

UNIVERSITATEA TEHNICĂ DIN CLUJ-NAPOCA

Contract TE_253/2010

SOLUȚII DE MODELARE, PREDICȚIE ȘI PROIECTARE CU MAXIM
DE PERFORMANȚĂ, PENTRU REDUCEREA IMPACTULUI
CURENȚILOR DE DISPERSIE ASUPRA CONDUCTELOR
METALICE SUBTERANE DE TRANSPORT GAZ

Raport Final

Termen: 19.11.2013

COLECTIV CERCETARE

Conf. Dr. Ing. *Dan Doru MICU* – **Director de proiect**

Ș.l. Dr. Ing. *Denisa ȘTEȚ*

Ș.l. Dr. Ing. Adina RĂCĂȘAN

Dr. Ing. Levente CZUMBIL

2013

CUPRINS

I. Dezvoltarea unei metode hibride generalizate pentru determinarea efectelor interferențelor inductive și conductive asupra conductelor subterane de transport gaz care împart același coridor de distribuție cu o LEA	4
I.1. Calcularea potențialului magnetic vector în fiecare punct al domeniului de interes (coridor comun linie de înaltă tensiune, LEA – conductă metalică subterană, CMS). Estimarea curenților de scurgere.....	4
I.2. Implementarea circuitului electric echivalent al problemei. Determinarea tensiunilor induse pentru fiecare secțiune a circuitului electric echivalent. Determinarea inductivităților proprii și mutuale pe baza valorilor potențialului magnetic vector.....	6
I.3. Determinarea, interpretarea și stocarea rezultatelor. Generarea rețelei de discretizare. Distribuția potențialului magnetic vector	8
II. Dezvoltarea și implementarea unor tehnici de inteligență artificială pentru rezolvarea problemelor de interferență dintre linii electrice aeriene de înaltă tensiune și conducte metalice de transport gaz. Dezvoltarea unei soluții generalizate	12
II.1. Dezvoltarea și implementarea unor arhitecturi de rețele neuronale.....	12
II.2. Determinarea arhitecturii optime a rețelelor neuronale implementate.....	14
II.3. Implementarea unei soluții alternative bazate pe logică fuzzy	15
II.4. Implementarea unei rețele neuronale generale care să determine matricea de impedanțe ..	18
II.5. Testarea și validarea metodelor implementate prin realizarea unor măsurători in-situ	20
III. Dezvoltarea unor metode de localizare și cuantificare a vârfurilor tensiunilor induse în conductele metalice care împart același coridor de distribuție cu o linie electrică aeriană	23
III.1. Circuitul electric echivalent aferent problemelor de interferență electromagnetică LEA-CM. Pentru a evalua nivelul tensiunilor și curenților induși în conductele metalice supra sau subterane, care împart același coridor de distribuție cu o LEA IT, se propune abordarea problemelor de interferență electromagnetică LEA-CM din perspectiva unui model de circuit electric echivalent.....	23
III.2. Studiul eficacității metodei propuse pentru diferite geometrii și diverse condiții de sarcină ale LEA. Proiectarea optimă a traseului comun LEA – CM pentru atenuarea tensiunilor induse .	25
III.3. Verificarea aplicabilității metodelor dezvoltate, în coridoarele comune CM-LEA prin teste și măsurători în teren	28
III.4. Implementarea unui circuit echivalent pentru modelarea procesului de coroziune a unor conducte metalice care împart același coridor de distribuție cu o linie electrică aeriană.....	30
III.5. Dezvoltarea unei metode optimizate (pe baza circuitelor echivalente dezvoltate în cadrul metodei hibride) de poziționare și legare la instalațiile de împământare a conductelor îngropate, pentru obținerea unui efect maxim de reducere a amplitudinii tensiunilor induse. Dezvoltarea unei metode de atenuare a valorilor tensiunilor induse în conductele de lungime mare. Verificarea aplicabilității metodelor de atenuare dezvoltate în coridoarele comune CM-LEA prin teste și măsurători în teren.	32

IV. Dezvoltarea și implementarea unor dispozitive de drenare controlată a curenților de dispersie induși pentru protejarea și îmbunătățirea protecției catodice a conductelor metalice subterane cu traseu comun cu o LEA.....	36
IV.1. Monitorizarea fenomenului de coroziune.....	36
IV.2. Principii de proiectare a unui dispozitiv de drenare a curenților de dispersie.....	38
IV.3. Punerea în evidență a eficienței dispozitivului.....	41
IV.4. Procedeu de predicție și monitorizare a coroziunii conductelor metalice subterane	46
V. Bibliografie	47

I. Dezvoltarea unei metode hibride generalizate pentru determinarea efectelor interferențelor inductive și conductive asupra conductelor subterane de transport gaz care împart același coridor de distribuție cu o LEA

I.1. Calcularea potențialului magnetic vector în fiecare punct al domeniului de interes (coridor comun linie de înaltă tensiune, LEA – conductă metalică subterană, CMS). Estimarea curenților de scurgere.

I.1.1 Configurația problemei studiate

Configurația sistemului pe care se dorește implementarea metodei hibride dezvoltate, este prezentată în Figura I.1 și constă dintr-un sistem format dintr-o LEA și o CMS care împart un traseu comun de lungime $l_p = 25 \text{ km}$. Într-un punct B de pe conductorul A ($l = 30 \text{ km}$ distanță față de sursă), se presupune apariția unui defect monofazat [1].

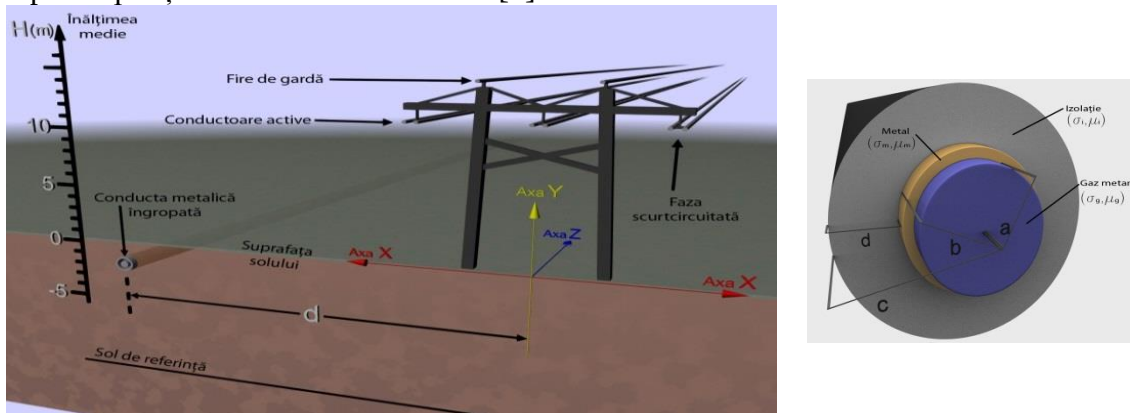


Figura I.1: Configurația problemei studiate. Sistemul LEA – CMS

Datorită existenței cuplajului inductiv, se induc curenți în conducta metalică și în sol, respectiv tensiuni la suprafața conductei și în sol. Prin neglijarea efectului de capăt, problema se poate considera bidimensională, conductoarele fiind infinit lungi [2÷4]

I.1.2 Dezvoltarea unei metode hibride generalizate pentru determinarea potențialului magnetic vector. Estimarea curenților de scurgere

În problemele în care intervin curenți de dispersie, unde sarcinile electrice și curenții de deplasare se neglijează, cu ajutorul ecuațiilor lui Maxwell se ajunge la relația [5, 6]:

$$\frac{1}{\mu} [\text{grad}(\text{div} \underline{A}) - \Delta \underline{A}] = \underline{J} \quad (\text{I.1})$$

Densitatea totală de curent ($\underline{J}$) se poate scrie ca sumă de două componente:

$$\underline{J} = \underline{J}_s + \underline{J}_e \quad (\text{I.2})$$

unde: $\underline{J}_s$ este vectorul densitate de curent al sursei iar $\underline{J}_e$ este densitatea curentului turbionar asociat potențialelor scalar și vector, după cum urmează:

$$\underline{J}_s = -\sigma \cdot \nabla \phi \cdot l_z; \quad \underline{J}_e = -j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot \underline{A} \quad (\text{I.3})$$

Trebuie menționat faptul că nici $\underline{J}_s$ și nici $\underline{J}_e$ nu pot fi mășurați fizic, ei fiind introduși din considerente matematice. Doar densitatea totală de curent poate fi măsurată și prin urmare numai ea poate furniza informații relevante legate de distribuția de curent în conductoare. Pentru cazul propus spre analiză, secțiunea transversală a sistemului investigat este situată în planul $x - y$. Ca urmare, combinând ecuațiile (I.1), (I.2) și (I.3) se obține un sistem de ecuații sub formă diferențială (I.4), care descrie problema difuziei câmpului electromagnetic pentru componentele pe direcția z ale potențialului magnetic vector $\underline{\bar{A}}_z$ și a vectorului densitate a curentului total $\underline{\bar{J}}_z$ [6, 7]:

$$\begin{cases} \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \left[\frac{\partial^2 \underline{\bar{A}}_z}{\partial^2 x^2} + \frac{\partial^2 \underline{\bar{A}}_z}{\partial^2 y^2} \right] - j\omega\sigma \cdot \underline{\bar{A}}_z + \underline{\bar{J}}_{sz} = 0 \\ -j\omega\sigma \cdot \underline{\bar{A}}_z + \underline{\bar{J}}_{sz} = \underline{\bar{J}}_z \\ \int_{S_i} \underline{\bar{J}}_z \cdot ds = \underline{\bar{I}}_i \end{cases} \quad (I.4)$$

unde $\underline{\bar{J}}_{sz}$ este densitatea de curent a sursei pe direcția z iar $\underline{\bar{I}}_i$ reprezintă valoarea efectivă a curentului ce trece prin conductorul i cu secțiunea transversală s_i . În aceste ecuații, $\underline{\bar{A}}$ și $\underline{\bar{J}}_s$ sunt necunoscute, iar termenul $\underline{\bar{J}}$ este specificat sub formă integrală:

$$\int_{S_k} \underline{\bar{J}} \cdot ds = I_k \quad (I.5)$$

unde: I_k este curentul care circulă prin conductorul c_k al secțiunii transversale s_k , $k = \overline{1, N}$.

Prin integrarea PMV, de-a lungul secțiunii transversale a fiecărui conductor, se obține ecuația matricială:

$$\underline{\bar{A}} = \sum_{k=1}^N c_k \cdot \underline{\bar{A}}_k \quad (I.6)$$

Conform [8], coeficienții c_k sunt identici cu densitățile de curent ale sursei $\underline{\bar{J}}_k$ în fiecare conductor:

$$c_k = \underline{\bar{J}}_k, \quad k = \overline{1, N} \quad (I.7)$$

Utilizând calculul matricial, se determină potențialul magnetic vector, în fiecare nod al rețelei de discretizare. Prin urmare, pentru un element oarecare e , densitatea curentului de dispersie $\underline{\bar{J}}_{ez}^e$ se determină pe baza relației:

$$\underline{\bar{J}}_{ez}^e(x, y) = -j\omega\sigma \cdot \underline{\bar{A}}_{ez}^e(x, y) \quad (I.8)$$

Densitatea curentului total pentru elementul e , notată cu $\underline{\bar{J}}_z^e$, care reprezintă suma densităților de curent a sursei pentru conductorul i ($\underline{\bar{J}}_{szi}$) și al densității curentului de dispersie pentru elementul e , se obține cu relația [9]:

$$\underline{\bar{J}}_z^e(x, y) = \underline{\bar{J}}_{ez}^e(x, y) + \underline{\bar{J}}_{szi} \quad (I.9)$$

Prin integrarea relației (I.9) pe secțiunea transversală a unui conductor, se obține curentul total care parcurge acest conductor. Pentru determinarea potențialului magnetic vector $\underline{\bar{A}}_z$ respectiv a densității de curent $\underline{\bar{J}}_{sz}$, cu ajutorul relațiilor precedente, se va dezvolta și implementa o metoda hibridă generalizată (Metoda Elementului Finit + Circuite Electrice Echivalente), care constă în

partiționarea (discretizarea) domeniului de studiu în subdomenii disjuncte (de dimensiuni finite), specificarea funcțiilor triale pe fiecare element în parte, implementarea circuitului electric echivalent și rezolvarea sistemului de ecuații corespunzător acestui circuit echivalent [8, 10].

Conform acestei metode, funcțiile necunoscute $\underline{A}_z$ și $\underline{J}_{sz}$ vor fi approximate cu ajutorul polinoamelor locale de interpolare (denumite și funcții de formă) α_i și β_i , ajungându-se la relația care exprimă potențialul magnetic vector în orice punct de coordonate (x, y) , cu condiția ca potențialul magnetic vector în noduri să fie cunoscut:

$$\underline{A}_z^{(e)} = \begin{bmatrix} 1 & x & y \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{2\Delta^{(e)}} \begin{bmatrix} (x_2 \cdot y_3 - x_3 \cdot y_2) & (x_3 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_3) & (x_1 \cdot y_2 - x_2 \cdot y_1) \\ (y_2 - y_3) & (y_3 - y_1) & (y_1 - y_2) \\ (x_3 - x_2) & (x_1 - x_3) & (x_2 - x_1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{A}_{z1}^{(e)} \\ \underline{A}_{z2}^{(e)} \\ \underline{A}_{z3}^{(e)} \end{bmatrix} \quad (I.10)$$

$\Delta^{(e)}$ este aria elementului e : $\Delta^{(e)} = \frac{1}{2}[(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)]$.

Prin aplicarea metodei Galerian, sistemul de ecuații (I.4) se poate scrie sub formă matricială permițând reprezentarea corespunzătoare a întregului domeniu al câmpului electromagnetic prin asamblarea domeniului tuturor elementelor finite definite prin relațiile prezentate în literatura de specialitate [8], ca urmare într-o problemă cu N elemente finite se va ajunge la relația globală:

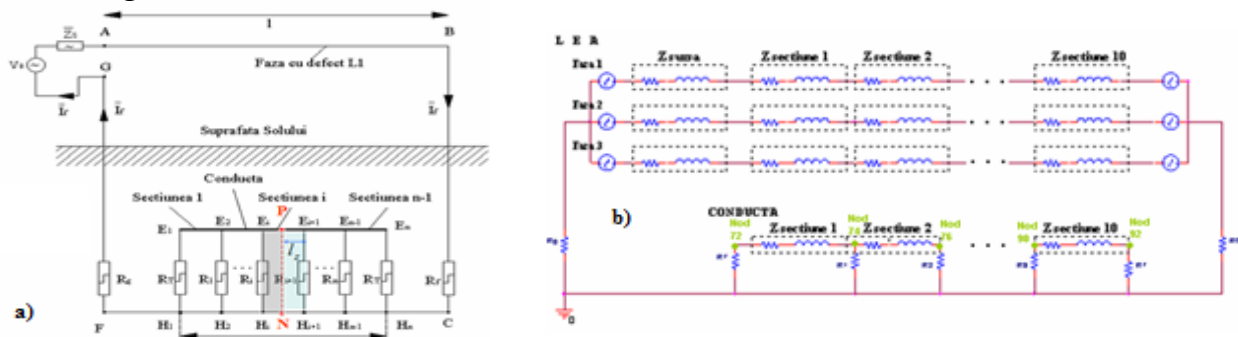
$$\begin{bmatrix} \left(\frac{1}{\mu} S + j\omega\sigma \cdot T \right) & -j\omega\sigma \cdot Q^T \\ -j\omega\sigma \cdot Q & j\omega\sigma \cdot \Omega \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{A}_z \\ \underline{g}_{sk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{I} \end{bmatrix} \quad (I.11)$$

unde matricea Q are n coloane, coloana k conținând coeficienții Newton-Cotes q pentru elementul k , Ω reprezintă aria suprafeței elementului finit iar S este matricea globală a coeficienților [11].

Formularea numerică a problemei, în această manieră, duce la o ecuație matricială complexă, unde pe lângă potențialul magnetic vector se introduc și necunoscutele $\underline{g}_{sk}$ pentru fiecare element sau grup de elemente prin care se specifică curentul total. Numeric, rezolvarea ecuației matriciale s-a făcut cu ajutorul utilitarului *MathCad*, folosindu-se metoda aproximațiilor succesive Jacobi [9].

I.2. Implementarea circuitului electric echivalent al problemei. Determinarea tensiunilor induse pentru fiecare secțiune a circuitului electric echivalent. Determinarea inductivităților proprii și mutuale pe baza valorilor potențialului magnetic vector.

Geometria propusă pentru a fi studiată s-a modelat printr-un circuit electric echivalent [12, 13] conform Figurii I.2.



**Figura I.2: a) Schematizarea sistemului studiat;
b) Implementarea PSpice a circuitului electric echivalent al sistemului studiat**

Conducta metalică subterană $E_1, E_2, \dots, E_N$ străbate un traseu paralel cu conductorul de fază A considerat cu defect, pe o distanță totală l_p . Conducta este legată la pământ prin rezistențele notate cu R_T , numite rezistențe de capăt, în vreme ce $R_1, R_2, \dots, R_N$ reprezintă rezistențele ce caracterizează zonele cu defect ale izolației. Rezistențele de scurgere se admit localizate la o distanță suficient de mare una față de cealaltă.

Contribuția curenților din celelalte secțiuni ale conductei, la apariția fluxului ϕ_1 , se neglijează, deoarece se consideră rezistențele de scurgere situate la mare distanță una de cealaltă. În plus, într-un câmp bidimensional, acest flux este dat în planul (x, y) de relația:

$$\phi_1 = A_{zp} \cdot l_1 \quad (I.12)$$

unde: A_{zp} este componenta pe direcția z a potențialului magnetic vector la suprafața conductei, iar l_1 este lungimea primei secțiuni. Pentru circuitul echivalent se poate scrie relația:

$$\underline{I}_{p1} \left(R_1 + R_T + \frac{l_1}{\sigma_p s_p} \right) - \underline{I}_{p2} \cdot R_1 + j\omega (L_{11} \cdot \underline{I}_{p1} + L_{F1} \cdot \underline{I}_F) = 0 \quad (I.13)$$

unde σ_p și s_p sunt conductivitatea respectiv secțiunea transversală a conductei metalice.

Urmând același procedeu, o relație similară ecuației (I.13) poate fi scrisă pentru fiecare din cele $(N-1)$ ochiuri de circuit, rezultând astfel un sistem de $(N-1)$ ecuații. Ca urmare, pentru ochiul de circuit i se ajunge la relația:

$$\underline{I}_{pi} \left(R_i + R_{i+1} + \frac{l_i}{\sigma_p s_p} \right) - \underline{I}_{pi-1} \cdot R_i - \underline{I}_{pi+1} \cdot R_{i+1} + j\omega (L_{ii} \cdot \underline{I}_{pi} + L_{Fi} \cdot \underline{I}_F) = 0, \quad i = \overline{2, N-1} \quad (I.14)$$

Aplicând legea inducției electromagnetice, pe ochiul de rețea ABCFGA, se ajunge la o relație care permite determinarea valorii tensiunii de fază U_0 :

$$\underline{U}_0 = \underline{I}_F (R_G + R_F + \underline{Z}_S) + \frac{\underline{I}_F \cdot l}{\sigma \cdot s} + j\omega \sum_{i=1}^{n+1} (L_{FF} \cdot \underline{I}_F + L_{Fi} \cdot \underline{I}_{pi}) \quad (I.15)$$

în care primul termen din membrul drept al ecuației, este căderea de tensiune pe elementele R_G, R_F, Z_S , iar σ, s și L_{FF} sunt conductivitatea, secțiunea transversală și inductivitatea proprie a conductorului de fază [14, 15].

Expresiile (I.12)÷(I.15) formează un sistem de ecuații care poate fi rezolvat dacă se cunosc impedanțele proprii și mutuale. Rezolvarea numerică a sistemului ecuațiilor de funcționare a circuitului echivalent s-a realizat prin metoda Gauss-Seidel, ținându-se cont de caracterul rău condiționat al matricii impedanțelor. Rezultatele au fost stocate într-o bază de date [9, 10].

Dacă se impune o anumită valoare de bază a curentului de defect prin conductorul de fază, de exemplu $\underline{I}_{Fb} = 1000A$, simultan cu un curent zero prin conductă, se calculează PMV la suprafața conductei, care apoi va fi utilizat pentru determinarea inductivității mutuale L_{F1} ; prin urmare expresiile inductivităților vor fi [5]:

$$L_{F1} = \frac{A_{zp} \cdot l_1}{\underline{I}_{Fb}}; \quad L'_{F1} = \frac{A_{zp}}{\underline{I}_{Fb}}; \quad L_{FF} = \frac{A_z l}{\underline{I}_{Fb}} \quad (I.16)$$

Pentru a calcula inductivitatea proprie, L_{ii} ($i = \overline{1, N}$) a secțiunilor conductei, se parcurge același procedeu, cu excepția că, de această dată se impune un curent de defect de valoare zero, pe conductorul de fază respectiv un curent de bază prin conductă $\underline{I}_{p1} = 1A$. Astfel se ajunge la o relație care permite calcularea inductivității proprii, pe unitatea de lungime, a primei secțiuni a conductei:

$$L'_{11} = \frac{A_{zp}}{I_{pb1}} \quad (I.17)$$

Presupunând că geometria problemei și proprietățile magnetice ale conductei precum și a conductorului de fază **A** rămân constante, inductivitățile proprii și inductivitățile mutuale, pe unitatea de lungime, a tuturor secțiunilor, se consideră egale, deci:

$$L'_{11} = L'_{22} = \dots = L'_{ii} = \dots = L'_{nn}; \quad L'_{F1} = L'_{F2} = \dots = L'_{Fi} = \dots = L'_{nn} \quad (I.18)$$

Pentru a calcula tensiunea dintre un punct de pe conductă și solul de referință, se consideră un punct *P* pe secțiunea *i* a conductei, conform Figura I.2a, care se găsește la distanța l_z față de punctul E_{i+1} . Aplicând legea inducției electromagnetice pe ochiurile de circuit $PE_{i+1}H_{i+1}NP$ și $H_iH_{i+1}E_{i+1}E_iH_i$, se obține relația de calcul a tensiunii dintre punctul *P* și solul de referință *N*:

$$\underline{U}_{PN} = \frac{\underline{I}_{pi} [l_z (R_i + R_{i+1}) - R_i l_1] + \underline{I}_{p(i+1)} R_{i+1} (l_1 - l_z) - \underline{I}_{p(i-1)} R_i l_z}{l_i} \quad (I.19)$$

Relația (I.19) este valabilă pentru secțiunile 2...*N*−2 ale conductei. Pentru prima și ultima secțiune relațiile sunt:

$$\underline{U}_{p_1N_1} = \frac{\underline{I}_1 [l_z (R_1 - R_T) - l_1 R_1] + \underline{I}_2 R_1 (l_1 - l_z)}{l_1}; \quad \underline{U}_{p_{N-1}N_{N-1}} = \frac{\underline{I}_{N-1} [l_{N-1} R_T + l_z (R_T - R_{N-2})] + \underline{I}_{N-2} R_{N-2} l_z}{l_{N-1}} \quad (I.20)$$

I.3. Determinarea, interpretarea și stocarea rezultatelor. Generarea rețelei de discretizare. Distribuția potențialului magnetic vector

Rețeaua de discretizare a geometriei studiate este prezentată în Figura I.3, și s-a generat cu ajutorul metodei elementului finit, prin intermediul programului FEMM 4.2.

