dorit prin intermediul FLS-urilor descrise. După efectuarea calculelor aferente, soluțiile celor două FLS sunt returnate utilizatorului în câmpurile corespunzătoare modului și fazei PMV. Pentru calculul modului și a fazei PMV corespunzător mărimilor de intrare furnizate de utilizator s-a transpus în linii de cod motorul fuzzy și legile care descriu cele două FLS. Liniile de cod astfel obținute și apelate după validarea mărimilor de intrare la apăsarea butonului „Calculate” de către utilizator.

După implementarea celor două FLS în programul software *Fuzzy Calculation* și verificarea acestuia pentru perechea de mărimi de intrare – ieșire dorită cu care s-au testat cele două FLS-uri, s-a trecut la studiul soluțiilor furnizate de program pentru seturile de date de antrenare. În urma trecerii prin program a setului de date cu care s-a făcut antrenarea celor două FLS, rezultatele obținute au fost stocate. Abaterile absolute dintre valorile modului, respectiv a fazei PMV obținute prin intermediul programului *Fuzzy Calculation* (prin FLS) față de cele furnizate de FEM s-au reprezentat sub forma unor grafice tip bara din figura 3 [20].

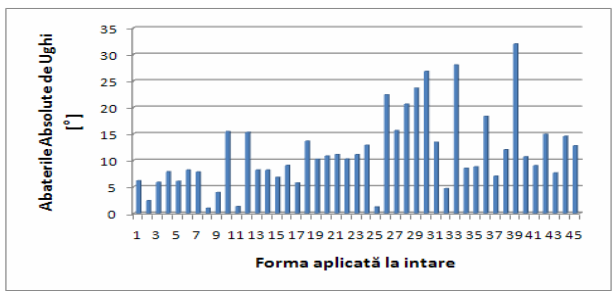
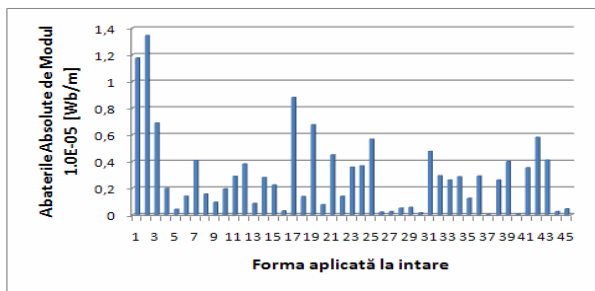


Figura 3. Abaterile absolute ale soluțiilor furnizate pentru calculul modului / fazei PMV

Deci se poate spune că metoda prezentată utilizând FLS pentru calculul modului PMV este una eficientă. Un atu în plus pentru utilizarea aceste metode este timpul scurt de calcul. Rezultate sunt determinate instantaneu de către program, singurul inconvenient ar fi timpul de antrenare a FLS în care s-a determinat numărul de legi de antrenare

necesar și parametrii pentru aceste legi fuzzy. Figura de mai sus prezintă și erorile absolute apărute la determinare fazei PMV prin intermediul FLS implementat de autorul lucrării de față în programul software *Fuzzy Calculation*. Din păcate acest FLS nu se dovedește la fel de eficient ca și cel pentru calculul modulului PMV. Deși în majoritatea cazurilor eroarea absolută este de doar 5÷10 grade, în anumite cazuri depășește chiar 25÷30 de grade. Soluția care s-ar putea propune pentru a reduce această eroare de determinare a fazei PMV este creșterea numărului de legi fuzzy din componența acestui FLS. În continuare se vor prezenta în figurile 4 și 5 doar câteva dintre arhitecturile de rețele neuronale pentru care s-au obținut soluții satisfăcătoare pentru calculul modulului și fazei PMV în comparație cu rezultatele furnizate de FEM.