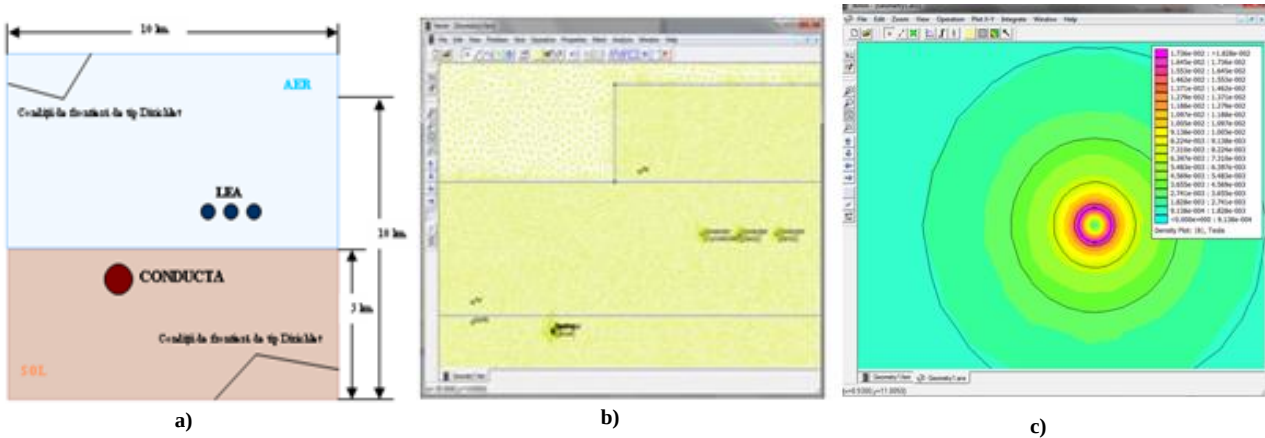


Figura I.3: **a)** Domeniul de soluții FEM; **b)** Rețeaua de discretizare; **c)** Distribuția PMV în jurul conductei.

Se consideră un pătrat cu latura de 10 km ca fiind domeniul de interes al problemei iar condițiile de frontieră impuse sunt de tip Dirichlet nule (Figura I.3a). S-a obținut o rețea de discretizare de aproximativ 25000 de elemente (Figura I.3b). Se trece apoi la determinarea valorilor potențialului magnetic vector, în jurul conductei metalice (Figura I.3c).

S-au reprezentat grafic, în programul PSpice, potențialele nodurilor de la capetele fiecărei secțiuni, obținând-se astfel variația în timp a tensiunilor induse în conductă metalică (Figura I.4a). Conform acestei reprezentări grafice, tensiunile induse sunt semnale sinusoidale, a căror amplitudine

maximă nu depășește (în condiții normale de funcționare ale LEA) valoarea de 5 V. Astfel, conform specificațiilor tehnice CEN/TS 15280 elaborate de CEN (Comitetul European de Standardizare), aceste tensiuni nu prezintă pericol de coroziune asupra conductei (valoarea maximă admisibilă fiind de 10 V, pentru rezistivități ale solului mai mari de 25 $\Omega \cdot m$).

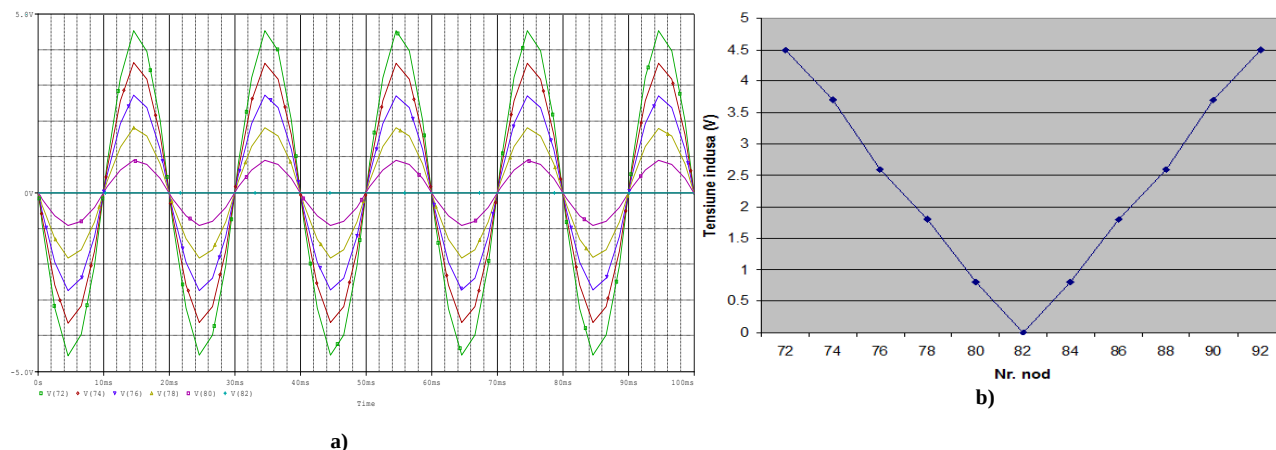


Figura I.4: a) Tensiuni induse în conductă; b) Tensiuni induse pe toată lungimea conductei (condiții normale de funcționare ale LEA)

Repartiția acestor tensiuni de-a lungul conductei, este prezentată în (Figura I.4b). Valorile maxime ale tensiunilor induse se înregistrează la capetele conductei, în timp ce valoarea de minim este situată la mijlocul coridorului comun, fiind în acord cu specificațiile tehnice din [12, 15].

Valorile curenților prin fiecare secțiune, se încadrează în intervalul 0.9÷1.8 A (Figura I.5a) și înregistrează valori maxime în secțiunile de la mijlocul coridorului comun (Figura I.5b) fiind în acord cu specificațiile tehnice din [15].

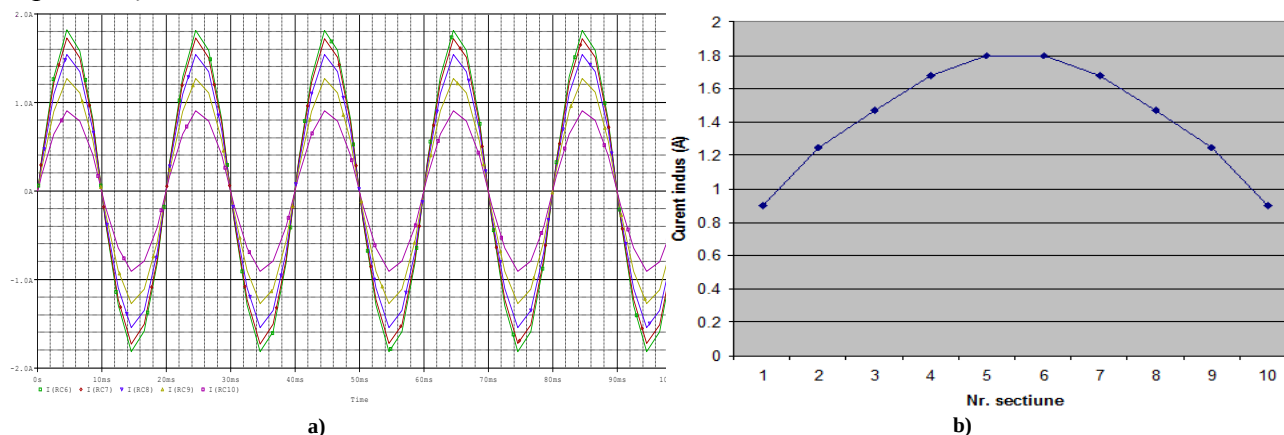


Figura I.5: a) Curenții care circulă prin secțiunile conductei; b) Curenții induși pe toată lungimea conductei (condiții normale de funcționare ale LEA)

S-a considerat un defect monofazat al LEA prin impunerea unui curent de 2000 A pe una dintre faze. Valorile potențialelor, în nodurile considerate de-a lungul conductei, au crescut considerabil (Figura I.6a) ceea ce înseamnă, pentru structura metalică, un pericol de apariție a fenomenului de coroziune. Repartiția pe toată lungimea conductei, a potențialelor înregistrate în condiții de defect monofazat, este similară cu cea obținută în cazul unei funcționări normale a acesteia, cu observația că valorile maxime înregistrate sunt considerabil mai mari decât în primul caz (Figura I.6b).

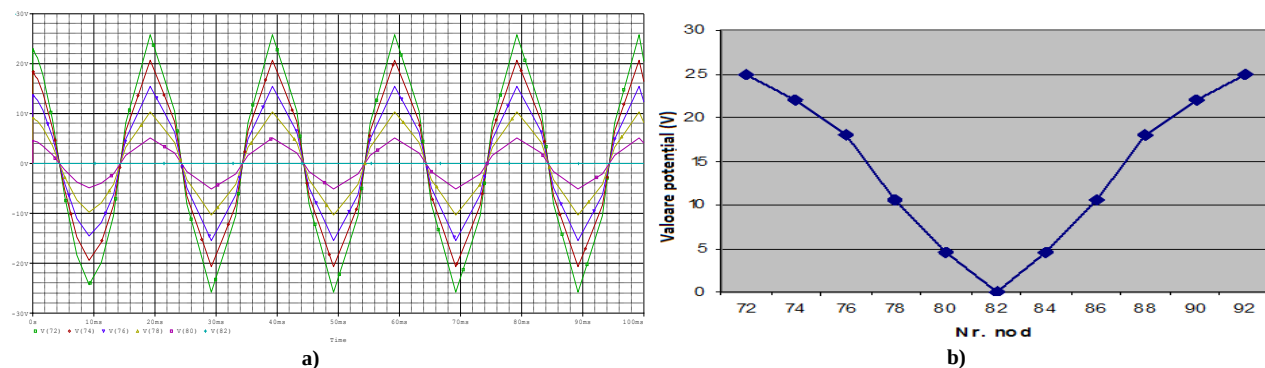


Figura I.6: a) Potențialele înregistrate în nodurile definite în prima jumătate a conductei;
b) Tensiuni induse pe toată lungimea conductei (defect monofazat al LEA)

Situația este similară și în cazul curenților prin fiecare secțiune considerată a conductei (Figura I.7a); valorile maxime înregistrate sunt de asemenea considerabil mai mari decât în primul caz și ele se înregistrează la mijlocul distanței coridorului comun de distribuție LEA-CMS, (Figura I.7b).

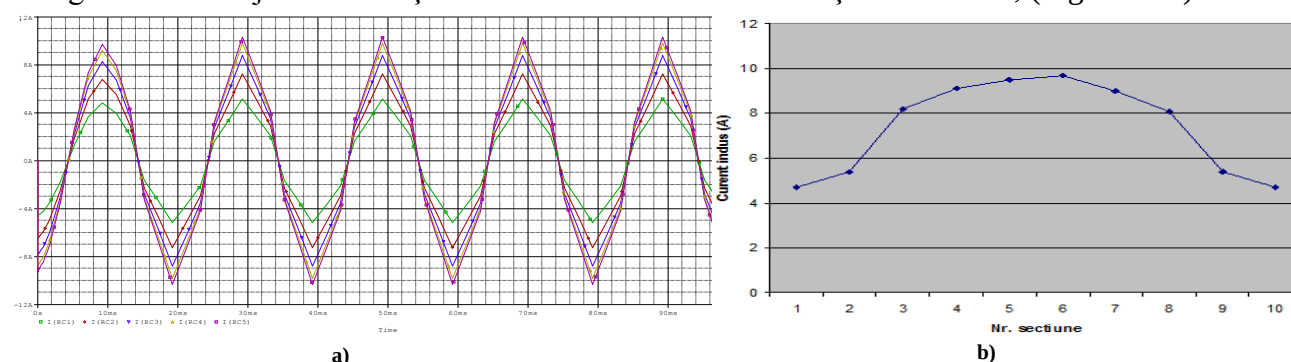


Figura I.7: a) Curenții care circulă prin secțiunile conductei; b) Curenții induși, pe toată lungimea conductei (defect monofazat al LEA)

Datorită faptului că softwarul de generare a circuitului electric echivalent permite modificarea parametrilor circuitului, este posibilă și analiza variației tensiunilor sau a curenților induși în funcție de variațiile valorilor inductivităților mutuale, a rezistențelor de scurgere, a rezistivității solului, etc. Datorită neomogenităților de material care pot să apară la nivelul conductoarelor de fază sau a conductei, apare variația inductivităților mutuale dintre conductoarele de fază și conductă, determinând modificări ale valorilor tensiunilor induse în structura metalică.

Astfel, o modificare a coeficientului de cuplaj mutual K , ceea ce reprezintă modificări ale geometriei sau proprietăților de material, conduce la o variație importantă a valorilor tensiunilor și curenților induși în structura metalică, după cum este ilustrat în Figura I.8.

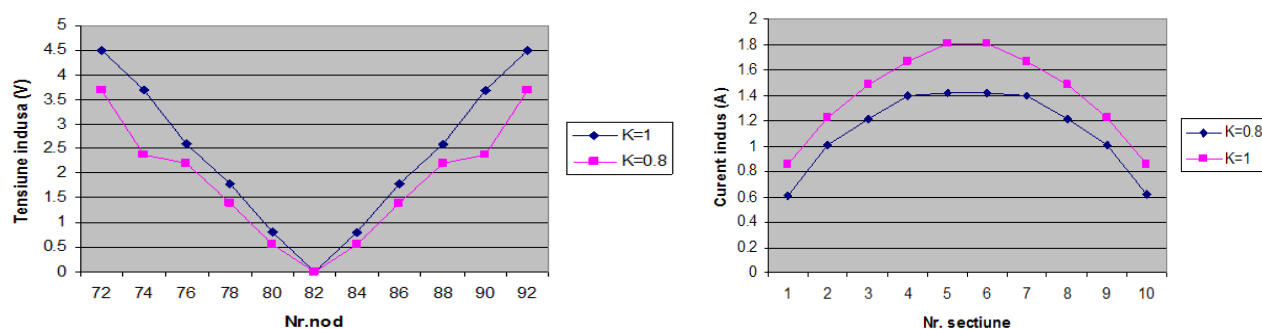


Figura I.8: Variația tensiunii și curentului indus pentru $K=1$ și $K=0.8$

O scădere a coeficientului K de la 1 la 0.8, duce la o scădere a valorilor tensiunilor induse de aproximativ 20% respectiv de aproximativ 70% în cazul curenților induși.

Pentru analizele anterioare s-a considerat conducta ca fiind omogenă, caracterizată de aceeași impedanță pe fiecare segment de studiu. Dacă pe suprafața conductei apar defecte prin degradare a izolației, ca urmare a unor factori mecanici sau electrochimici, coeficientul K nu are aceeași valoare pe fiecare segment, ceea ce duce la o modificare a repartiției tensiunilor induse în structura metalică. În Figura I.9 sunt reprezentate grafic valorilor tensiunilor și curenților induși în conductă, pentru situația în care K variază aproximativ 20% față de un K luat ca referință ($K = 0.8$).

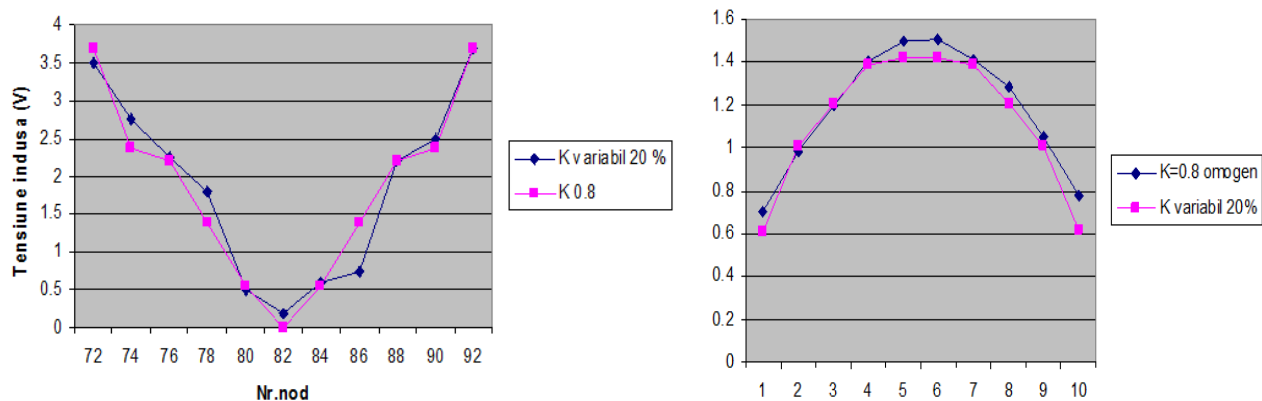


Figura I.9: Variația tensiunii și curentului indus pentru $K=0.8$ și K variabil (20%)

Considerând o conductă bine izolată (valori ale curenților induși cât mai mici) implică existența unor curenți de valori scăzute care circulă prin rezistențele de scurgere. Acest lucru se verifică în cadrul modelului propus. Pentru valori de 10Ω ale rezistențelor de scurgere, se înregistrează valori de până la 350 mA a curenților prin aceste rezistențe, iar pentru valori de 1000Ω respectiv 10000Ω (ceea ce înseamnă o izolație bună a conductei) valorile acelorasi curenți scad semnificativ (Figura I.10a).

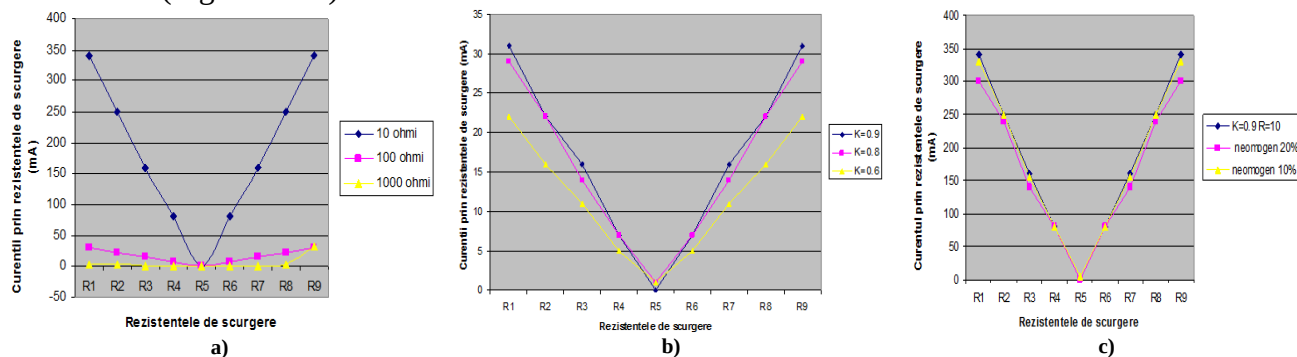


Figura I.10: Variația curenților prin rezistențele de scurgere

De asemenea, variația coeficientului K reprezintă un factor care modifică valoarea curenților prin rezistențele de scurgere, curenții care părăsesc suprafața metalică fiind cei care produc degradarea materialului. Ca urmare, cu cât valorile acestora sunt mai mici, cu atât pericolul de degradare prin coroziune scade. Figura I.10b și Figura I.10c ilustrează valorile curenților pentru coeficienți de cuplaj de 0.6, 0.8 respectiv 0.9 și o rezistență de scurgere de 10Ω , pentru o conductă omogenă (b) și neomogenă (c).

Toate rezultatele obținute prin implementare metodei hibride, s-au stocat într-o bază de date (format .rtf) care va putea fi utilizată ulterior pentru implementarea soluțiilor alternative de rezolvare a problemelor de interferență prin intermediul tehnicilor de inteligență artificială [9].

II. Dezvoltarea și implementarea unor tehnici de inteligență artificială pentru rezolvarea problemelor de interferență dintre linii electrice aeriene de înaltă tensiune și conducte metalice de transport gaz.

Dezvoltarea unei soluții generalizate

II.1. Dezvoltarea și implementarea unor arhitecturi de rețele neuronale

II.1.1 Configurația problemei studiate

Se consideră un caz particular de problemă de interferență electromagnetică LEA – CMS, problemă detaliat prezentată și studiată ca modelare hibridă în paragraful I (Raportul de activitate I [17]), respectiv diseminată în [9]. Aceasta se referă la un sistem format dintr-o LEA și o CMS care împart un traseu comun de lungime 25 km. Într-un punct B de pe faza conductoare R (aflat la 30 km distanță față de sursă), se presupune apariția unui defect de punere la pământ.

II.1.2 Abordarea problemei prin intermediul tehnicilor de inteligența artificială

Rezolvarea acestei probleme prin intermediul metodei hibride, dezvoltată și prezentată în paragraful I (Raportul de activitate I [17]), presupune evaluarea potențialului magnetic vector (PMV) în orice punct al domeniului studiat prin intermediul metodei elementului finit (FEM – finite element method), în vederea determinării ulterioare a matricei impedanțelor proprii și mutuale ce descrie cuplajul inductiv dintre LEA și CMS.

Deoarece FEM-ul presupune rediscretizarea sistemului studiat pentru fiecare nouă geometrie analizată și reluarea continuă a calculelor numerice, studiul interferențelor electromagnetice LEA – CMS pentru diferite geometrii ale sistemului prin FEM presupune un efort de calcul deosebit de ridicat. Așadar, este binevenită orice abordare a problemelor de interferență electromagnetică LEA – CMS care pornind de la un set de soluții obținute prin FEM pentru anumite geometrii constructive, să fie capabilă să deducă soluțiile unor geometrii diferite într-un timp efectiv mult mai scurt decât FEM. Astfel de metode, gândite și propuse în cadrul acestui proiect, sunt cele bazate pe aplicarea unor tehnici de inteligența artificială (AI – artificial intelligence), cum ar fi Rețele Neuronale (RN) [21] sau Logica Fuzzy (FLS – fuzzy logic sistem) [5].

II.1.3 Analiza bazei de date pentru identificarea mărimilor de intrare. Alegerea setului de date de antrenare

Pentru determinarea structurii RN de implementat, într-o primă etapă autorii au recurs, ca și modalitate de testare, la o evaluare în detaliu a bazei create și prezentate în Raportul de activitate I [17]. Baza de date aferentă acestei probleme de interferență electromagnetică conține valorile PMV evaluate cu ajutorul FEM pentru diferite configurații geometrice. În urma analizei efectuate, autorii au identificat parametrii geometrici și electrice care influențează în mod esențial valoarea PMV: d – distanța de separație LEA – CMS, în cazul practic expus aceasta poate varia între 70 m și 2000 m; ρ – rezistivitatea solului, care se variază între $30 \Omega \cdot m$ și $1000 \Omega \cdot m$; (x,y) – coordonatele punctului în care se dorește determinarea PMV, acestea fiind situate la orice poziție între 0 m și 2100 m, respectiv 0 m și -30 m.

Ca rezultat al studiului efectuat asupra acestei baze de date, autorii au selectat ca și mărimi de intrare a RN de implementat, parametrii geometrici și electrice prezentați mai sus, mărimea de ieșire care să fie returnată de RN fiind valoarea PVM, definită prin amplitudine și fază. Analiza statistică efectuată a evidențiat de asemenea că amplitudinea PMV variază pe intervalul $1 \cdot 10^{-6} \div 1 \cdot 10^{-3}$ [Wb/m], iar faza pe intervalul $-180^\circ \div 180^\circ$. Astfel, în vederea creșterii acurateții soluțiilor furnizate, s-a stabilit implementarea a două RN diferite pentru evaluarea amplitudinii și respectiv a fazei PMV. În același scop autorii au supus mărimile de intrare unei preprocesări prin care acestea sunt scalate pe intervalul de variație $[-1,1]$, prin raportare la valorile maxime corespunzătoare. În vederea antrenării RN propuse din baza de date aferentă problemei studiate și creată în cadrul Raportului de activitate I [17], s-a ales un set de 37 de perechi mărimi de intrare / date de ieșire. Tabelul II.1 prezintă aleatoriu selectiv o parte din setul de date utilizat la antrenarea RN:

Tabelul II.1: SETUL DE DATE FOLOSIT LA ANTRENAREA RN

Nr. Crt.	d [m]	x [m]	y [m]	ρ [$\Omega \cdot m$]	PMV	
					Amp. 10^{-5} [Wb/m]	Faza [°]
1	70	70	-15	30	36.1	-22.8
9	400	384.81	-7.82	70	17.2	-44.46
14	70	40	0	100	55.9	-18.53
18	1000	1022.5	0	100	7.23	-67.27
23	300	290.26	-15.8	500	35.5	-26.74
28	700	670	-22.5	700	26	-33.74
33	1500	1499.1	-17.48	900	15.6	-46.35
37	2000	2030	-5	1000	12.2	-52.73

II.1.4 Implementarea Rețelelor Neuronale

Pentru implementarea RN propuse, autorii au dezvoltat **un algoritm și un cod software (m-file)** în cadrul utilitarului *MatLab*, care să construiască și să antreneze diferite arhitecturi de RN. Alegerea utilitarului *MatLab* se justifică datorită simplității în utilizare, precum și datorită faptului că permite crearea aproape a tuturor tipurilor de rețele neuronale, începând de la perceptrone, până la arhitecturi mai complicate de tip feed-forward sau rețele recurente [22]. Funcția de interfață:

$$[NNMat] = \text{Create_MVP_NN}(\text{InPut}, \text{Target}, \text{NNType}) \quad (\text{II.1})$$

Funcția finală dezvoltată, *Create_MVP_NN*, implementează o serie de RN cu un singur strat ascuns de tip feed-forward sau layer recurent (RN recurente) în raport cu parametrul *NNType*. Funcția returnează aceste RN sub forma unei matrice ale cărei elemente sunt RN cu un număr variabil de neuroni pe stratul ascuns și diferite funcții de transfer definite după un tipar prestabilit de către cercetători.

În urma studiului literaturii de specialitate [23, 24] și a testării în prealabil a diferitelor tehnici de antrenare, s-a recurs la utilizarea tehnicii Levenberg-Marquardt care produce cele mai bune soluții, necesitând un timp de antrenare de ordinul secundelor, foarte scurt pentru setul ales. Pe baza unui alt cod software generat de către autori, acest set de date de antrenare este furnizat funcției *Create_MVP_NN* prin intermediul perechilor de date de intrare / ieșiri dorite, reprezentate de cei doi parametri *Input* și *Target*.

În scopul comparării rezultatelor obținute cu diferite RN implementate, autorii au dezvoltat **un alt algoritm software** având ca finalitate o a doua funcție *EvalMVPNN*, care să determine eroarea de calcul a soluțiilor furnizate de aceste RN. Funcția primește ca și parametri matricea de RN obținută prin intermediul funcției *Create_MVP_NN*, respectiv setul de date de antrenare și un set de testare

care nu a fost furnizat RN în cadrul procesului de antrenare. Aceste date de antrenare, respectiv testare sunt definite prin intermediul parametrilor $TrInput$, $TrTarget$, respectiv $TsInput$ și $TsTarget$:

$$[ResMat] = EvalMVPNN(NNMat, TrInput, TrTarget, TsInput, TsTarget) \quad (II.2)$$

Funcția $EvalMVPNN$ returnează eroarea absolută, respectiv procentuală medie și maximă de determinare a soluțiilor furnizate de PMV, atât pentru setul de date de testare cât și pentru cel de antrenare.

II.2. Determinarea arhitecturii optime a rețelelor neuronale implementate

Pentru **determinarea arhitecturii optime** a RN propuse, s-au **implementat diferite arhitecturi de RN** de tip feed-forward (Figura II.1a) și layer recurent (Figura II.1b) cu un singur strat ascuns, folosind un cod software dedicat, având ca interfață funcția $Create_MVP_NN$. Numărul de neuroni din straturile ascunse a fost variat de la 5 la 30, cu un pas de 5 neuroni. Funcția de transfer a stratului de ieșire a fost setată ca fiind liniară, codată prin denumirea $purelin$, iar cea a stratului ascuns a fost variată între o formă sigmoidă $logsig$, respectiv una tangentă hiperbolică $tansig$. De asemenea, funcția de performanță a RN a fost variată între mse (eroare medie pătratică), $msereg$ (eroare medie pătratică cu regularizare) și sse (eroare sumă pătratică). Ca urmare, autorii **au implementat 64 de arhitecturi** pentru ambele RN care returnează amplitudinea, respectiv faza PMV.

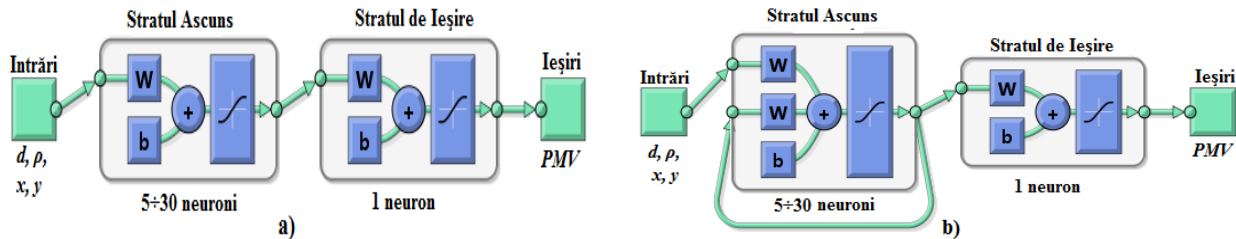


Figura II.1: Structura rețelelor neuronale implementate: a) RN feed-forward; b) RN recurentă

Scopul **implementării RN fiind determinarea PMV pentru geometrii noi**, care nu au fost evaluate în prealabil cu FEM, pentru a testa acuratețea rezultatelor furnizate de acestea, pe lângă setul de date de antrenare, s-a ales aleatoriu și un set de date de testare care nu a fost furnizat RN în cadrul procesului de antrenare. În urma **simulărilor optime** cu ajutorul funcției $EvalMVPNN$ a abaterii absolute și procentuale dintre valorile PMV furnizate de RN implementate, respectiv cele calculate cu FEM, autorii **au efectuat un studiu statistic** asupra abaterilor furnizate de cele 64 de arhitecturi studiate. Rezultatul s-a concretizat în **identificarea arhitecturilor optime** ale celor două RN propuse pentru evaluarea amplitudinii și fazei PMV [25].

II.2.1 Rezultate obținute pentru RN feed-forward

În cazul RN care determină amplitudinea PMV, arhitectura optimă s-a dovedit a fi o structură cu 10 neuroni pe stratul ascuns având ca transfer funcția $tansig$ și ca performanță funcția mse .

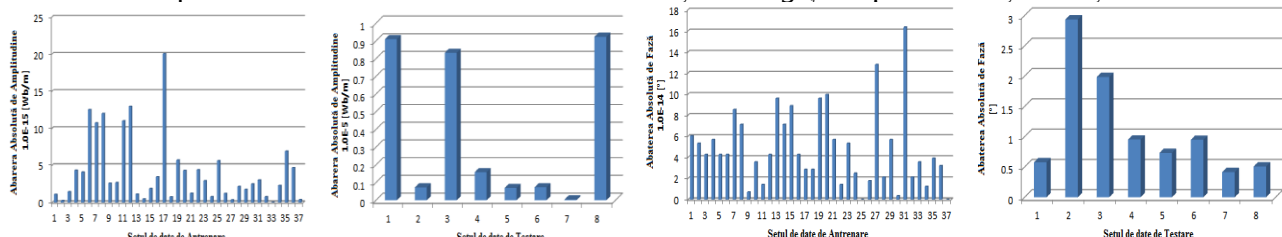


Figura II.2: Eroarea Absolută de determinare a amplitudinii și fazei PMV

Figura II.2 prezintă abaterea absolută obținută, atât pentru setul de date de testare cât și pentru cel de antrenare. Eroarea relativă medie de evaluare a amplitudinii PMV este de 0.71%. Pentru RN care determină faza PMV, arhitectura optimă s-a dovedit a fi o structură cu 5 neuroni pe stratul ascuns, având ca funcție de transfer funcția *logsig* și ca funcție de performanță funcția *sse*. În acest caz, eroarea procentuală medie de determinare a fazei PMV este de 1.19%, iar cea maximă de 5.47%.

II.2.2 Rezultate obținute pentru RN recurente (layer recurrent)

În cazul RN care determină amplitudinea PMV, arhitectura optimă s-a dovedit a fi o structură cu 10 neuroni pe stratul ascuns, având ca transfer funcția *logsig* și ca performanță funcția *mse*. Figura II.4 prezintă abaterea absolută obținută, pentru ambele seturi de date. Eroarea relativă medie de determinare a amplitudinii PMV este de 0.35%, iar cea maximă de 1.08%.

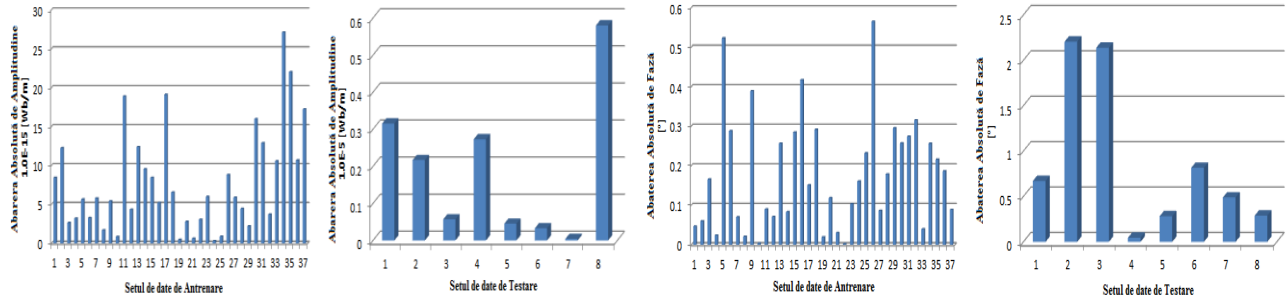


Figura II.3: Eroarea Absolută de determinare a amplitudinii și fazei PMV

Pentru RN care determină faza PMV, arhitectura optimă s-a dovedit a fi o structură cu 5 neuroni pe stratul ascuns având ca transfer funcția *tansig* și ca performanță funcția *msereg*. Eroarea relativă medie de determinare a fazei PMV este de 1.19%.

Analizând rezultatele prezentate în Figura II.2 și Figura II.3, autorii au constatat că atât RN de tip feed-forward, cât și cele de tip layer recurent furnizează soluții de o acuratețe ridicată. Cu toate că RN de tip *layer recurent* prezintă soluții de o mai mare acuratețe, acestea necesită un timp de antrenare de 3÷4 ori mai lung decât cele de tip *feed-forward*. Se sugerează utilizarea RN de tip *feed-forward* dacă setul de date de antrenare depășește 1000 de perechi de date de intrare/valori de ieșire dorite.

II.3. Implementarea unei soluții alternative bazate pe logică fuzzy

II.3.1 Implementarea unei soluții alternative bazate pe logică fuzzy

O posibilă alternativă în evaluarea PMV în orice punct al domeniului studiat ar fi **aplicarea unei tehnici de inteligență artificială bazată pe logica fuzzy** [26, 27]. Ca urmare, colectivul de cercetare implicat **propune spre testare un Bloc Fuzzy (BLF)** care primește ca și parametri direcți de intrare, distanța d de separație LEA-CMS, respectiv rezistivitatea solului ρ , iar ca parametri indirecti, distanța l dintre punctul în care se dorește evaluarea PMV și faza defectă, respectiv distanța l' dintre punctul de evaluare și CMS. Pe baza cunoștințelor dobândite din studiul bazei de date creată anterior și a experienței profesionale în domeniul interferențelor electromagnetice LEA – CMS, colectivul de cercetare **propune un set de legi fuzzy** care să guverneze funcționarea blocului fuzzy și care poate fi descris de forma generală a legii j în modul următor:

L^j : DACA d și ρ aparțin funcției de apartenență μ_d^j și μ_ρ^j ce descriu legea j

$$\text{ATUNCI } A^j = \lambda_0^j + \lambda_1^j \cdot \frac{1}{l^2 + c} + \lambda_2^j \cdot \frac{1}{l'^2 + c} \quad (\text{II.3})$$

unde c reprezintă o constantă introdusă pentru înlăturarea erorilor de calcul numeric care pot apărea în cazul în care punctul de calcul se găsește pe suprafața conductei, sau în punctul de origine (0,0), iar λ_0^j, λ_l^j și λ_l^j reprezintă un set coeficienți care determină valoarea PMV de ieșire, A^j , furnizată de fiecare lege j . Pentru stabilirea apartenenței unei perechi de parametri de intrare direcți (d, ρ) la o lege j , s-au utilizat funcții de apartenență de tip Gauss, relația (II.4), iar valoarea de ieșire furnizată de către blocul fuzzy implementat ca și cod software, se obține pe baza mediei algebrice ponderate a valorilor de PMV furnizată de fiecare lege j în parte, relația (II.5):

$$\mu_{\Delta}^j(\Delta) = \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\Delta - \bar{\alpha}_{\Delta}^j}{\sigma_{\Delta}^j} \right)^2 \right] \quad (II.4)$$

$$A(d, \rho) = \frac{\sum_{j=1}^m (A^j \cdot \mu^j)}{\sum_{j=1}^m \mu^j} \quad (II.5)$$

unde $\Delta \in \{d, \rho\}$, iar $\bar{\alpha}_{\Delta}^j$ și σ_{Δ}^j reprezintă valoarea medie și abaterea standard a funcției de apartenență de tip Gauss, iar $\mu^j = \mu_d^j(d) \cdot \mu_{\rho}^j(\rho)$. Acest BLF a fost implementat ca interfață în MatLab sub forma unei funcții, f_BLF .

II.3.2 Determinarea parametrilor blocului fuzzy implementat prin utilizarea unui algoritm genetic de optimizare a acestora

În continuare, pentru a determina parametrii optimi ($\bar{\alpha}_d^j, \bar{\alpha}_{\rho}^j, \sigma_d^j, \sigma_{\rho}^j, \lambda_0^j, \lambda_l^j$ și λ_l^j) ce descriu setul de legi ai blocului fuzzy, autorii **au implementat un cod software propriu unui algoritm genetic (GA) de optimizare** a selecției acestora [II.11]. **Algoritmul genetic propus** pornește de la o populație de 50 de indivizi generați aleatoriu, fiecare individ al populației reprezentând o combinație posibilă de parametri ai BLF. Evaluarea acestor indivizi se realizează pe baza abaterii medii pătratice dintre valoarea furnizată de FLS corespunzător și valoarea PMV obținută prin analiză FEM, pe modelele testate:

$$J_{av} = \frac{1}{2q} \cdot \sum_{p=1}^q [A_{FLS}^p(d, x, y, \rho) - A_{FEM}^p(d, x, y, \rho)]^2 \quad (II.6)$$

unde q este numărul de perechi de parametri de intrare / parametri de ieșire folosiți în cadrul procesului de optimizare, $A_{FLS}^p(d, x, y, \rho)$ este valoarea PMV furnizată de BLF corespunzător individului testat, iar $A_{FEM}^p(d, x, y, \rho)$ este valoarea PMV obținută cu FEM pentru un set de date de intrare (d, ρ, x, y).

Pentru a optimiza parametrii (α, σ și λ), indivizii populației de pornire sunt supuși unui proces iterativ format din următorii pași: **Pasul 1:** Toți indivizii populației curente sunt evaluați, după care se alege cel mai bun individ și se plasează direct în populația corespunzătoare următoarei generații (iterații); **Pasul 2:** Se aleg aleatoriu doi indivizi din populația curentă și se supun unui proces de încrucișare în urma căreia se obțin alți doi indivizi noi pentru populația generației viitoare; **Pasul 3:** Se repetă **Pasul 2** până când populația generației viitoare va atinge același număr de indivizi ca și generația curentă; **Pasul 4:** Toți indivizii din noua generație, mai puțin individul reprezentând cea mai bună soluție, sunt supuși unui proces de mutație.

Acest proces iterativ este repetat de un număr stabilit pentru acest caz de 5000 de ori, sau până când eroarea medie pătratică pentru cea mai bună soluție este mai mică decât o valoare impusă în

prealabil. Parametrii care descriu setul de legi ai BLF și care trebuie supuși procesului de optimizare sunt reprezentați sub forma valorii lor reale în structura cromozomială a fiecărui individ:

$$C = \left(\bar{\alpha}_{\Delta}^{n(\Delta)}, \sigma_{\Delta}^{n(\Delta)}, \lambda_{\delta}^j \right), \Delta = d, \rho, \delta = 0, l, l', j = 1..m \quad (II.7)$$

În urma procesului de încrucișare din cei doi indivizi selectați pe post de părinți se obțin patru noi indivizi (copii). Primii doi urmași sunt obținuți în urma unui operator de încrucișare aritmetic, iar următorii doi pe baza unui operator de încrucișare genetic:

$$C_1^t = \alpha \cdot P_1^t + (1-\alpha) \cdot P_2^t; C_2^t = \alpha \cdot P_2^t + (1-\alpha) \cdot P_1^t \quad (II.8)$$

$$C_3 = (P_1^1 \dots P_1^k P_2^{k+1} \dots P_2^r); C_4 = (P_2^1 \dots P_2^k P_1^{k+1} \dots P_1^r) \quad (II.9)$$

unde α este o valoare aleatoare între 0 și 1, r este numărul total de cromozomi, iar k este poziția, aleasă în mod aleatoriu, în care să se aplice operatorul de încrucișare genetică asupra celor doi părinți.

Operatorul de mutație este aplicat cu o probabilitate diferită asupra fiecărui cromozom al unui individ selectat spre a fi supus procesului de mutație. Dacă testul de probabilitate este trecut cu succes, atunci are loc mutația, ceea ce presupune că al t -lea cromozom va lua următoarea valoare:

$$C^t = C^t + (0.5 - \alpha) \cdot h \quad (II.10)$$

unde α este o valoare aleatoare în palierul 0 și 1 ce reprezintă nivelul de mutație aplicat, iar h reprezintă distanța minimă dintre valoarea parametrului reprezentat de cromozomul C^t și limitele de variație a acestui parametru.

Pentru a implementa GA propus, autorii **au dezvoltat un algoritm software** în cadrul programului MatLab, având ca interfață funcția de optimizare:

$$[SolQual, Sol, Time] = f_GAFuzzy(RNo, DNo) \quad (II.11)$$

care determină parametrii (α , σ și λ) pentru un set dat de legi fuzzy. Funcția primește ca și parametri de intrare numărul (RNo , DNo) de funcții de apartenență care partajează cei doi parametri direcți de intrare ai BLF (ρ și d), și returnează setul de parametri optimizați (Sol), eroarea medie pătratică obținută pentru setul de date de antrenare folosit ($SolQual$), respectiv timpul de antrenare necesar determinării parametrilor optimi ($Time$).