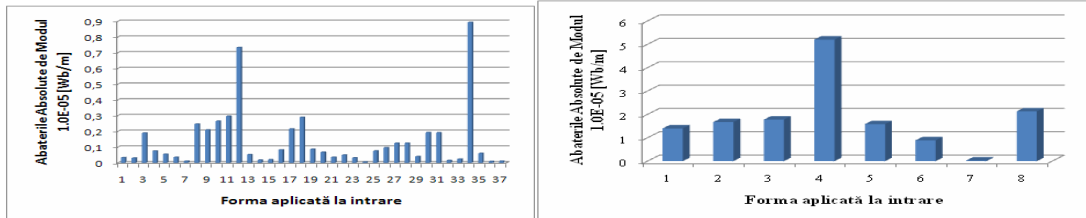


Figura 4. Abaterile absolute ale modulului pentru setul de date de antrenare / testare

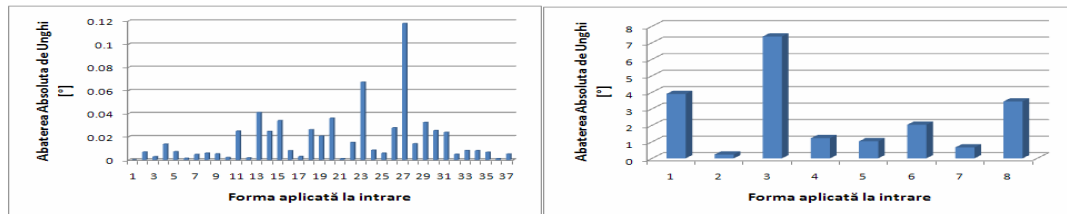


Figura 5. Abaterile absolute ale fazei pentru setul de date de antrenare / testare

Din cele prezentate se poate observa cu ușurință că rețelele neuronale pot fi o alternativă fiabilă la FLS în cazul studiului interferențelor electromagnetice LEA IT – CM pentru diferite geometrii constructive. În urma implementării rețelelor neuronale se deduc următoarele avantaje ale rețelelor neuronale: sunt ușor de implementat și de modificat corespunzător unor noi probleme studiate; furnizează soluții de o acuratețe mărită într-un timp redus (instantaneu), doar procesul de antrenare al acestora luând un timp mai îndelungat dar și acesta durează mai puțin de 1 min. Ca urmare pentru rezolvarea problemelor de interferență electromagnetică LEA IT – CM în cazul unor geometrii constructive variabile într-un timp de calcul cât mai redus și cu o acuratețe mărită se poate apela la FEM, cu care să se calculeze un prim set de date pe baza cărora mai apoi folosind rețelele neuronale să se soluționeze problema studiată pentru restul geometriilor constructive [19], [20].

VI. VERIFICARE CALITĂȚII IZOLAȚIEI UNEI CONDUCTE DE GAZ CU AJUTORUL UNEI STAȚII MOBILE DE PROTECȚIE CATODICĂ MĂSURÂNDU-SE POTENȚIALELE INDUSE CONDUCTA-SOL PRIN INTERMEDIUL UNUI ELECTROD DE Cu/CuSO_4

Liniile de înaltă tensiune induc în conductele de transport gaze naturale aflate în vecinătatea lor curenți sinusoidali. Dacă din acest semnal este drenată spre sol componenta pozitivă a sinusoidei, componenta negativă se suprapune peste semnalul injectat de stația de protecție catodică și determină o scădere a potențialului conductă-sol. Astfel protecția catodică devine mai eficientă numai pe baza semnalului indus în conductă de liniile LEA, semnal a cărui componentă pozitivă este drenată [21]. În ultima etapă a anului 2010 echipa din cadrul acestui proiect își propune realizarea unui dispozitiv care cuplat între conductă și o priză de pământare să dreneze curenții induși de liniile de înaltă tensiune în conductele de transport gaze naturale.

Măsurarea potențialului conductei s-a realizat prin intermediul unui electrod de Cu/CuSO_4 cu ajutorul unor aparate de măsură specializate în protecția catodică [22].