II.3.3 Identificarea formei optime a setului de legi ce descriu blocul fuzzy implementat

Pentru a **identifica structura optimă a BLF implementat**, s-au testat diferite seturi de legi fuzzy variind între 3 și 7 numărul de funcții de apartenență care partajează distanța de separație d , respectiv rezistivitatea solului ρ pe intervalele lor de variație, obținând-se un număr total de 25 de structuri diferite de BLF. Parametrii acestor BLF au fost determinați folosindu-se setul de date de antrenare utilizat și la implementarea RN prezentate în cadrul paragrafului II.2, respectiv GA prezentat mai sus. După determinarea valorilor optime (α , σ și λ), s-a evaluat eroarea medie pătratică de determinare a PMV cu aceste BLF și s-a comparat timpul de antrenare a acestora. Tabelul II.B prezintă cele mai bune trei structuri de BLF identificate de către autori, după analiza în detaliu a soluțiilor furnizate de cele 25 structuri diferite implementate:

Din tabelul II.B se observă că cele mai bune soluții se obțin pentru o structură de tip 5x7, adică un număr total de 35 de legi fuzzy. Creșterea numărului de legi fuzzy care descriu BLF implementat are și un efect secundar negativ, reprezentat de creșterea semnificativă a timpul de calcul necesar pentru determinarea valorilor optime ale parametrilor (α , σ și λ), prin intermediul GA implementat. Figura II.5 prezintă abaterea absolută a PMV determinate cu ajutorul structurii optime a BLF, identificate atât pentru setul de antrenare, cât și pentru cel de testare folosite și pentru antrenarea RN.

Tabelul II.2: DIFERITE STRUCTURI DE BLF IMPLEMENTATE

Nr. Crt.	RNo	DNo	SolQual	Time
1	4	6	6.530	16min06sec
2	5	5	5.317	16min35sec
3	5	7	3.641	20min52sec

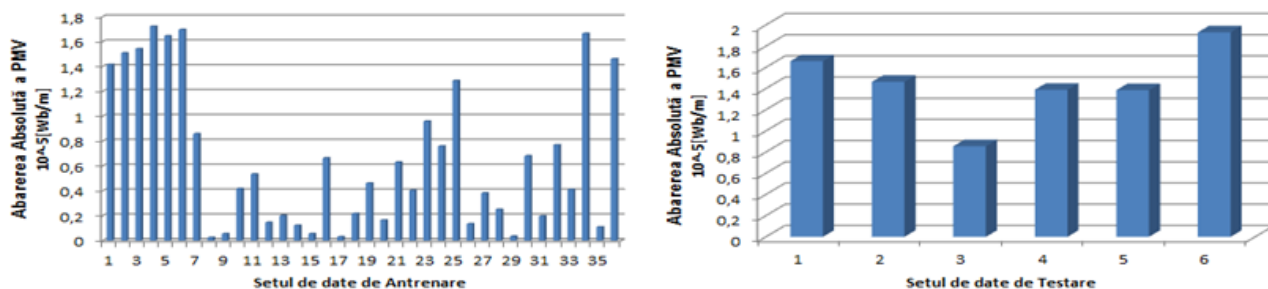


Figura II.4: Eroarea Absolută de determinare a amplitudinii și fazei PMV

II.4. Implementarea unei rețele neuronale generale care să determine matricea de impedanțe

II.4.1 Configurația problemei studiate

O conductă metalică subterană de transport gaze naturale împarte același coridor de distribuție cu o linie electrică aeriană de 220 kV/50 Hz (Figura II.6). În vederea studierii unei game mult mai largi de probleme de interferență LEA – CMS, se consideră un sol multistrat (cu trei straturi verticale) cu rezistivități diferite. Conducta este considerată a fi îngropată la o adâncime de 2 m, are o rază de 0.195 m, un perete de grosime 5 mm și o izolație de bitum de 15 mm. Conductoarele de fază a LEA sunt plasate pe stâlpi triunghiulari mono-circuit de tip IT.Sn102 cu un singur fir de gardă.

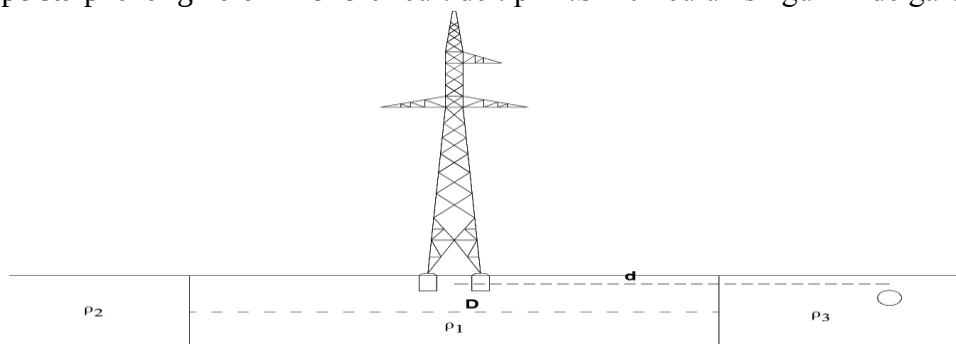


Figura II.5: Problema de interferență LEA-CM în prezența solului cu 3 straturi verticale

II.4.2 Determinarea matricei de impedanțe proprii și mutuale ce descrie cuplajul inductiv dintre LEA și CMS

Colectivul de cercetare a implementat o RN generală care să calculeze direct **matricea de impedanțe proprii și mutuale** care descrie cuplajul inductiv dintre LEA și CMS. O dată evaluată matricea de impedanțe, aceasta permite **evaluarea tensiunilor induse** în CMS atât în regim de funcționare normală a LEA, cât și în regimuri de defect prin intermediul modelului de circuit electric echivalent dezvoltat și implementat în cadrul Raportului de activitate I [17].

Analizând baza de date obținută prin evaluare cu ajutorul FEM a mai multor configurații geometrice de bază, s-au stabilit parametrii de intrare a RN propus și domeniul de variație al acestora: d care variază între 0 m și 1000 m; ρ_1, ρ_2, ρ_3 – rezistivitatea straturilor verticale, între 30 $\Omega \cdot m$ și 1000 $\Omega \cdot m$; D – lățimea stratului de mijloc, între 50 m și 1100 m.

Aceste mărimi de intrare sunt supuse unei preprocesări prin care sunt scalate pe intervalul de variație [-1,1]. Mărimile de ieșire ale RN implementate vor fi elementele matricei de impedanțe. Considerând faptul ca matricea de impedanțe proprii și mutuale este o matrice pătratică simetrică, RN propusă trebuie să determine doar elementele de deasupra diagonalei principale. Astfel Z_{ii} reprezintă impedanța proprie a conductorului i , iar Z_{ij} reprezintă impedanța mutuală dintre conductorul i și conductorul j ($i = 1,3$ reprezintă conductoarele de fază a LEA, $i = 4$ reprezintă firul de gardă, iar $i = 5$ reprezintă CMS).

Studiul detaliat al matricelor de impedanțe proprii și mutuale obținute pentru diferite configurații geometrice a evidențiat faptul că în vederea obținerii unor soluții cu o acuratețe sporită, ar fi mai convenabil să se implementeze RN diferite pentru partea reală și imaginară a acestor impedanțe. De asemenea, s-a constatat că ar fi indicat să se implementeze 3 RN diferite: RN1 care să calculeze impedanța proprie a tuturor conductoarelor ($Z_{11}, Z_{22}, Z_{33}, Z_{44}, Z_{55}$); RN2 care să calculeze impedanțele mutuale dintre CMS și celelalte conductoare ($Z_{15}, Z_{25}, Z_{35}, Z_{45}$); respectiv RN3 care să calculeze restul elementelor matricei de impedanțe. Pentru antrenarea acestor RN propuse, s-a utilizat un set de date de antrenare de peste 5000 de elemente determinate prin evaluarea FEM a diferitelor configurații geometrice de bază [1, 29]. Tabelul II.3 prezintă o parte din aceste date de antrenare:

Tabelul II.3: SETUL DE DATE FOLOSIT LA ANTRENAREA RN

Nr. Crt.	d [m]	D [m]	ρ_2 [$\Omega \cdot m$]	ρ_1 [$\Omega \cdot m$]	ρ_3 [$\Omega \cdot m$]	Nr.Crt.	d [m]	D [m]	ρ_2 [$\Omega \cdot m$]	ρ_1 [$\Omega \cdot m$]	ρ_3 [$\Omega \cdot m$]
8	5	60	500	50	500	2301	20	550	30	250	30
373	100	60	500	750	500	2532	100	550	100	500	100
875	20	120	100	750	100	2914	5	1050	10	250	10
1231	500	120	100	30	100	3274	100	1050	500	1000	500
1391	0	240	50	10	50	3545	750	1050	30	750	30
1891	250	240	500	30	500	4320	750	1500	50	10	50
2134	0	550	50	250	50	4442	1000	1500	250	1000	250

II.4.3 Identificarea arhitecturii optime a RN implementate. Rezultate obținute

Pentru a identifica structura optimă a RN propuse, autorii au dezvoltat un program de interfață cu programul MatLab, prin care să se implementeze și să antreneze arhitecturi de tip feed-forward cu două straturi ascunse, la care s-a variat numărul de neuroni între 5 și 30 pentru primul strat ascuns și între 5 și 20 pentru cel de al doilea strat ascuns. Funcția de transfer a straturilor ascunse a fost setată la *tansig*, iar a stratului de ieșire la *purelin*. Pentru antrenarea RN implementate s-a utilizat metoda Levenberg-Marquard. Astfel, prin intermediul funcției de interfațare *CreateImpedNN* s-au implementat și antrenat un număr total de 24 arhitecturi diferite pentru toate cele trei RN prezentate mai sus (RN1, RN2 și RN3):

$$[NNMat] = CreateImpedNN(InPut, Target) \quad (II.12)$$

Pentru a se putea compara rezultatele obținute cu diferitele arhitecturi de RN implementate, autorii au dezvoltat o funcție *EvalNNErrorClass* care să determine eroarea de evaluare a soluțiilor furnizate, atât pentru setul de date de antrenare cât și pentru un set de date de testare aleatoriu determinate, care nu a fost furnizat RN implementate în cadrul procesului de antrenare. Luând în

considerare dimensiunea mare a seturilor de date de antrenare (5000 de elemente), respectiv de antrenare (100 de elemente), pentru a compara mai ușor erorile de evaluare furnizate de diferitele RN, funcția *EvalNNErrorClass* returnează distribuția erorilor de evaluare pe clase de erori. În urma **efectuării unui studiu statistic** al acestor distribuții procentuale a erorilor de evaluare, autorii **au identificat arhitecturile optime** pentru cele trei tipuri de RN. În cazul rețelei RN1 pentru evaluarea părții reale a impedanțelor, s-a constatat că arhitectura optimă o reprezintă o rețea feed-forward cu 30 de neuroni pe primul strat ascuns și 10 neuroni pe cel de al doilea strat ascuns, iar pentru a evalua partea imaginară a impedanțelor, arhitectura optimă o constituie o structură cu 20 de neuroni pe cele două straturi ascunse. Figura II.7 prezintă distribuția erorii procentuale obținute, atât pentru setul de date de antrenare, cât și pentru un set de date de testare care nu a fost furnizat RN în cadrul procesului de antrenare.

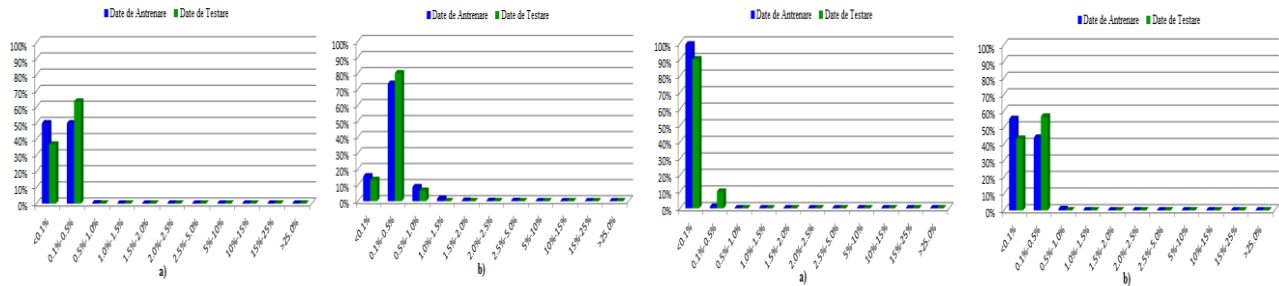


Figura II.6: Distribuția erorii procentuale în cazul RN1 și RN 2:

a) Evaluarea părții Reale, b) Evaluarea părții Imaginare

În cazul rețelei RN3 pentru evaluarea părții reale a impedanțelor s-a constatat că arhitectura optimă o reprezintă o rețea feed-forward cu 20 de neuroni pe ambele straturi ascunse, iar pentru a evalua partea imaginară a impedanțelor arhitectura optimă o constituie o structură cu 30, respectiv 20 de neuroni pe primul, respectiv al doilea strat ascuns.

Datorită faptului că partea reală a impedanțelor mutuale dintre CMS și restul conductoarelor variază într-o gamă foarte largă de valori, între $1E-11$ și $1E-6$, implementarea RN3, pentru evaluarea părții reale și imaginare a acestor impedanțe a condus la furnizarea unor soluții de o acuratețe scăzută. Pentru eliminarea acestui inconvenient, autorii au recurs **la implementarea a două RN3** care să evalueze modulul și argumentul acestor impedanțe mutuale. În cazul RN3 care evaluează modulul, arhitectura optimă o constituie o RN cu 30 de neuroni pe primul strat ascuns și 25 de neuroni pe al doilea strat ascuns. Iar în cazul RN3 care evaluează argumentul, arhitectura optimă conține 20 de neuroni pe cele două straturi ascunse.

De asemenea, pe modelul acestor RN s-au implementat o serie de alte RN care să evalueze matricea impedanțelor proprii și mutuale care descriu cuplajul inductiv dintre LEA – CMS pentru diferite configurații ale LEA. A fost creat un bloc fuzzy care identificând structura LEA pe baza unui parametru de intrare (identificator număr tip de stâlp), să apeleze RN corespunzătoare și să construiască matricea completă de impedanțe proprii și mutuale.

II.5. Testarea și validarea metodelor implementate prin realizarea unor măsurători in-situ

În cadrul colaborării inițiate cu Operatorul de Transport gaze naturale, **S.N.T.G.N. TRANSGAZ România**, în contextul în care în următorii ani se va realiza magistrala gazoduct NABUCCO, există un interes deosebit încă din faza de proiectare, pentru stabilirea, identificarea exactă și prevenirea interferențelor electromagnetice datorate unor LEA care actualmente sunt plasate pe coordonatele traseului magistralei de gaz. În această problemă, pe lângă caracteristicile fizice și

electrice ale surselor perturbatoare, se ia în calcul și compoziția pe straturi a solului, sau modalitatea de pozare a conductei de gaz.

În vederea **validării și testării metodelor implementate pentru calculul tensiunilor induse** în CMS, plasate în apropierea LEA-IT s-au efectuat o serie de **măsurători in-situ** pentru un caz practic furnizat de SNTGN TRANSGAZ [30].

Datele colectate în urma măsurătorilor efectuate au fost utilizate ca și valori de referință în procesul de validare a rezultatelor furnizate cu ajutorul BLF și RN dezvoltate.

Problema studiată prezintă cazul unei conducte de transport a gazului metan, care împarte pe o porțiune același coridor de distribuție cu o LEA de înaltă tensiune. În vederea **determinării tensiunilor induse** au fost necesare o serie de date care să descrie parametrii constructivi ai problemei. O parte dintre acești parametri au fost selectați din planurile tehnice de construcție a coridorului comun de distribuție LEA-CMS și din cataloage de material: diametru conductă interior : 1219 mm; izolație cu bitum; adâncimea de îngropare – 1.1 m de la generatoarea superioară; grosime izolație : 10 mm; grosime perete conductă : 14 mm; lungime paralelism: 2000 m; distanța la LEA – 70 m până la conductorul de gardă (axul liniei); distanța conductă până la cea mai apropiată împământare a unui stâlp LEA - 35 m. LEA funcționează la nivelul de tensiune 400 kV cu o încărcare medie de 500 A pe fază, conform informațiilor primite de la **TRANSELECTRICA**.

Pentru determinarea **rezistivității solului și a rezistențelor de dispersie** ale prizelor de împământare s-au realizat o serie de **măsurători in-situ**. Măsurarea rezistivității solului s-a realizat cu un tester specializat de tip MEGGER DET 5/4 R având domeniu de măsurare $0.02 \Omega \dots 19.99 \text{ k}\Omega$, prin metoda celor 4 electrozi, specifică metodei Wenner de măsurare. În urma măsurătorilor efectuate în diferite locații de-a lungul coridorului comun de distribuție s-a constatat că pe lungimea de 2000 m solul se poate considera a fi stratificat în 3 straturi verticale cu rezistivități între 100 - 120 Ω/m .

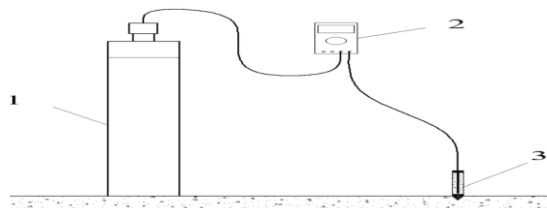


Figura II.7: Măsurarea potențialului indus

Potențialul electric indus s-a măsurat cu ajutorul unui voltmetru electronic (rezistența de intrare peste 1 $M\Omega/V$), și un electrod de referință, conform Figura II.7 (1 - priza de potențial, 2 – milivoltmetru, 3 - electrod Cu/CuSO_4). **Prezența curenților de dispersie** este observată instantaneu pe ecranul unui osciloscop portabil de tip Fluke 105 Scopemeter, prezentând o formă de undă neregulată.

S-au pus în evidență **amplitudinea maximă a semnalului**, valorile efective ale potențialului conductă - sol. În urma plasării schemei de montaj în diverse puncte de-a lungul coridorului comun LEA-CMS au rezultat următoarele valori ale tensiunii induse în conductă măsurate din 400 m în 400 m.

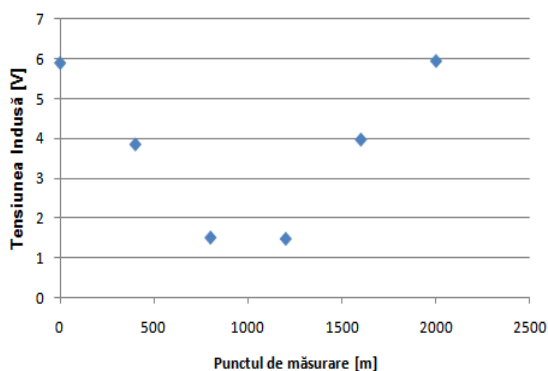


Figura II.8: Valorile experimentale (măsurate ale tensiunii induse)

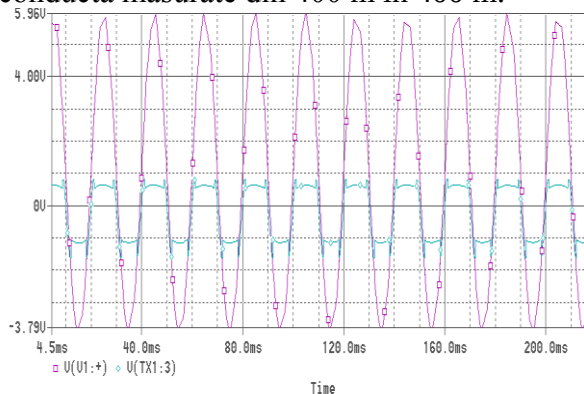


Figura II.9: Reprezentarea grafică a tensiunii induse la capătul conductei

Figura II.9 prezintă înregistrările osciloscopului portabil la capătul coridorului comun de distribuție, unde tensiunea indusă este maximă deoarece la capetele coridorului sunt poziționate joncțiunile de izolare a conductei față de sol și restul traseului.

II.5.1 Rezultate obținute prin implementarea problemei cu ajutorul tehnicilor de inteligență artificială dezvoltate

Implementând același studiu de caz în **BLF dezvoltat**, s-au determinat **valorile potențialului magnetic vector** pe suprafața secțiunii transversale a conductei metalice, a conductoarelor de fază și respectiv a firelor de gardă. S-au implementat două blocuri de *Logică Fuzzy* care au evaluat amplitudinea respectiv faza PMV într-un punct al secțiunii transversale a coridorului de distribuție, specificat de utilizator. Cele două blocuri de *Logică Fuzzy* au fost antrenate folosind un set de date obținute printr-o analiză a problemei, bazată pe metoda elementului finit pentru mai multe configurații geometrice LEA-CMS și cu 3 straturi de separație verticale. Folosind valorile PMV pe suprafața secțiunilor transversale ale conductei metalice, conductoarelor de fază și respectiv firelor de gardă, pe baza relațiilor de calcul dezvoltate în [17], se calculează **valorile inductivităților proprii și mutuale LEA-CMS**.

Tabelul II.4: INDUCTIVITĂȚILE PROPRII PE UNITATE DE LUNGIME

Structura Metalică	$L_{prop} 10^{-7} [H/m]$
Conductorul de fază R (CF1)	23.45005-1.50212j
Conductorul de fază S (CF2)	23.46877-1.53024j
Conductorul de fază T (CF3)	23.49061-1.53031j
Firul de Gardă 1 (FG1)	28.88256-1.44776j
Firul de Gardă 2 (FG2)	28.90446-1.44777j
Conducta Metalică (CM)	14.48759-1.97304j

Se face apel la structurile de calcul și rezultatele obținute în [17]. Astfel în urma soluționării sistemului de ecuații corespunzător metodelor de rezolvare al circuitului electric echivalent și în urma implementării datelor în BLF și RN dezvoltat, se determină curenții din conductorii de fază precum și curenții induși în CMS și în firele de gardă. Se determină și **forma tensiunii electromotoare induse în CMS**.

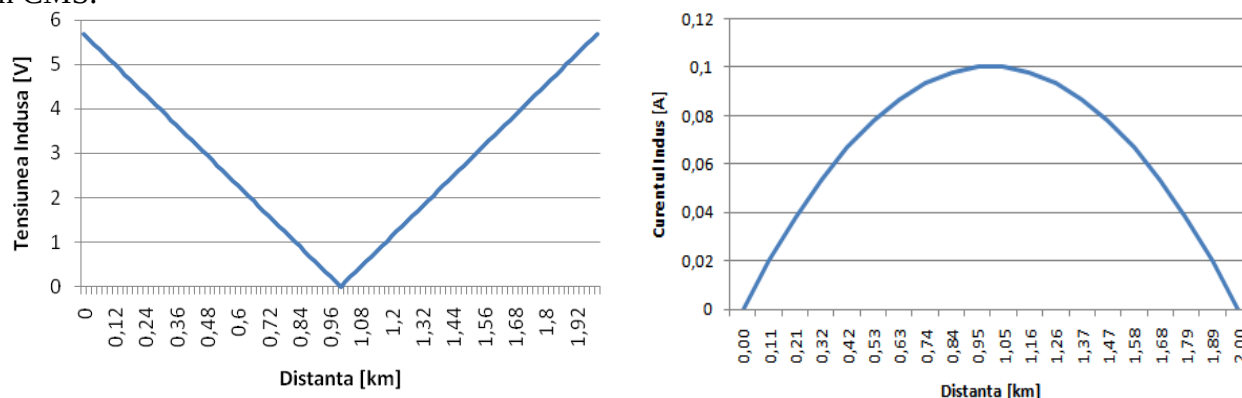


Figura II.10: Tensiunea respectiv curentul indus în CMS

Din grafic se poate observa că **valoarea maximă a tensiunii induse** în conducta metalică este de 5.74 V, ceea ce este o valoare apropiată față de cea măsurată 5.96 V la capetele coridorului comun. Se obține o **valoare maximă a curentului indus** de aproximativ 0.1 A, la mijlocul tronsonului de conductă care împarte același coridor de distribuție cu LEA.

III. Dezvoltarea unor metode de localizare și cuantificare a vârfurilor tensiunilor induse în conductele metalice care împart același coridor de distribuție cu o linie electrică aeriană

III.1. Circuitul electric echivalent aferent problemelor de interferență electromagnetică LEA-CM. Pentru a evalua nivelul tensiunilor și curenților induși în conductele metalice supra sau subterane, care împart același coridor de distribuție cu o LEA IT, se propune abordarea probleme lor de interferență electromagnetică LEA-CM din perspectiva unui model de circuit electric echivalent.

Modelele similare de circuit electric echivalent LEA-CM prezentate în literatura de specialitate, [12, 31÷40] fie analizează doar cuplajul inductiv dintre LEA IT și CM subterane, fie abordează separat problematica cuplajelor inductive și capacitive dintre LEA IT și CM supraterane, suprapunând efectele celor două cuplaje.

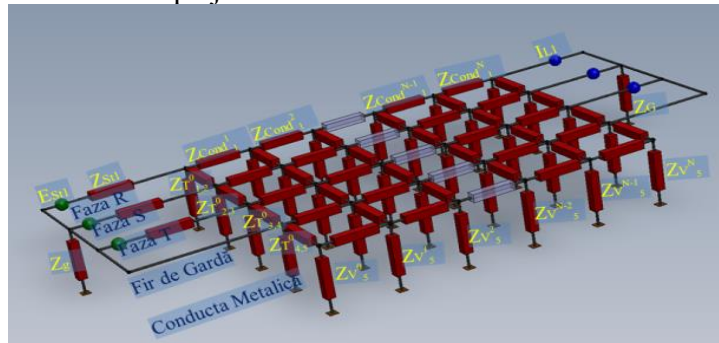


Figura III.1: Modelul de circuit electric echivalent LEA-CM

Spre deosebire de aceste modele, circuitul electric echivalent propus (Figura III.1) permite analiza simultană a tensiunilor induse datorate celor două cuplaje atât în condiții de funcționare normale a LEA, cât și în condiții de defect, în situația în care defectul apare mult în afara coridorului comun de distribuție (punere la pământ a unei faze, scurtcircuit în stații, lovituri de trăsnet). Pentru a spori precizia de calcul a tensiunilor și curenților induși în CM expusă mecanismelor de cuplaj inductiv și capacitiv cu LEA, obținute în urma rezolvării modelului de circuit electric echivalent, coridorul comun de distribuție a fost împărțit în N secțiuni. [41-44]

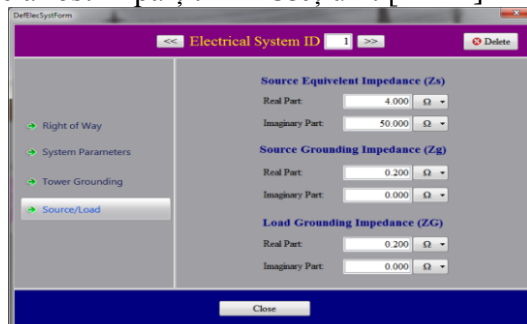


Figura III.2: Fereastra de definire a parametrilor electrici echivalenți

Spre deosebire de aceste modele, circuitul electric echivalent propus (Figura III.1) permite analiza simultană a tensiunilor induse datorate celor două cuplaje atât în condiții de funcționare normale a LEA, cât și în condiții de defect, în situația în care defectul apare mult în afara coridorului

comun de distribuție (punere la pământ a unei faze, scurtcircuit în stații, lovituri de trăsnet). Pentru a spori precizia de calcul a tensiunilor și curenților induși în CM expusă mecanismelor de cuplaj inductiv și capacitiv cu LEA, obținute în urma rezolvării modelului de circuit electric echivalent, coridorul comun de distribuție a fost împărțit în N secțiuni. [41-44]

În vederea determinării modelului de circuit electric echivalent este necesară introducerea în programul *InterfStud* a unor parametri electrici corespunzători unei secțiuni k a coridorului comun LEA-CM (Figura III.2). Pe baza parametrilor geometrici și electrici care descriu problema de interferență electromagnetică, respectiv matricele de inductanțe și capacități ce descriu cuplajele inductive și capacitive, programul dezvoltat, *InterfStud*, generează și rezolvă automat, utilizând un algoritm specializat, modelul de circuit electric echivalent pentru un număr nelimitat de LEA în paralel cu CM supra sau subterane.

Rezolvarea modelului de circuit electric echivalent. În vederea evaluării tensiunilor induse este necesară soluționarea modelului de circuit electric echivalent prezentat în Figura III.2 determinându-se valoarea curenților induși în fiecare secțiune a CM. Pentru rezolvarea acestui model de circuit electric echivalent s-a dezvoltat și implementat în cadrul programului *InterfStud* un algoritm recursiv specializat.

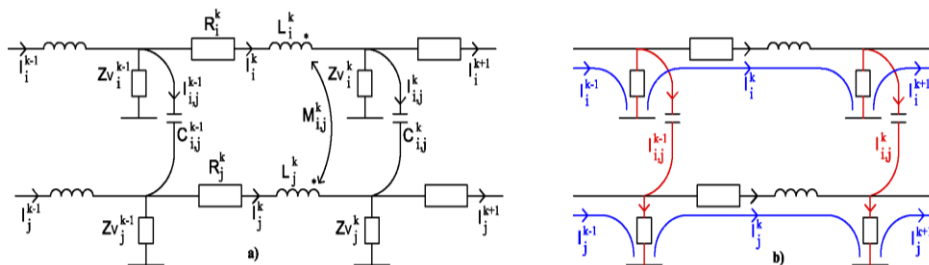


Figura III.3: a) Cuplajul inductiv și capacitiv dintre două conductoare; b) Curenții ciclici longitudinali și transversali dintre două conductoare

Considerând cuplajul inductiv și capacitiv dintre două conductoare oarecare i și j pentru o secțiune k a coridorului comun de distribuție (Figura III.3a), sistemul de ecuații aferent curenților ciclici longitudinali și respectiv transversali (Figura III.3b) poate fi scris sub forma matricială pentru un număr nedefinit de conductoare (structuri metalice) conectate între ele prin cuplaj inductiv și/sau capacitiv. Relația generalizată de recurență a curenților ciclici longitudinali din secțiunea k în corelație cu valoarea acestora în secțiunea $k+1$ este:

$$[I]^k = [A]^k + [B]^k \cdot [I]^{k+1} \quad (\text{III.1})$$

unde:

$$[A]^k = ([S_z]^k - [R_z]^k \cdot [B]^{k-1})^{-1} \cdot ([E]^k + [R_z]^k \cdot [A]^{k-1}), \quad [B]^k = ([S_z]^k - [R_z]^k \cdot [B]^{k-1})^{-1} \cdot [T_z]^k \quad (\text{III.2})$$

În vederea obținerii încărcării în putere aparentă tranzitată a fazelor LEA, spre deosebire de modelele similare de circuit electric echivalent existente în literatura de specialitate [8-10] în care se utilizau impedanțe de încărcare, Z_L (a se vedea fig. 4a), se propune introducerea unor surse echivalente de curent, I_L , în secțiunile „finale”, $N+1$, a conductoarelor de fază (fig. 4b):

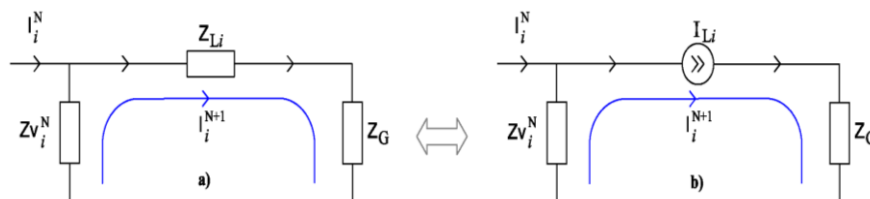


Figura III.4: Secțiunea $N+1$ a unui conductor de fază a LEA: a) impedanță de încărcare, b) sursă de curent

Astfel aplicând relația (III.1) ultimei secțiuni a coridorului comun, N , se determină valoarea curenților ciclici din această secțiune în corelație cu valorile surselor de curent impuse în secțiunea $N+1$:

$$[I]^N = [A]^N + [B]^N \cdot [I_L] \quad (III.3)$$

Pentru a determina valoarea tensiunii, respectiv a curentului indus în conducta metalică în orice punct de-a lungul coridorului comun de distribuție LEA-CM, programul *InterfStud* recurge la utilizarea unor tehnici de interpolare aplicate asupra datelor obținute în urma rezolvării modelului de circuit electric echivalent [45-49].

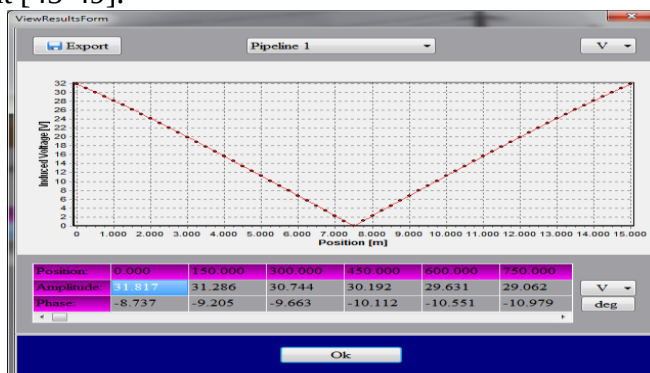


Figura III.5: Tensiunile induse evaluate cu InterfStud

Pentru a testa acuratețea rezultatelor furnizate de programul software dezvoltat, *InterfStud*, în paragrafele următoare s-au implementat o serie de geometrii LEA-CM valorile tensiunilor induse obținute comparându-se cu soluțiile furnizate prin implementarea într-un pachet software comercial (CDEGS).

III.2. Studiul eficacității metodei propuse pentru diferite geometrii și diverse condiții de sarcină ale LEA. Proiectarea optimă a traseului comun LEA – CM pentru atenuarea tensiunilor induse

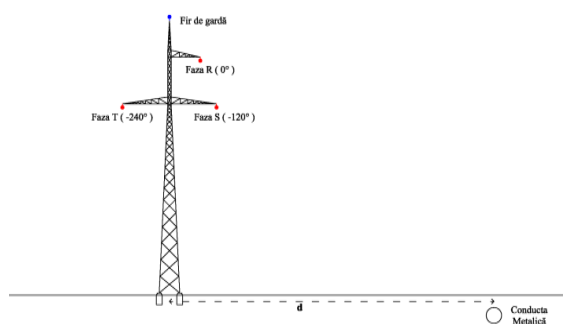


Figura III.6: Coridorul comun de distribuție

Descrierea problemei de interferență electromagnetică investigate. În scopul validării, respectiv a determinării preciziei soluțiilor furnizate de metodele de localizare și cuantificare a vârfurilor tensiunilor induse în conducte se implementează în softul dezvoltat (*Interfstud*) o problema de interferență electromagnetică dintre o conductă metalică subterană de transport gaz metan (CM) care împarte pe o distanță de 10 km același coridor de distribuție cu o linie electrică aeriană (LEA) de 110kV/50Hz (Figura III.6)

În urma rulării în programul FEMM v4.2 a fișierului de cod LUA generat de programul *InterfStud* se obține matricea de inductivități. Pe baza acesteia și utilizând parametrii geometrici și electrici a conductoarelor din cadrul problemei descrise (conductoare de fază, fir de gardă, conductă), programul *InterfStud* dezvoltă și rezolvă modelul de circuit electric echivalent, aferent problemei, în cazul unei încărcări simetrice de 350 A a conductoarelor de fază a LEA. [43, 46]

Rezultatele obținute din programul dezvoltat sunt comparate cu valorile tensiunii și curentului indus furnizate de pachetul de programe comercial *CDEGS* (fig. 7), rezultând o bună concordanță.

Este cunoscut faptul că variația curentului indus prezintă aceeași alură ca și cea a tensiunii induse, în continuare prezentându-se doar rezultatele obținute pentru valoarea maximă a tensiunii.

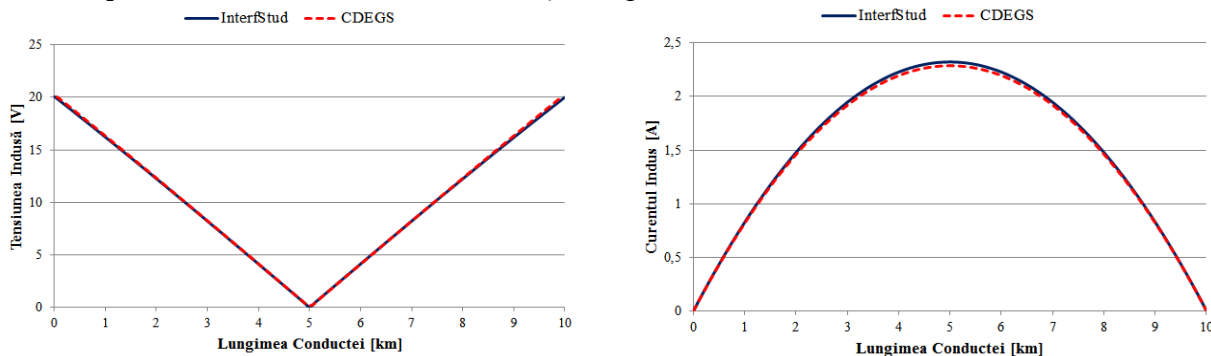


Figura III.7: Tensiunea, respectiv curentul indus de-a lungul conductei metalice

Influența distanței de separație LEA-CM. Pentru a determina variația tensiunii și curentului indus în CM, determinată de modificarea distanței de separație dintre LEA și CM se studiază un set de 39 de geometrii diferite în care se modifică poziția relativă a conductei față de LEA, restul parametrilor problemei rămânând neschimbați (rezistivitatea solului, încărcarea LEA, etc.).

În Figura III.8 și Figura III.9 este prezentată variația tensiunii induse în CM, în funcție de distanța de separație LEA-CM. Se observă în mod evident că alura acestora corespunde cu alura de variație a câmpului magnetic, nesimetria variației de-o parte și de alta a LEA fiind datorată amplasării asimetrice a conductoarelor de fază pe stâlp.

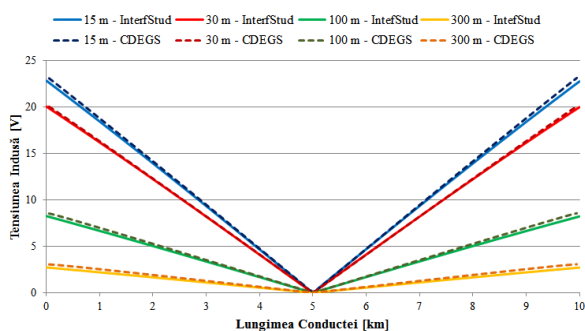


Figura III.8: Tensiunea indusă de-a lungul CM pentru diferite distanțe de separație

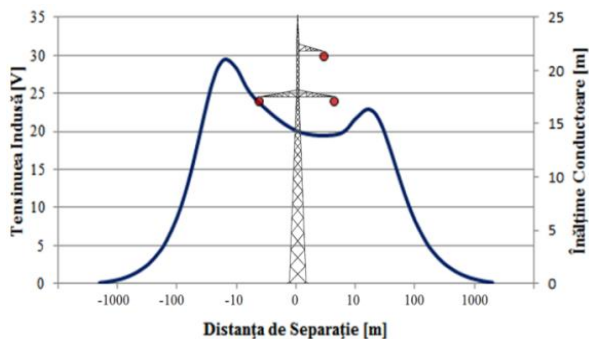


Figura III.9: Variația tensiunii induse în CM în funcție de distanța de separație

Influența lungimii coridorului comun de distribuție. În vederea determinării modului în care valoarea tensiunii, respectiv a curentului indus sunt influențate de lungimea coridorului comun, se propune analiza în detaliu a unor coridoare de lungime diferită, considerând aceeași geometrie.

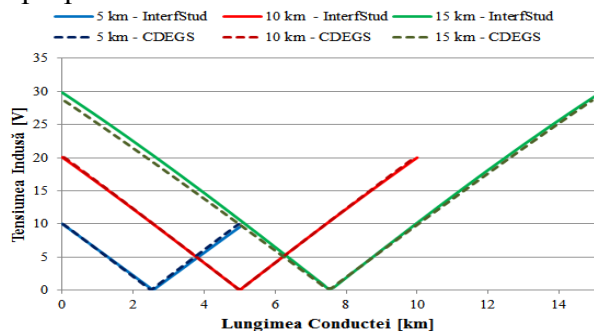


Figura III.10: Tensiunea indusă de-a lungul CM în cazul unor coridoare de lungime diferită

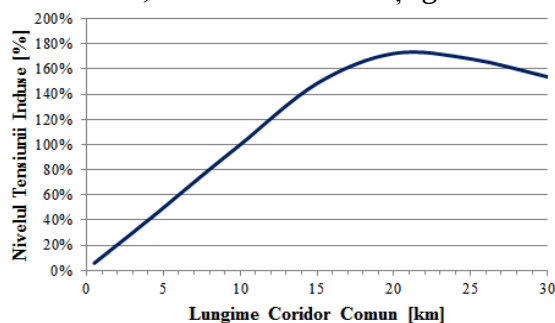


Figura III.11: Variația tensiunii induse în CM în funcție de lungimea coridorului comun

Figura III.10 și Figura III.11 ilustrează variația valorii maxime a tensiunii induse în CM, în funcție de variația distanței de separație LEA-CM, raportate la valorile maxime obținute în cazul coridorului de 10 km.

În scopul identificării rolului pe care îl are cantitatea de energie electrică transportată de LEA asupra variației tensiunii/curentului indus în CM, se propune studiul **variației încărcării în curent a fazelor LEA**. Prin analiza detaliată a valorilor maxime a tensiunii (Figura III.12 și Figura III.13), raportate la valorile maxime, se constată că acestea variază direct proporțional cu încărcarea în curent a fazelor LEA. În cadrul acestui studiu s-au investigat încărcări simetrice între 150 A și 550 A corespunzătoare unor încărcări uzuale de putere aparentă tranzitată aferente linilor de 110 kV ale Operatorilor de Distribuție din România ($16.5 \text{ MVA} \div 60.5 \text{ MVA}$).

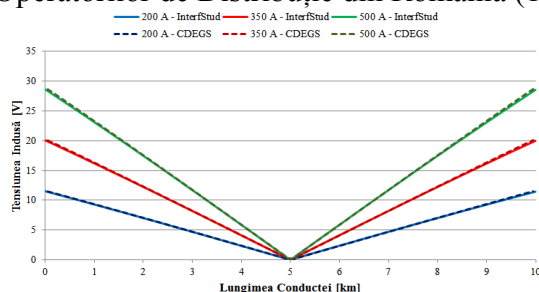


Figura III.12: Tensiunea indusă de-a lungul CM pentru diferite încărcări ale LEA

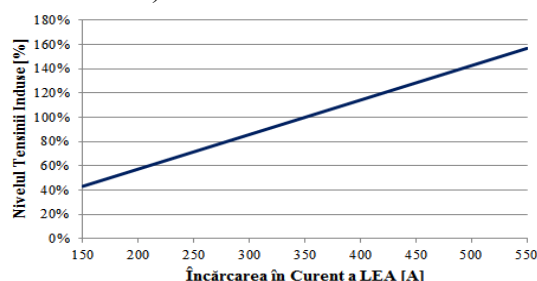


Figura III.13: Variația tensiunii induse în CM în funcție încărcarea în curent

Acuratețea rezultatelor obținute cu ajutorul programului *InterfStud* dezvoltat, în comparație cu cele furnizate de pachetul comercial *CDEGS* validează utilizarea acestuia în privința evaluării tensiunilor induse în CM datorate cuplajului inductiv LEA-CM.

Efectul unui defect de punere la pământ a unei faze a LEA. Se consideră apariția unui defect de punere la pământ a unei faze a LEA, într-un punct (B) la circa 30 km, în afara coridorului comun de distribuție (Figura III.14) [47].