Măsurătorile de potențial sunt de tip P_{ON} când stația de protecție catodică este pornită cât și de tip P_{OFF} când stația de protecție catodică este oprită. Măsurările în OFF ale conductei se fac la nu mai mult de 1 secundă de la întreruperea stației. Măsurările de potențial de-a lungul conductei se fac la prizele de potențial între două stații de protecție catodică tactate simultan. Dispozitivele de tactare vor avea timpii ON/OFF de 12/3 secunde. Măsurarea potențialului în zonele în care este detectată prezența curenților de dispersie poate da informații asupra naturii acestor curenți. Zonele în care se detectează curenții de dispersie se consideră a fi zone în care corозиunea conductei este intensă. Pentru măsurarea

potențialelor E_{ON} și E_{OFF} și a $E_{IR free}$ pe două conducte de tranzit în dreptul unei stații de protecție catodică s-a folosit un aparat tip MODATA 2 utilizându-se metoda de măsurare cu 3 electrozi, [23]. Timpii de tactare au fost de 12 s ON și 3 s OFF. Injecția de semnal pentru identificarea traseului de conductă a fost asigurată de un generator de ton AF UNIT 2000 generându-se și o serie de semnale considerate a fi perturbatoare care au fost drenate către sol prin dispozitivul de drenaj a curenților de dispersie. Potențialele au fost măsurate la priza de potențial din dreptul stației de protecție catodică și se observă, figura 6:

- Modificarea potențialului E_{OFF} al primei conducte de tranzit, dar potențialul DC (măsurat în curent continuu) este modificat cu doar cu 47 mV

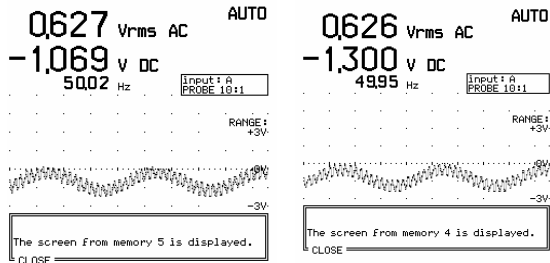


Figura 6. Măsurătorile la priza de potențial

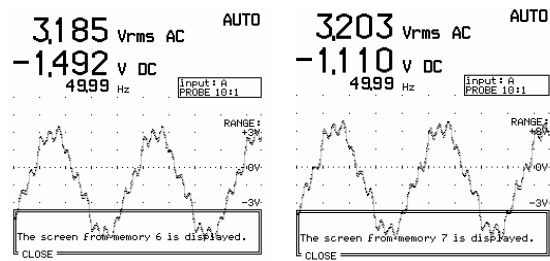


Figura 7. Măsurătorile pe a doua conductă

- Modularea peste purtătoarea de 50 Hz a semnalului de identificare a celei de-a doua conducte este de 491 Hz
- Potențialul E_{ON} al primei conductei este de asemenea influențat de injecțiile de semnal în cea de-a doua conductă.

Potențialele E_{ON} și E_{OFF} pe a doua conductă pe care s-a montat stația de protecție catodică și pe care s-a injectat semnalul de identificare conductă sunt prezentate în figurile alăturate observându-se, figura 7:

- Modificarea potențialului E_{OFF} al conductei în sensul că valoarea efectivă a potențialului conductă –sol, V_{rms} crește cu 170 mV iar potențialul DC (măsurat în curent continuu) este modificat cu doar cu 34 mV
- Modularea peste purtătoarea de 50 Hz a semnalului de identificare a conductei de 491 Hz
- La pornirea stației de protecție catodică V_{rms} pe a doua conductă scade.