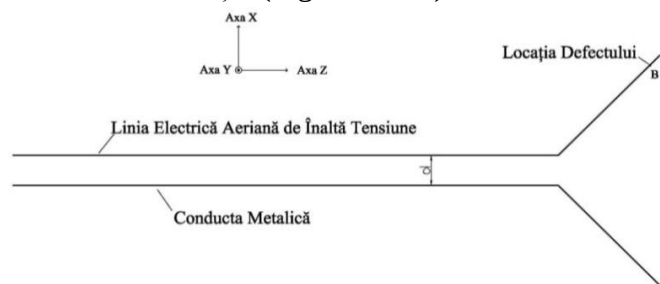


Figura III.14: Apariția unui defect de punere la pământ a unei faze

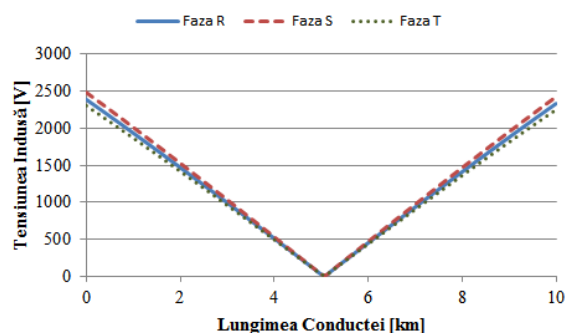


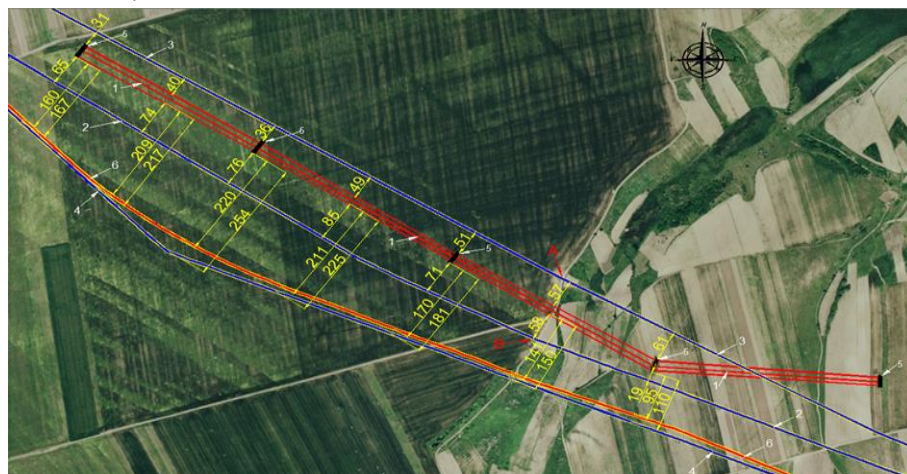
Figura III.15: Tensiunea indusă în CM

Defectul de punere la pământ a fazei LEA fiind considerat mult în afara coridorului comun de distribuție, efectul cuplajului conductiv este considerat neglijabil, curentul de defect care circulă prin LEA în porțiunea de coridor comun având doar un efect inductiv asupra conductei de gaz, făcând astfel posibilă o analiză acestei probleme de interferență LEA-CM cu ajutorul programului dezvoltat *InterfStud*. Pentru a evalua valorile acestor tensiuni și curenți induși s-a considerat un curent de defect de 2500 A prin faza pusă la pământ, și respectiv o încărcare de 350 A corespunzătoare unui regim normal de funcționare pe celelalte două faze.

În urma analizei efectuate se observă că valoarea tensiunii și curentului indus în CM crește de 100 de ori față de regimul normal de funcționare a LEA. De asemenea se constată o variație de 8% a tensiunii induse în funcție de poziția relativă a fazei defecte față de conductă metalică [45].

III.3. Verificarea aplicabilității metodelor dezvoltate, în coridoarele comune CM-LEA prin teste și măsurători în teren

Descrierea problemei studiate. Se propune spre analiză o rețea de conducte de transport gaze naturale existentă în exploatare în cadrul companiei SNTGN Transgaz SA. Sistemul este format din patru conducte metalice subterane paralele, de-a lungul traseului cele patru CM subterane paralele împart același coridor de distribuție cu o LEA de 400kV/50Hz (Figura III.16).



- Legendă**
- 1 – LEA IT 400kV/50Hz;
 - 2 – Conducta tranzit T2;
 - 3 – Conducta tranzit T3;
 - 4 – Conducta tranzit T1;
 - 5 – Stâlpi electrici a LEA;
 - 6 – Conducta import CI

Figura III.16: Tronsonul comun de distribuție LEA-CM subterane

Tensiuni induse în regim permanent. S-au determinat tensiunile induse în cele patru conducte tehnologice în regim permanent (condiții normale de funcționare) pentru o încărcare simetrică de 700 A a conductoarelor de fază a LEA.

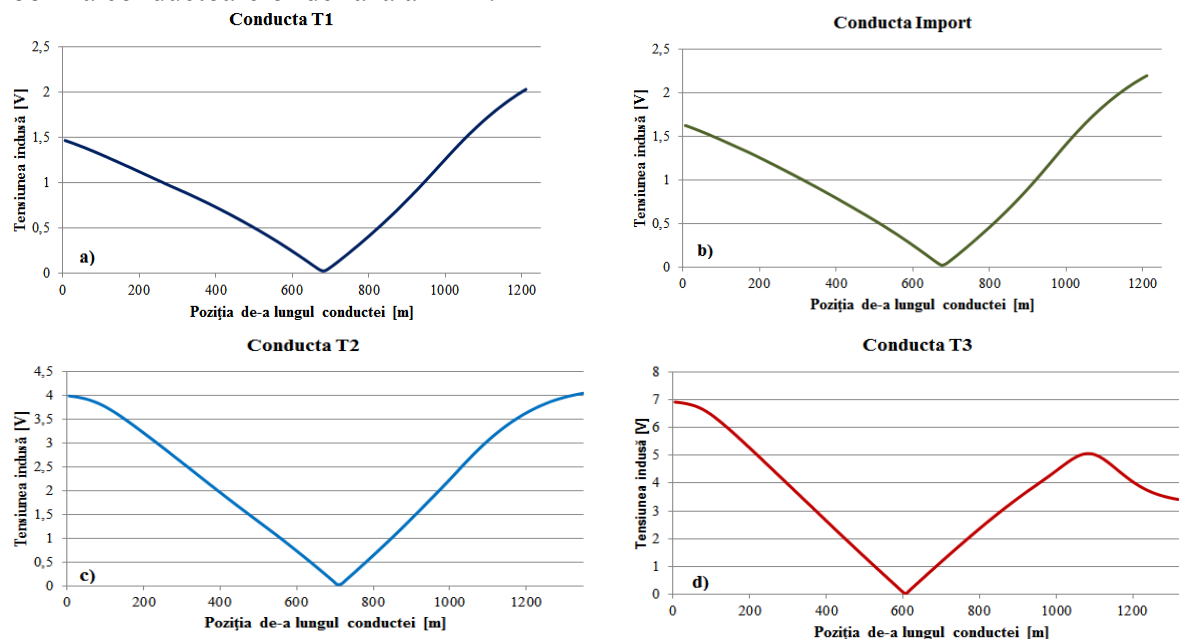


Figura III.17: Amplitudinea tensiunilor induse de-a lungul conductelor:
a) Tranzit 1(T1); b) Import (CI); c) Tranzit 2(T2) și d) Tranzit 3 (T3)

Pe baza amplitudinii și fazei tensiunilor induse la capetele secțiunilor de conductă furnizate de programul dezvoltat s-a determinat variația în timp a potențialelor conductelor T3 și T2 în punctele A și B față de potențialul de referință (-0,6 V) a electrozilor de zinc al cupoanelor de măsură instalate.

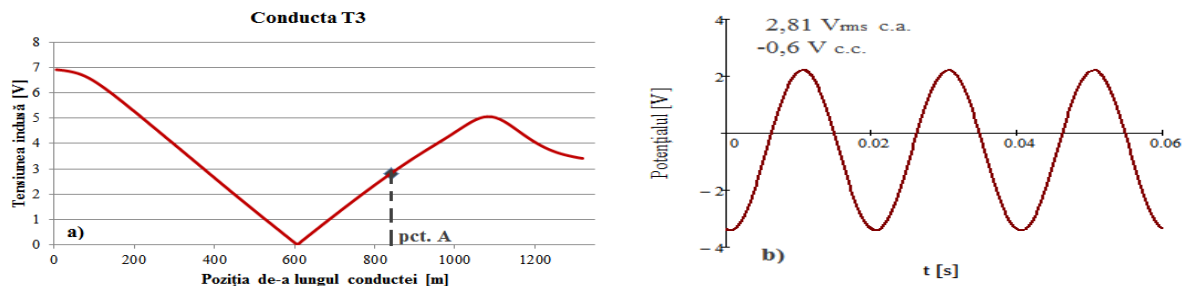


Figura III.18: a) Amplitudinea tensiunilor induse de-a lungul conductei T3; b) Variația în timp a potențialului conductei T3 în punctul de măsurare A față de potențialul electrodului de Cu/CuSO₄

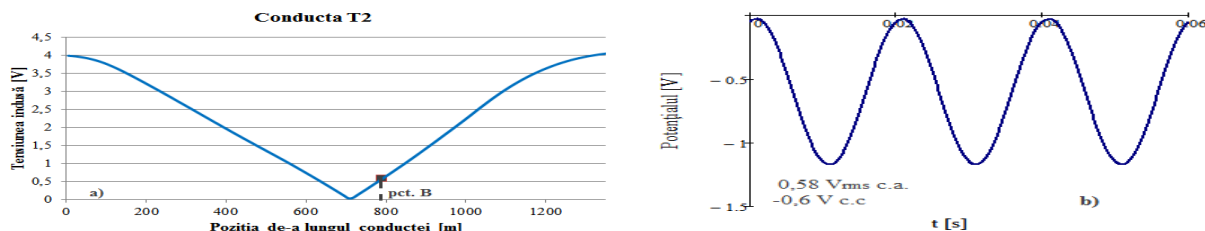


Figura III.19: a) Amplitudinea tensiunilor induse de-a lungul conductei T2; b) Variația în timp a potențialului conductei T2 în punctul de măsurare B față de potențialul electrodului de CuCuSO₄

Variația tensiunii induse în funcție de încărcarea în curent a LEA. Deoarece puterea aparentă tranzitată de LEA variază în timp în funcție de consumul de energie electrică, s-a investigat influența încărcării în curent a conductoarelor de fază a LEA asupra tensiunilor induse în cele patru CM. S-au studiat diverse încărcări simetrice a LEA, variind curentul de încărcare între 600 A și 800 A corespunzător unor puteri aparente tranzitate de 140 MVA, respectiv 180 MVA.

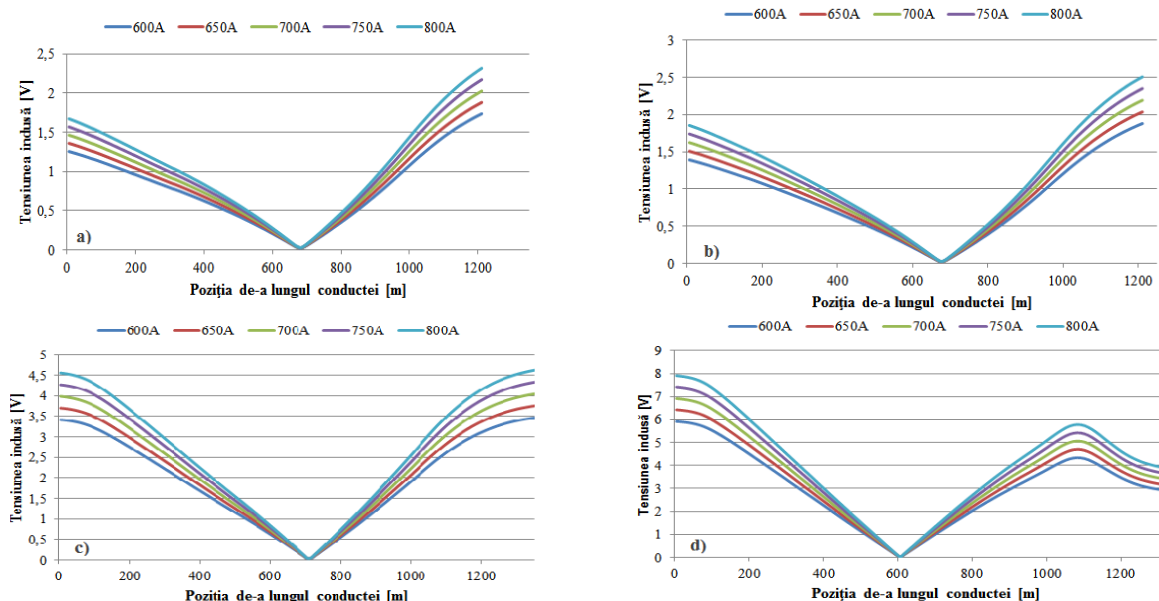


Figura III.20: Variația tensiunilor induse în funcție de încărcarea în curent a LEA pentru: a) Conducta T1; b) Conducta CI; c) Conducta T2 și d) Conducta T3

În urma analizei efectuate s-a constatat o variație liniară a tensiunilor induse în funcție de încărcarea în curent a conductoarelor de fază a LEA, o creștere 33% a curentului de încărcare producând o creștere de 25% a tensiunii induse. În figura 21 se prezintă variația amplitudinii tensiunilor induse în punctele de măsurare A și B pentru conductele T3 și T2:

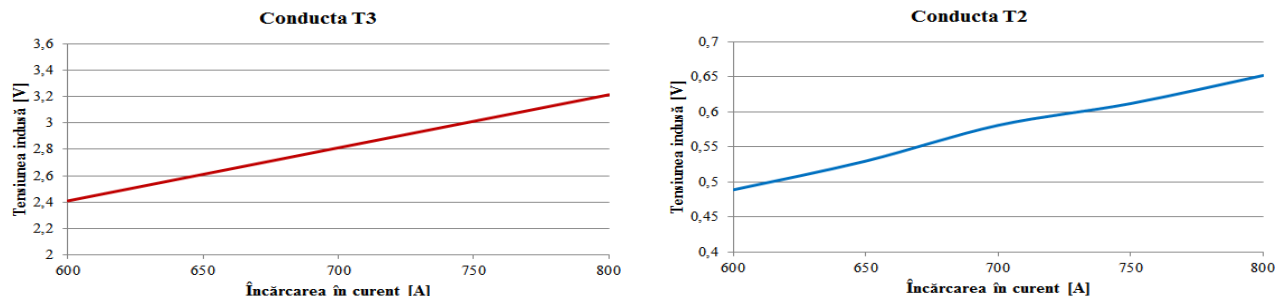


Figura III.21: Variația tensiunii induse în punctele A și B ale conductelor T3 și respectiv T2

În urma analizei efectuate se constată că în cazul conductelor tehnologice T1, CI și T2 o încărcare nesimetrică de 2% produce o scădere de 10% a tensiunii induse, pe când în cazul conductei T3 această încărcare nesimetrică produce o creștere de 11%. Efectul diferit asupra conductei T3 se explică prin poziționarea acesteia de cealaltă parte a axului LEA ca urmare această conductă prezentând o expunere diferită față de succesiunea conductoarelor de fază a LEA.

Măsurători in situ a tensiunilor induse. În vederea validării rezultatelor obținute în urma modelării și implementării problemei de interferență electromagnetică LEA-CM în programul *Interfstud* s-a realizat măsurarea in situ a tensiunilor induse în conductele tehnologice T3 și T2, prin intermediul unor cupoane de măsurare amplasate în locațiile A și B (a se vedea Figura III.16).

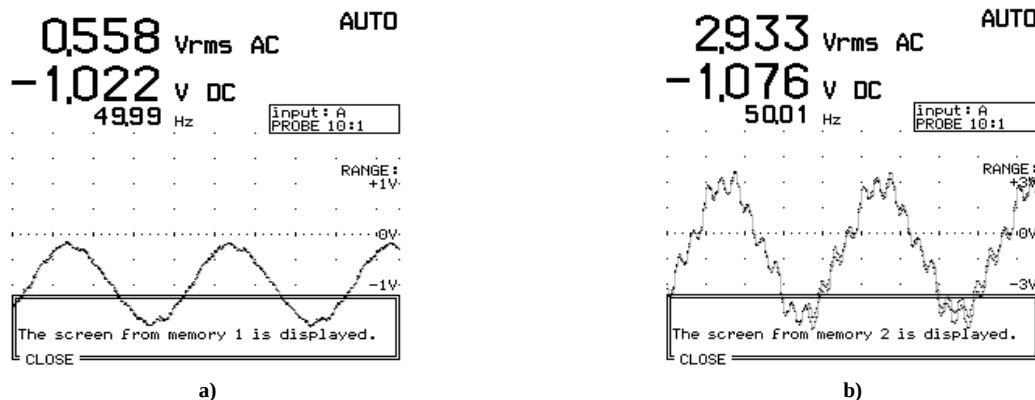


Figura III.22: Variația potențialul conductă-sol(electrod de Cu/CuSO₄ înregistrat în punctele de măsurare A și B

În Figura III.22 sunt prezentate variațiile potențialelor conductelor de tranzit T2 și T3 față de electrodul de zinc al cupoanelor de măsurare amplasate în punctele A și B înregistrate prin intermediul unui osciloscop de ce tip MoData. Se constată că valorile măsurate se încadrează în plaja de valori determinate pentru diferite încărcări ale LEA (Figura III.21), prin implementarea problemei în programul dezvoltat, fapt care validează simulările efectuate [44].

III.4.Implementarea unui circuit echivalent pentru modelarea procesului de coroziune a unor conducte metalice care împart același coridor de distribuție cu o linie electrică aeriană

Se realizează modelarea fenomenului de coroziune care are loc în CM supuse unor tensiuni alternative induse printr-un circuit electric nelinier echivalent. Acesta include elementele care corespund impedanței de polarizație, capacității de dublu strat și rezistenței soluției (solului) (Figura III.23).

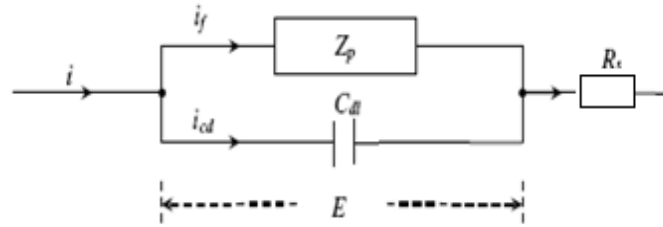


Figura III.23: Reprezentarea schematică a circuitului electric echivalent

Tensiunea (E) care se stabilește de-a lungul impedenței paralel dintre capacitatea de dublu strat (C_{dl}) și impedența de polarizație (Z_p) verifică ecuația diferențială [16, 50, 51]:

$$\frac{dE}{dt} + \frac{i_{corrDC}}{C_{dl}} \left[e^{\frac{E-E_{cor,DC}}{\beta_a}} - e^{\frac{-(E-E_{cor,DC})}{\beta_c}} \right] + \frac{E}{R_s C_{dl}} = \frac{E_{DC}}{R_s C_{dl}} + \frac{E_p}{R_s C_{dl}} \sin(\omega t) \quad (III.4)$$

Ecuația diferențială având ca soluție tensiunea aplicată de-a lungul materialului supus coroziunii s-a rezolvat utilizând o metodă numerică hibridă. S-au considerat diferite valori ale rezistenței solului și capacității de dublu strat, fig. 24÷25.

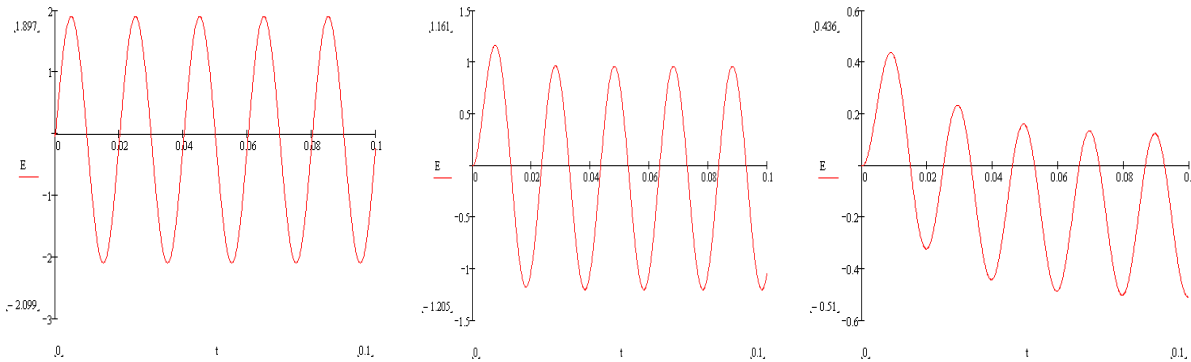


Figura III.24: Tensiunea E pentru diferite valori ale lui R_s (10Ω , 250Ω , 1000Ω)

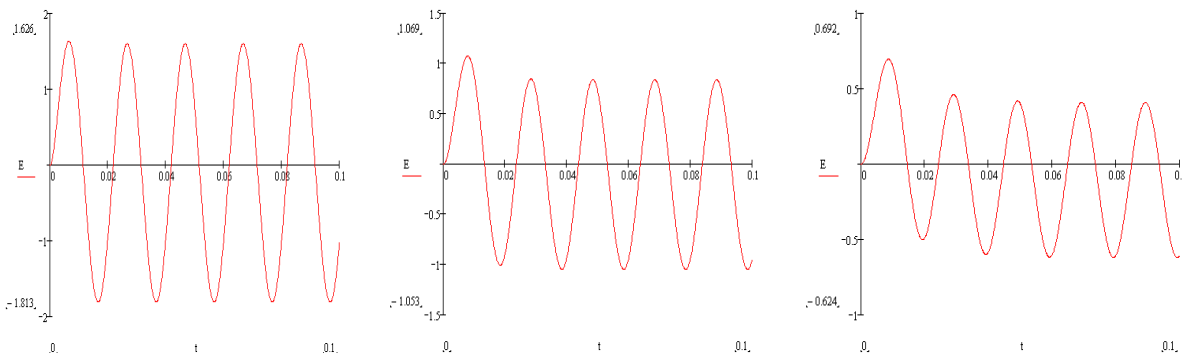


Figura III.25: Tensiunea E pentru diferite valori ale capacității C_{dl} ($20\mu F$, $60\mu F$, $120\mu F$)

Condensatorul acționează pentru drenarea curentului alternativ, creșterea capacității acestui dublu strat implică scăderea impedenței, ceea ce conduce la creșterea curentului care străbate elementul și deci scăderea curentului de coroziune.

Rezultatele obținute evidențiază faptul că fenomenul de coroziune este puternic influențat de condițiile de mediu în care se găsesc plasate materialele metalice (după cum s-a arătat, atât rezistența soluției cât și capacitatea de dublu strat sunt determinate de proprietățile fizice ale solului).

III.5. Dezvoltarea unei metode optimizate (pe baza circuitelor echivalente dezvoltate în cadrul metodei hibride) de poziționare și legare la instalațiile de împământare a conductelor îngropate, pentru obținerea unui efect maxim de reducere a amplitudinii tensiunilor induse. Dezvoltarea unei metode de atenuare a valorilor tensiunilor induse în conductele de lungime mare. Verificarea aplicabilității metodelor de atenuare dezvoltate în coridoarele comune CM-LEA prin teste și măsurători în teren.

Se propune o analiză în detaliu a influenței parametrilor geometrici și electrice asupra variației nivelului tensiunilor și curenților induși în conducte metalice (CM) cu traseu comun cu linii electrice aeriene (LEA). Scopul acestui studiu este de a oferi informații necesare în determinarea unor soluții tehnice pentru diminuarea fenomenelor de coroziune în mediul electromagnetic, prin atenuarea tensiunilor induse în conductele de gaz de către LEA cu care împarte același coridor de distribuție.

Tehnicile de atenuare propuse, pentru a reduce efectul cuplajului inductiv, pentru un sistem de conducte constând în tronsoane subterane sau supraterane sunt: minimizarea cuplajului inductiv prin proiectarea corespunzătoare a coridorului comun LEA-CM; legarea conductei la rețeaua de împământare; utilizarea flanșelor izolatoare.

O parte dintre conceptele de atenuare ale cuplajului inductiv, au fost verificate prin teste și măsurători în teren, în colaborare directă cu laboratorul de diagnosticare conducte din cadrul sucursalei de cercetare și proiectare pentru transport gaze naturale S.C.P.T.G.N.-Mediaș.

III.5.1 Reducerea câmpului electric de conducție longitudinal în zona de influență.

În scopul atenuării cuplajului inductiv, o LEA ar putea fi proiectată la modul ideal, pentru a genera un câmp electric de conducție longitudinal constant și minim, în conducta adiacentă. Acest câmp, rezultă ca urmare a trecerii curentului prin conductorul LEA, și nu este același cu câmpul electrostatic, care rezultă din potențialul conductorului liniei în raport cu pământul. În scopul întăririi acestei afirmații, s-au realizat modelări și simulări, pentru a urmări efectul ecranării și sincronizării fazelor conductoarelor liniei electrice, asupra câmpului electric longitudinal de conducție.

În scopul analizei influenței transpoziției fazelor LEA asupra variației tensiunii induse în CM, s-a investigat o problemă concretă de interferență LEA-CM: o conductă metalică subterană de gaz împarte pe o lungime de 12 km același coridor de distribuție cu o LEA 110kV/50Hz. (Figura III.26)

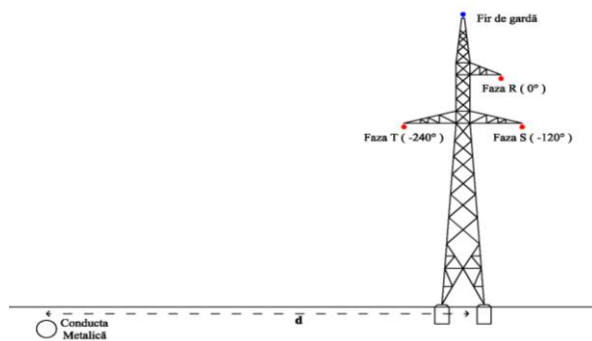


Figura III.26: Secțiunea transversală a problemei de interferență LEA-CM studiată

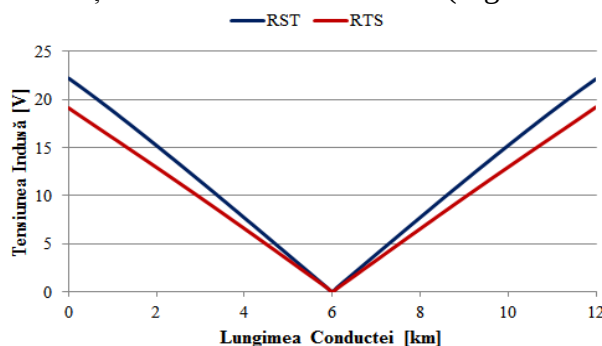


Figura III.27: Tensiunea indusă în CM (condiții normale de operare)

Implementând problema propusă în programul *InterfStud*, s-a evaluat tensiunea indusă în CM în condiții normale de funcționare a LEA, fără aplicarea transpozițiilor asupra fazelor LEA. S-a considerat o încărcare simetrică a fazelor cu un curent de 300 A, echivalentul unei puteri aparente

tranzitate de 33 MVA. S-a studiat atât cazul unei succesiuni directe, „RST” (faza R=0°, faza S=-120°, iar faza T=-240°), a fazelor pe stâlp, cât și cazul unei succesiuni inverse „RTS” (Figura III.27).

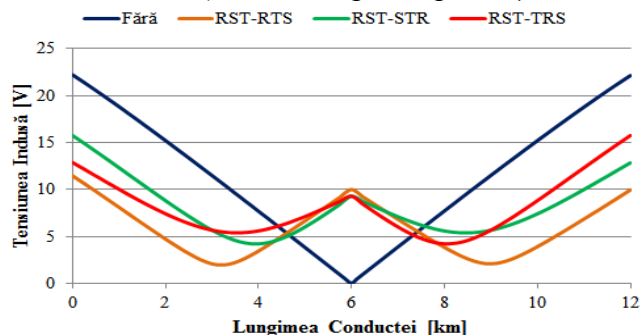


Figura III.28: Variația tensiunii induse în funcție de transpoziția aplicată

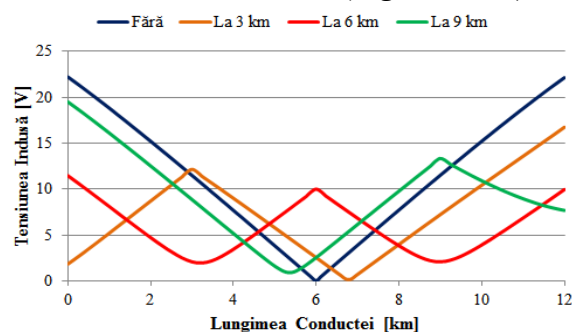


Figura III.29: Transpoziție „RST-RTS” aplicată în diferite locații

S-a constatat o scădere de 14% a valorii maxime a tensiunii induse în cazul succesiunii inverse (19.22 V) în comparație cu succesiunea directă a fazelor LEA considerată de bază. Ca urmare, în cadrul studiilor efectuate s-a folosit drept termen de comparație valoarea maximă a tensiunii induse obținute pentru succesiunea directă a fazelor (22.23 V). S-a studiat influența asupra tensiunii induse în CM, a unei transpoziții a fazelor LEA aplicată la mijlocul coridorului comun de distribuție. S-a analizat cazul unei succesiuni negative a fazelor aplicată secvenței directe „RST” (transpoziție de tip „RST-STR”), cazul unei succesiuni pozitive a fazelor aplicată secvenței directe „RST” (transpoziție de tip „RST-TRS”), și respectiv cazul unei transpoziții din secvență directă în secvență inversă (transpoziție de tip „RST-RTS”). Valorile tensiunii induse sunt comparate cu situația în care nu s-a aplicat transpoziția fazelor (Figura III.28 și Figura III.29).

S-a constatat o atenuare a nivelului tensiunii induse în CM ca urmare a aplicării transpoziției, cea mai mare scădere a valorii tensiunii induse se obține pentru transpoziția „RST-RTS”, și anume o atenuare de 48,37%. În acest caz valoarea maximă (11.48 V) a tensiunii induse se obține în dreptul transpoziției și respectiv la capetele CM.

Pentru o analiză detaliată a influenței transpozițiilor fazelor LEA asupra valorii tensiunii induse în CM, s-a investigat situația în care se aplică o transpoziție de tip „RST-RTS” în diferite locații de-a lungul coridorului comun de distribuție. S-a investigat atât cazul unei succesiuni negative a fazelor aplicate secvenței directe „RST” (transpoziții de forma „RST-STR-TRS”), precum și cazul unei secvențe de succesiuni pozitive a fazelor aplicate secvenței directe „RST” („RST-TRS-STR”). (Figura III.30)

În urma analizei efectuate, s-a constatat că alura tensiunii induse este simetrică pentru cele două succesiuni complete de transpoziție studiate. Valorile maxime ale tensiunii induse s-au obținut la capetele conductei, respectiv în dreptul punctelor de transpoziție (la 4 km, la 8 km față de începutul coridorului comun). În comparație cu situația în care nu s-au aplicat transpoziții, atenuarea nivelului de tensiune indusă a fost evaluată la o valoare de 56%. În schimb dacă aceste succesiuni complete de transpoziție se aplică unei secvențe inverse „RTS” a fazelor LEA, atunci atenuarea tensiunii induse devine de 65%.

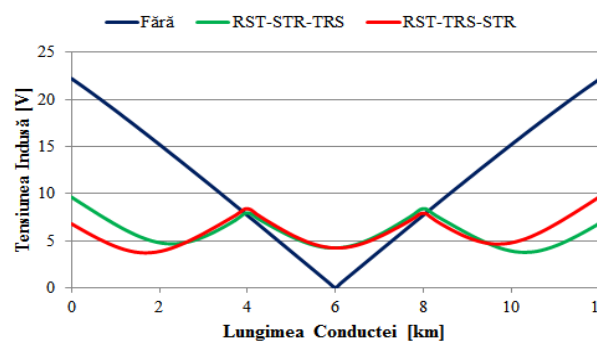


Figura III.30: Tensiunea indusă în CM în urma unei transpoziții complete

III.5.2 Eliminarea discontinuităților electrice sau geometrice dintr-o zonă de influență conductă de gaz – linie electrică aeriană

Se consideră o conductă metalică subterană de transport și distribuție a gazului metan care împarte pe o distanță de 1.3 km același coridor de distribuție, cu două LEA: de 110kV/50Hz respectiv 400kV/50Hz (Figura III.31) [43-44]. Solul se consideră omogen pe toată lungimea coridorului comun de distribuție, având o rezistivitate de 100 $\Omega \cdot m$.

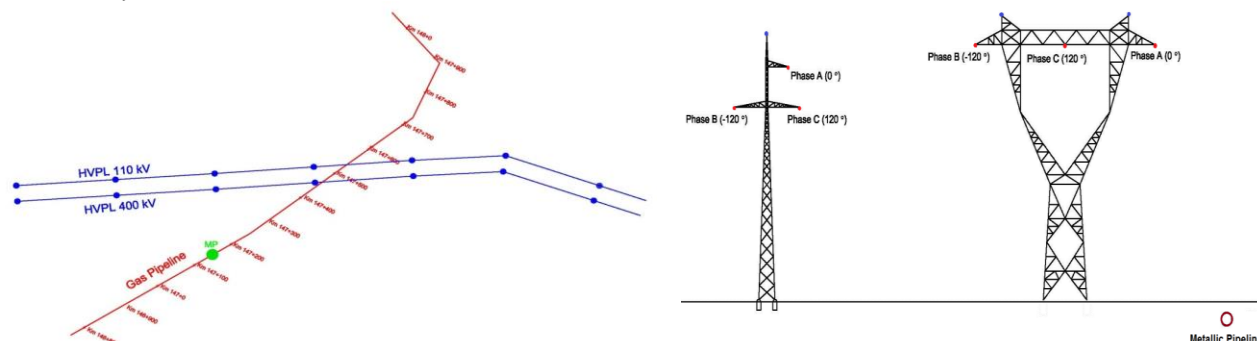


Figura III.31: Coridorul comun de distribuție LEA-CM

După implementarea problemei în programul *InterfStud* se obțin tensiunile alternative induse în CM. Conform reglementărilor europene [16, 51, 52], 1200 mV este valoarea considerată critică pentru tensiunea indusă într-o structură metalică, din punct de vedere al probabilității apariției fenomenului de coroziune. În cazul acestui studiu de caz, se poate observa din figura 32, prezența riscului de apariție a degradării prin coroziune.

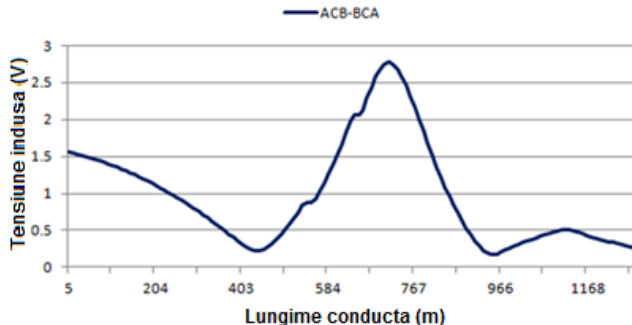


Figura III.32: Tensiunea indusă de-a lungul CM

Ca urmare a distribuției diferite a câmpului electromagnetic de o parte și de alta al axei LEA, pentru CM studiată, în punctul de subtraversare apare un vârf de tensiune indusă.

III.5.3 Sisteme optimizate de conectare a conductelor metalice la instalația de împământare pentru atenuarea tensiunilor induse

Se propun diverse tehnici de legare a conductelor metalice de gaz la instalația de împământare care pot fi implementate pentru a reduce amplitudinea tensiunilor induse în conducte, după instalarea utilităților în zona de influență. Cu toate că o conductă din zona de influență este proiectată folosind aproximări corespunzătoare, vârfurile tensiunii induse pot să apară pe o conductă la începutul sau la sfârșitul punctelor zonei de influență. Se prezintă metodele de atenuare a acestor vârfuri de tensiune folosind metode optimizate de poziționare și legare la instalațiile de împământare a conductelor îngropate conform analizei sursei distribuite prezentate în [45, 53].

Cea mai eficientă locație pentru instalația de împământare a unei conducte îngropate este punctul în care tensiunea indusă este maximă. Împământarea stabilită în acest punct duce la anularea distribuției exponențiale a tensiunii. Efectele de atenuare ale instalației de împământare sunt neglijabile la o tensiune adiacentă mai mare decât $2/\text{Real}(\gamma)$ m depărtare, unde γ reprezintă constanta de propagare. Prin urmare, împământarea ar trebui stabilită la fiecare maxim al tensiunii induse [54-57].

După cum se poate vedea din Figura III.33, riscurile datorate cuplajelor dintre CM și LEA pot fi atenuate prin legarea la rețeaua de împământare a conductei, folosind fie paturi independente de împământare, anozii distribuiți sau conductori orizontali de protecție, fie montând rețele de împământare la punctele de contact [55, 58].

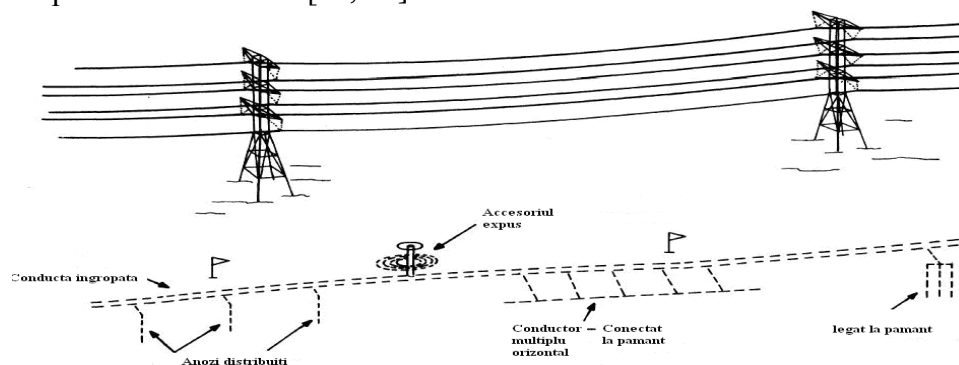


Figura III.33: Tehnici optime de atenuare a tensiunii induse

Asupra CM s-a utilizat ca măsură de reducere a valorilor tensiunilor induse, un conductor de atenuare situat în stânga conductei. S-au considerat două cazuri diferite: (1) CM și conductorul de atenuare nu sunt conectate între ele (2) conductorul de atenuare sunt conectate între ele.

După implementarea problemei în programul Interfstud se obțin tensiunile alternative induse în CM (Figura III.34), utilizarea conductorului de atenuare dovedindu-se a fi mai eficientă, atunci când acesta este conectat la CM. Pentru cazul studiat, s-a reușit o reducere a tensiunilor induse, la extremitatea stângă a CM, de până la 66% respective de până la 21% în zona de subtraversare a LEA.

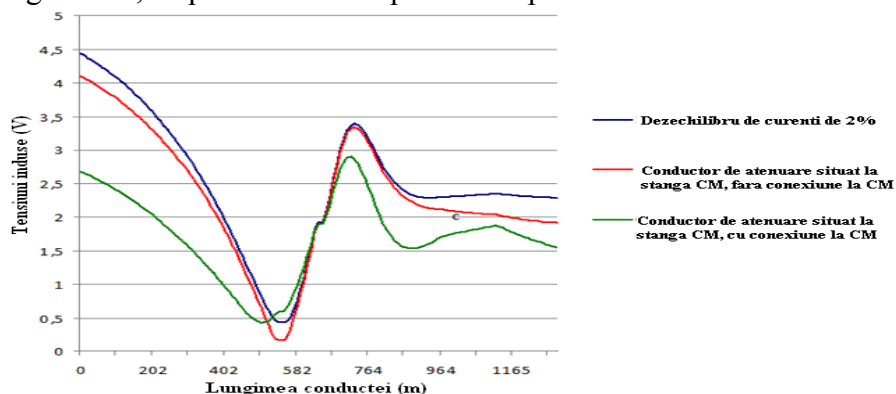


Figura III.34: Tensiunile induse în CM, utilizând conductor de atenuare

III.5.4 Utilizarea flanșelor izolatoare.

S-au considerat spre analiză trei situații diferite de atenuare a interferențelor electromagnetice LEA-CM cu ajutorul flanșelor izolatoare, pe CM: *Cazul 1*: extremitățile segmentului suprateran al CM este conectat la flanșe izolatoare; *Cazul 2*: fiecare capăt de tronson care prezintă conexiune de izolare prezintă împământare (CM s-a considerat formată din 8 tronsoane, deoarece de-a lungul axei

de simetrie al coridorului comun, conducta are orientare diferită); *Cazul 3*: pe toată lungimea conductei de gaz, atât segmentele subterane cât și cele supraterane, sunt prevăzute împământări.

Analizând rezultatele prezentate în Figura III.35, se constată atenuare considerabilă a tensiunilor induse, de până la 80%, în urma utilizării flanșelor izolatoare[59].

Un studiu comparativ al performanțelor obținute prin utilizarea conductoarelor de atenuare respectiv a flanșelor izolante (Figura III.34 versus Figura III.35) demonstrează faptul că cea de a doua tehnică de atenuare este mai eficientă.

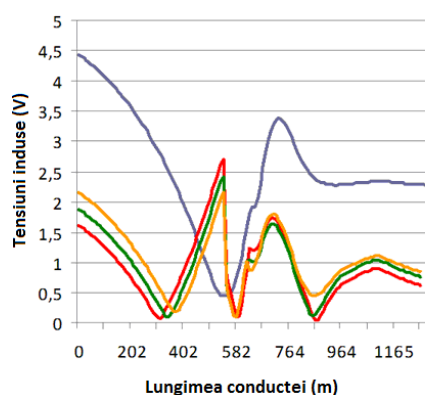


Figura III.35: Tensiunile induse de-a lungul conductei utilizând flanșe izolante

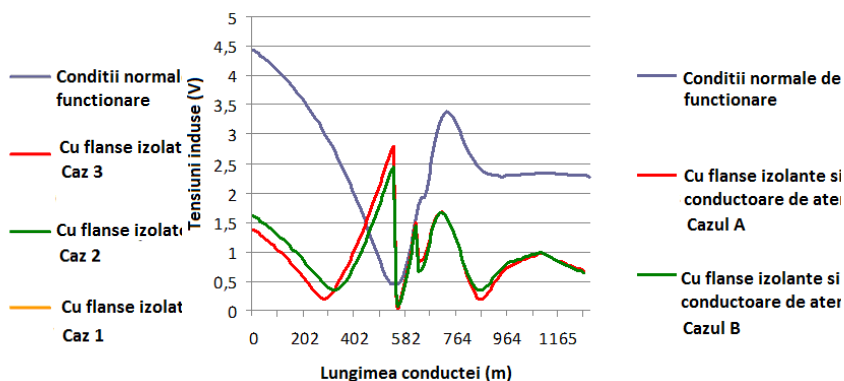


Figura III.36: Tensiunile induse de-a lungul conductei utilizând flanșe izolante și conductoare de atenuare

Asupra aceleiași CM s-au aplicat simultan, ca tehnici de atenuare a tensiunilor induse, atât conductoare de atenuare cât și conexiuni de izolare. Într-un prim caz (cazul A), conductorul de atenuare este conectat la CM numai la extremitățile acestuia iar în alt caz (cazul B), presupune ca la fiecare 100m, conductorul de atenuare să fie conectat la CM. Comparând rezultatele obținute (Figura III.36) se constată faptul că acest procedeu poate fi mai eficient decât în cazul utilizării fiecărei tehnici independent.

IV. Dezvoltarea și implementarea unor dispozitive de drenare controlată a curenților de dispersie induși pentru protejarea și îmbunătățirea protecției catodice a conductelor metalice subterane cu traseu comun cu o LEA

IV.1. Monitorizarea fenomenului de coroziune

IV.1.1 Coroziunea sub curent alternativ a sistemelor de conducte de transport gaze naturale protejate catodic

Pe lângă inducția în curent alternativ care are un efect coroziv asupra conductelor izolate metalice, montate îngropat, apar și curenți între conductele izolate, curenți care se numesc curenți de schimb. Oricât de bine izolate ar fi conductele, la montarea acestora în sol, apar defecte la izolație. Datorită potențialelor diferite la care se găsesc conductele metalice izolate aflate sub protecție catodică, peste care se suprapun tensiuni induse provenite de la LEA, determină ca în cazul existenței unor defecte în izolațiile sistemelor de conducte să apară curenți de schimb [60].

Amplitudinea acestor curenți depinde de: calitatea izolației conductelor; distanța dintre liniile conducte; rezistivitatea solului; potențialul conductelor influențate de liniile electrice aeriene; distanța

față de stația de protecție catodică sau de sistemul de protecție catodică; calitatea drenajului curenților alternativi induși.