VII. BIBLIOGRAFIE

- [1]. Dawalibi, F. *Computerized analysis of power systems and pipelines proximity effects*. PWRD-1, No2, April 1986, pag. 40-47.
- [2]. Kirkpatrick, E. *Basic Concepts of Induced AC Voltages on Pipelines*. Material Performance, Vol.24, No. 7, July 1997, pag. 14-18.
- [3]. Haubrich, H., Flechner, B., Machcynski, W. *An Universal Model For the computation of the Electromagnetic Interference on Earth Return Circuits*. IEEE PWDR, Vol.9, No. 3, July 1994, (prop).
- [4]. Heimbach, M. *Grounding system analysis in transients programs applying electromagnetic field approach*. PWRD, Jan. 1997, pag. 186-193.
- [5]. Southey, R., Dawalibi, F. *Computer Modeling of AC Interference Problems for the Most Cost Effective Solutions*. 53rd Annual Conference in Corrosion, NACE 98, California, March 22-27, 1998, pag 68-79.
- [6]. Dawalibi, F. *Analysis of electrical interference from power lines to gas pipelines-Part II-Parametric analysis*. PWRD-5, No1, Jan 1990, pag. 415-421.
- [7]. Magnuson, P. et all. *Transmission Lines and Wave Propagation*. CRC Press USA, ch. 10, 11, 2001.
- [8]. Dan D. Micu, I. Lingvay, C. Lingvay, L. Darabant, A. Ceclan, *Numerical evaluation of induced voltages in the metallic underground pipelines*, Revue Roumaine des Sciences Techniques, serie Electrotechnique et Energetique, no. 2, 2009, ISSN 0035-4066.
- [9]. Grcev, L. *Computer model for electromagnetic transients in thin wire structures above, below and penetrating the earth*. PWRD, Feb. 1991. (propunere)
- [10]. Southey, R. et all. *On the Mechanisms of Electromagnetic Interference between Electrical Power Systems and Neighboring Pipelines*. NACE 2000 T10B Symposium on DC & AC Interference, Orlando, March 26-31, 2000.
- [11]. Dan D. Micu, Radu Munteanu jr., Georgios Christoforidis, B. Manea, A. Ceclan, *Original Approaches for Solving Electromagnetic Interference Problems*, Advances in Electrical and Computer Engineering, ISI Journal, No 2-2009, pp. 82-90
- [12]. Dan D. Micu, A. Ceclan, Laura Darabant, Denisa Stet, *Analytical and Numerical Development of the Electromagnetic Interference Between a High-Voltage Power Line and a Metallic Underground Pipeline*, 6th

- International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems, ELECTROMOTION 2009, July 1-3, 2009, Lille, France.
- [13]. Menter, F. *EMTP-Model for grounding system analysis*. PWRD, Oct. 1994., pag. 1838-1849.
 - [14]. Li, Y. et all. *Electromagnetic Interference Caused by a Power System Network and a Neighboring Pipeline*"Proceedings of the 62nd Annual Meeting of the American Power Conference, Chicago, April 10-12, 2000, pag. 311-316.
 - [15]. Ametani, A. *A general formulation of impedance and admittance of cables*. -PAS-99, May/June 1980.
 - [16]. A. Al-Badi, K. Ellithy, S. Al-Alawi: *Prediction of Voltages on Mitigated Pipelines Paralleling Electric Transmission Lines Using an Artificial Neural Network*. The Journal of Corrosion Science and Engineering, Vol. 10, 29 March, 2007.
 - [17]. K.J. Satsios, D.P. Labridis, P.S. Dokopoulos: *An Artificial Intelligence System for a Complex Electromagnetic Fields Problem: Part I – Finite Element Calculations and Fuzzy Logic Development*. IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 35, No. 1, January 1999.
 - [18]. Dan D. Micu, L. Czumbil, A. Ceclan, E. Simion, Denisa Stet, Liliana Cimpan, *Neural Networks Evaluation of Electromagnetic Interferences between HV Power Lines and Underground Metallic Pipelines*, Journal of Electric and Electronic Engineer, 2009, pp. 73-79.
 - [19]. Dan D. Micu, E. Simion, L. Czumbil, D. Csala, A. Ceclan, *Neural Networks applied in Electromagnetic Interference Problems*, 6th Japanese-Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting and Nano Materials, JAPMED'06, July 27-29, 2009, Bucuresti, pp. 109-110.
 - [20]. Dan D. Micu, L. Czumbil, A. Ceclan, L. Dărăbant, *Accurate methods for solving electromagnetic interference problems between power lines and underground metallic pipelines*, 44th International Universities Power Engineering Conference, UPEC, 1-4 sept, 2009.
 - [21]. Dan D. Micu, I. Lingvay, E. Simion, *Modelarea și predicția fenomenelor de interferență în regim electrocinetic*, Ed. Electra, București, 2006.
 - [22]. Liviu Ancăș, Vlad Pavlovschi, *Mitigation of buried metallic pipelines due to 50 Hz AC influence of the high voltage overhead lines*, Acta Electrotechnica Special Issue 2rd International Modern Power System Conference, 12-14 nov. 2008, pp. 269-272.
 - [23]. ***NACE CP2 "Cathodic protection" *Technician Course Manual*, January, 2007.