S-a realizat o modelare a unui sistem de conducte protejate catodic [61] (în care sunt simulate o serie de defecte), aflate sub influența LEA, reprezentat în Figura IV.1:

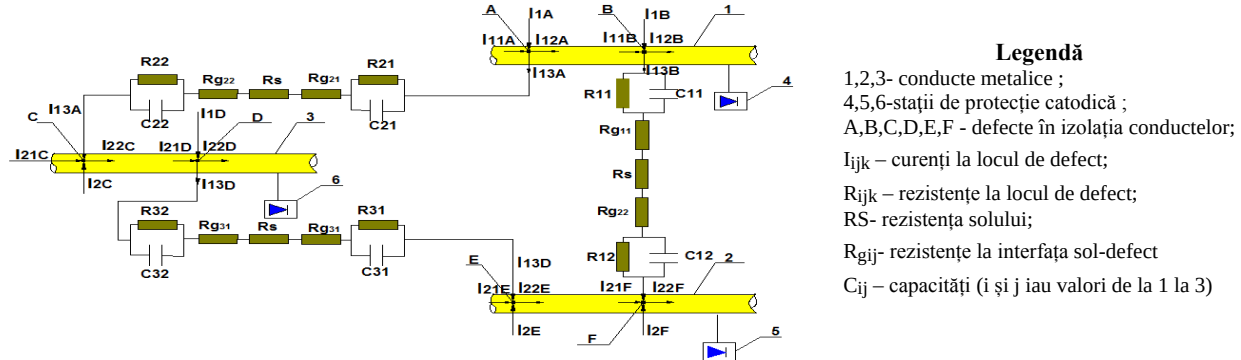


Figura IV.1: Modelarea curenților de schimb la un sistem de conducte protejate catodic

În general un defect de izolație se poate modela ca o rezistență montată în paralel cu un condensator. Un exemplu, în Figura IV.1 este acela că la defectul notat cu **A**, simularea unui defect este dat de grupul R_{21} - C_{21} . Dacă este să ne referim la potențialul E_{OFF} , un exemplu, este dat de căderea de tensiune pe grupul R_{21} - C_{21} , de curenții I_{13A} , iar E_{ON} este dat de căderea de tensiune pe grupul R_{21} - C_{21} la care se adaugă cădere de tensiune pe R_{g21} .

Curenții de schimb între conducta **1** și **3** este I_{13A} , între conducta **3** și **2** de I_{13D} , iar între **1** și **2** de curenții I_{13B} .

Se poate aprecia că valorile lui C_{ij} sunt de ordinul 10 – 300 mF, iar ale rezistențelor R_{ij} sunt de ordinul 1-1000 Ω . Aceste valori sunt în această plajă largă, datorită formării de pelicule calco-magneziene la locul de defect după un timp de la funcționarea protecției catodice. Fenomenele distructive produse de curenții de dispersie generați de LEA, asupra izolației și a materialului tubular al conductei îngropate, sunt bine documentate în literatura de specialitate [6, 37]. În acest raport, se vor prezenta studiile efectuate privind posibilitățile de drenare cu dispozitive electronice de **concepție originală**, rezultatele măsurătorilor fiind puse în evidență cu ajutorul unui osciloscop digital portabil.

IV.1.2 Identificarea prin măsurători on-line a curenților de dispersie, care pot accelera coroziunea conductelor metalice

Prin stațiile de protecție catodică se injectează un curent de anulare a efectului coroziv într-o conductă de transport gaze naturale montate subteran. În urma injectiei de curent prin priza anodică, în conductă apare un potențial măsurat în dreptul prizei de potențial din dreptul stației de protecție catodică având forma din Figura IV.2a. La o distanță de aproximativ 1 km de punctul de injectie al curentului de protecție catodică, potențialul conductei are tendința să se transforme dintr-un semnal pulsatoriu, într-unul continuu, ca în Figura IV.2b:

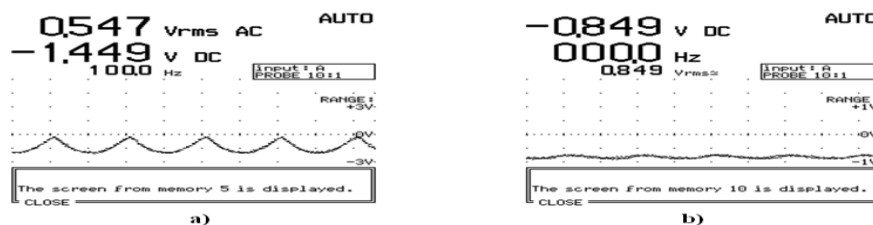


Figura IV.2: Potențialul conductă-sol măsurat: a) în dreptul unei stații de protecție catodică; b) la aproximativ 1 km distanță

Potențialele notate cu E_{ON} sunt măsurate cu stația de protecție catodică pornită. Ceea ce este de remarcat la cele două forme de undă, este faptul că la aproximativ 1 km de punctul de injecție, potențialul E_{ON} al conductei a scăzut la valori la care protecția catodică nu mai este asigurată, în conductă inițiindu-se un proces de coroziune. Acesta este o modalitate practică de a evidenția slaba calitate a izolației unei conducte. În acest caz este recomandată investigarea defectelor de izolație, cu metode de investigare de la suprafața solului, CIPS și DCVG (Raport TE_253_2012) [19].

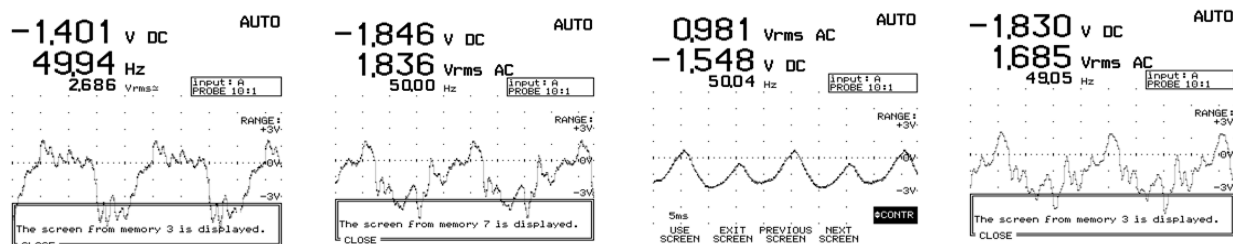


Figura IV.3: Potențiale conductă-sol pe conducte de transport gaze naturale aflate sub influența curenților alternativi produși de liniile electrice din imediata vecinătate

IV.2. Principii de proiectare a unui dispozitiv de drenare a curenților de dispersie

IV.2.1 Criterii de eficiență a dispozitivului

Concepția, funcționalitatea și eficiența dispozitivului de drenare propus vor ține cont de câteva principii restrictive (care nu apar în literatura de specialitate) având în vedere complexitatea fenomenului de coroziune în ansamblul ei:

- ❖ Desprinderea izolației de pe conductă metalică poate să apară la valori ale tensiunii induse mai mari de 1230 mV, potențial E_{IRfree} , deci amplitudinea potențialului conductă-sol ar trebui limitată sub această valoare;
- ❖ Trebuie drenată obligatoriu alternanța pozitivă a semnalului alternativ indus în sistemele de conducte;
- ❖ Alternanța negativă a semnalului indus în sol va fi utilizată pentru protejarea catodică a conductei, iar spike-urile acestea vor fi limitate la valoarea de -1230 mV;
- ❖ Respectarea obligatorie a cerințelor privind criteriile de coroziune sub curent alternativ impuse de SR EN 15280-2011 (10 V la peste 25 $\Omega \cdot m$; 4 V la sub 25 $\Omega \cdot m$) [62].

IV.2.2 Descrierea dispozitivului de drenare a curenților de dispersie proiectat – DDCD

Dispozitivul de drenaj va proteja orice conductă aflată în apropierea LEA, inclusiv la un defect monofazat (căderea accidentală a unei faze la pământ); fiind posibilă apariția unei supratensiuni induse în conductă, timpul de răspuns al dispozitivului este mai mic de 0.1 sec. Dispozitivele de drenaj testate au dovedit o eficiență remarcabilă bine pusă în valoare de către măsurători. Dacă priza de pământare are rezistențe de dispersie la valori de $< 4 \Omega$, se poate afirma că numai utilizând aceste dispozitive se poate proteja catodic o conductă care are traseu comun cu o linie electrică aeriană cu tensiuni mai mari de 20 kV. Un alt avantaj al dispozitivului este faptul că nu mai trebuie păstrată o distanță minimă de protecție între LEA și conductele îngropate.

Acest dispozitiv a fost conceput în colaborare cu Laboratorul de Diagnosticare Conducte (SNTGN Transgaz SA) în urma unor multiple simulări în laborator și teste *in situ*, inclusiv pentru reducerea dimensiunilor și pregătirea lui pentru funcționare în medii cu pericol de explozie.

Pe plan național, sunt cunoscute o serie de dispozitive care limitează amplitudinea alternanței pozitive a tensiunii alternative induse în conductă, la valori acceptabile din punct de vedere al comportării în timp al izolațiilor. Dezavantajul acestora este acela că amplitudinea alternanței negative nu este limitată la un nivel acceptabil, care să nu dăuneze izolațiilor aplicate pe conductele îngropate. Potențiale a căror valori efective sunt mai negative de -1100 mV, măsurate prin intermediul electrodului de Cu/CuSO_4 , dăunează izolațiilor aplicate pe conducte ducând la desprinderea catodică.

Pe plan internațional există o serie de dispozitive care drenează curenții de dispersie induși în conductele subterane, fără a fi disponibile informații cu privire la nivelul limitării potențialelor instantanee. Este de asemenea cunoscut că toate aceste dispozitive nu sunt utilizate pentru protejarea catodică a CM izolate, montate îngropat, rolul lor fiind de diminuare a influenței curenților induși sau de protejare a conductelor la supratensiuni instantanee apărute datorită unui defect pe LEA.

Dezavantajul acestor dispozitive este gabaritul mărit, lipsa controlului privind potențialul de protecție catodică (potențial IR_{free} care trebuie să fie cuprins între -850 mV și -1100 mV), precum și faptul că izolația nu este protejată la supra-protecție catodică [63].

Dispozitivul propus este destinat protecției catodice a CM montate îngropat și izolate la exterior, care prin drenarea controlată a curenților de dispersie induși de liniile electrice aeriene, cu tensiunea ≥ 110 kV, aflate la mai puțin de 100 m de conducte, asigură atât încadrarea în parametrii corespunzători din punct de vedere al protecției catodice (eliminând supra-protecția catodică), cât și protejarea izolației conductei. Dispozitivul asigură limitarea potențialului conductă – sol, măsurat prin intermediul electrodului nepolarizabil Cu/CuSO_4 , la o valoare minimă $IR_{free} = -1100$ mV; datorită gabaritului mic montarea se va face între conductă și orice priză de pământare cu rezistența de dispersie $< 2 \Omega$. Ca dezavantaj principal: în cazul apariției unor curenți > 25 A dispozitivul se defectează (apariția unor astfel de curenți în conductele de transport gaze naturale ale TRANSGAZ nu a fost încă semnalată).

În Figura IV.4a este prezentat un detaliu de execuție a DDCCD, iar în Figura IV.4b câteva din variantele constructive ale dispozitivului testate.

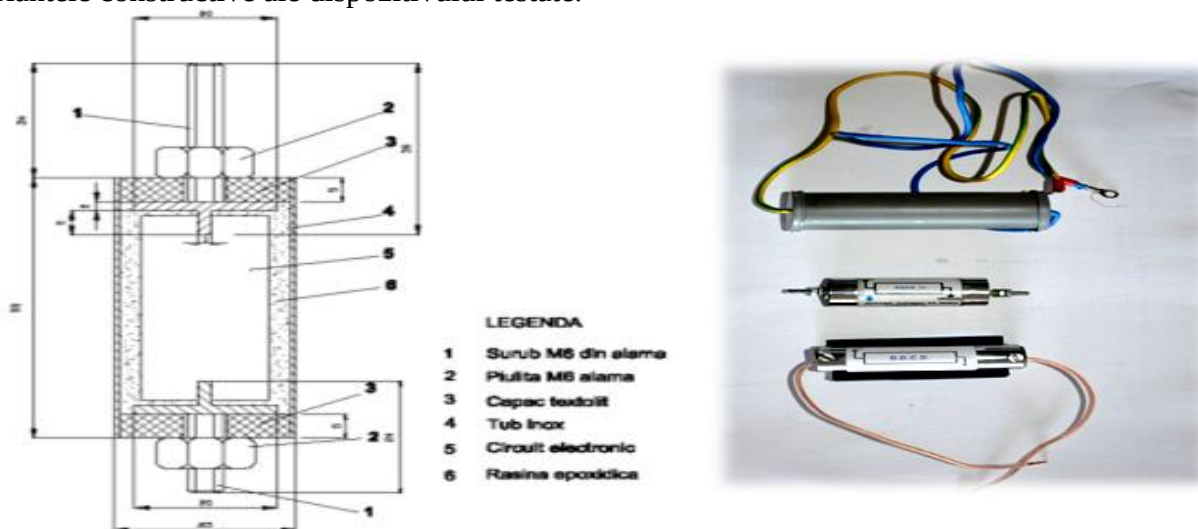


Figura IV.4: *Potențiale conductă-sol pe conducte de transport gaze naturale aflate sub influența curenților alternativi produși de liniile electrice din imediata vecinătate*

Dispozitivul de drenare este intercalat în circuitul electric între conductă și priza de pământare, așa cum este prezentat în schemă bloc (Figura IV.5).

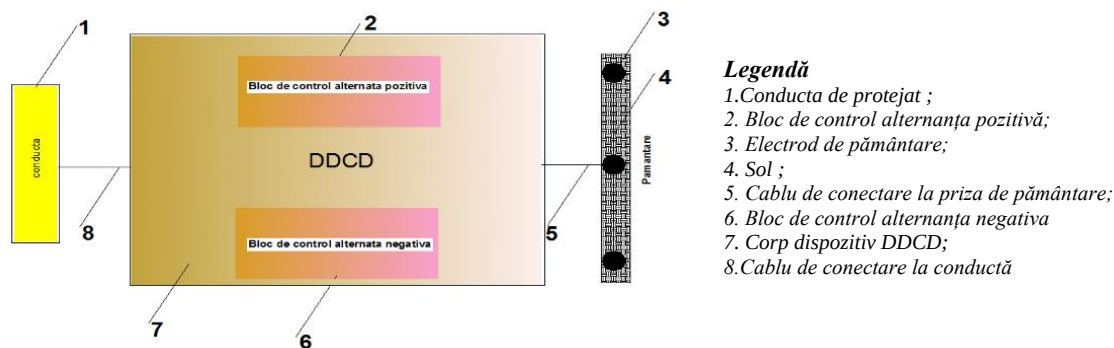


Figura IV.5: Schema electronică monobloc a DDCCD și conexiuni externe

IV.2.3 Testări și simulări funcționale ale dispozitivului – condiții de laborator

Înainte de verificarea funcționării și eficienței dispozitivului de drenare în situ, acesta a fost testat în laborator. Schema electrică echivalentă a dispozitivului care simulează comportarea în teren este realizată în PSPICE, Figura IV.6. La bornele secundarului unui transformator TR1 se leagă blocul capacitiv/rezistiv C1/R5, care simulează un defect de izolație și dispozitivul de drenare, care face legătura cu rezistența R6, care simulează rezistența de dispersie a prizei de pământ.

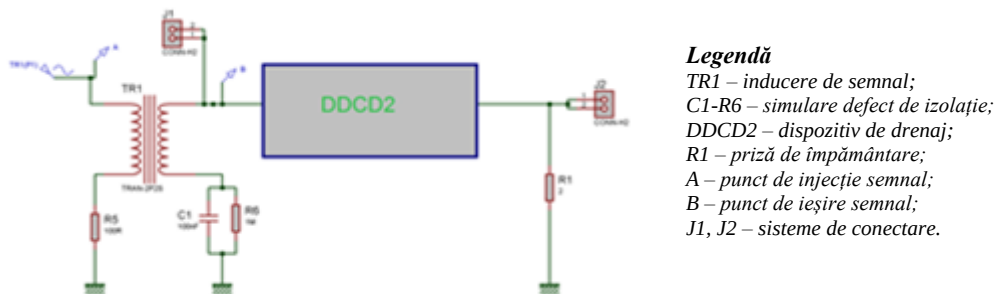


Figura IV.6: Schema de simulare a funcționării dispozitivului

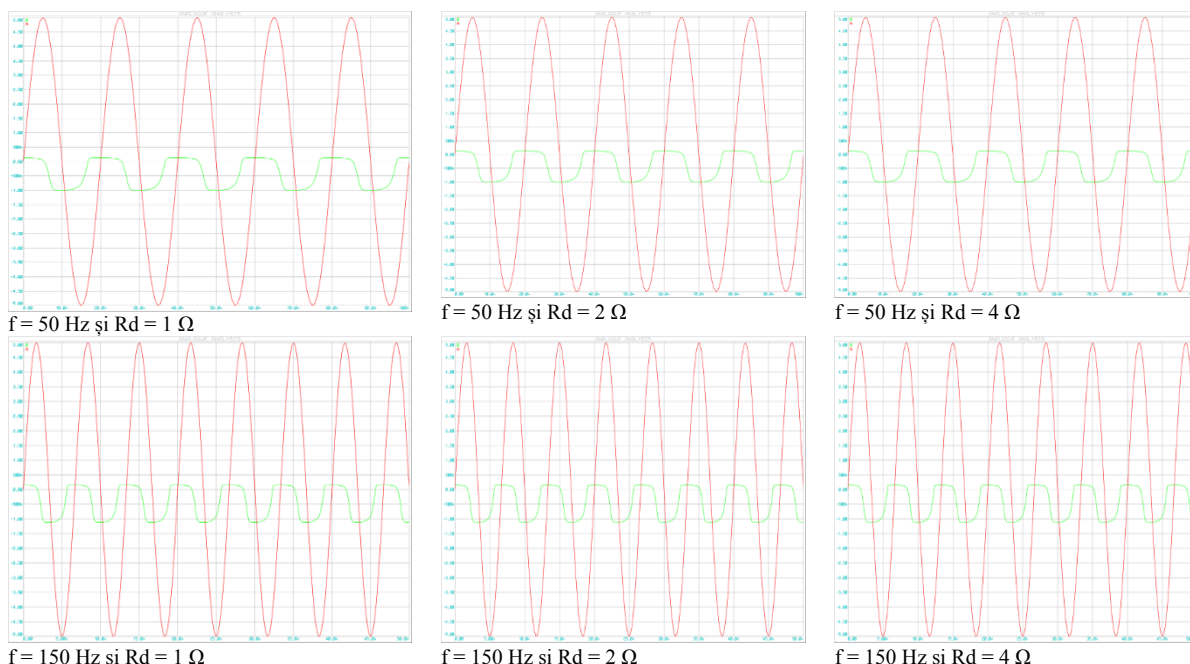


Figura IV.7: Simularea dispozitivului DDCCD la diferite frecvențe (f) și variate rezistențe de dispersie (R_d)

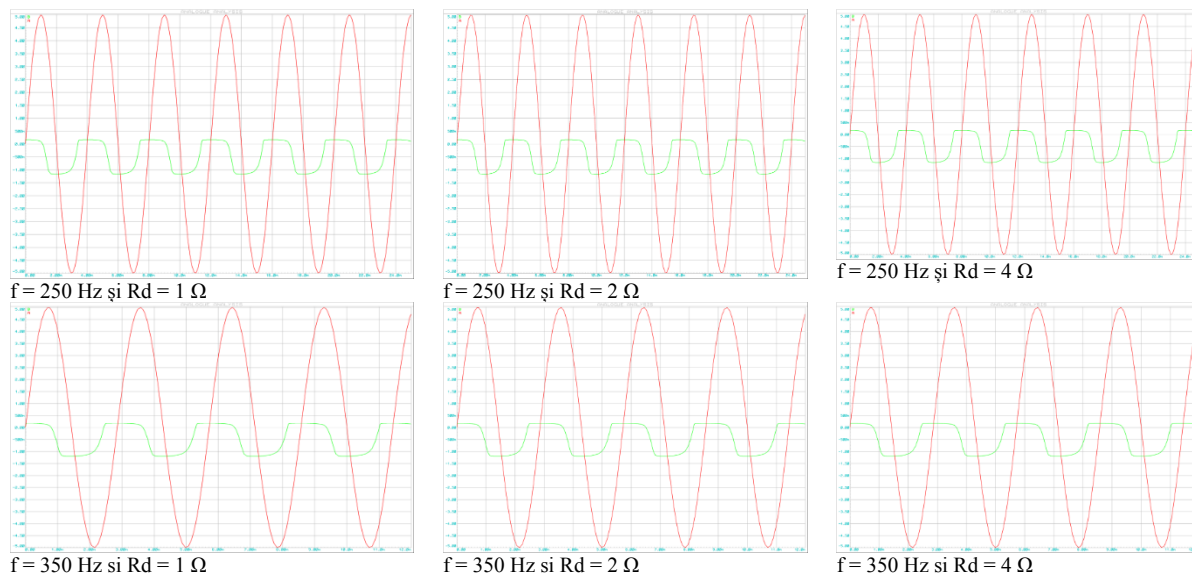


Figura IV.8: Simularea dispozitivului DDCD la diferite frecvențe (f) și variate rezistențe de dispersie (R_d) (Continuare)

Din analiza acestor grafice, se observă funcționarea corespunzătoare a DDCD la toate frecvențele testate, pentru prize de pământare cu rezistențele cele mai uzuale întâlnite în practică (1, 2 și 4 Ω). Cu roșu se reprezintă frecvența inițială, iar cu verde se reprezintă semnalul după montarea DDCD pe o conductă.

Se observă că: semialternanța pozitivă este redusă până la amplitudini maxime de 0.28 V; semialternanța negativă este redusă la valori maxime de -1.1 V (valoarea critică a potențialului de protecție catodică a conductelor); dispozitivul funcționează corespunzător inclusiv până la armonica a 7-a (350 Hz); simularea s-a realizat pentru vârfuri de până la 5 V (10 V_w), maxim regăsit *in situ* pe conductele de transport.

IV.3. Punerea în evidență a eficienței dispozitivului

IV.3.1 Tehnici de măsurare in situ

Chiar dacă simulările au dovedit o funcționare corespunzătoare a dispozitivului, pentru a dovedi eficiența practică s-a realizat și o analiză *in situ* a dispozitivului în două etape:

- ❖ montarea dispozitivului pe o conductă de transport gaze naturale și injecție de semnal alternativ de diferite frecvențe cu aparatură dedicată;
- ❖ montarea dispozitivului pe o conductă pe care s-au determinat curenți de dispersie alternativi și testarea eficienței acestuia.

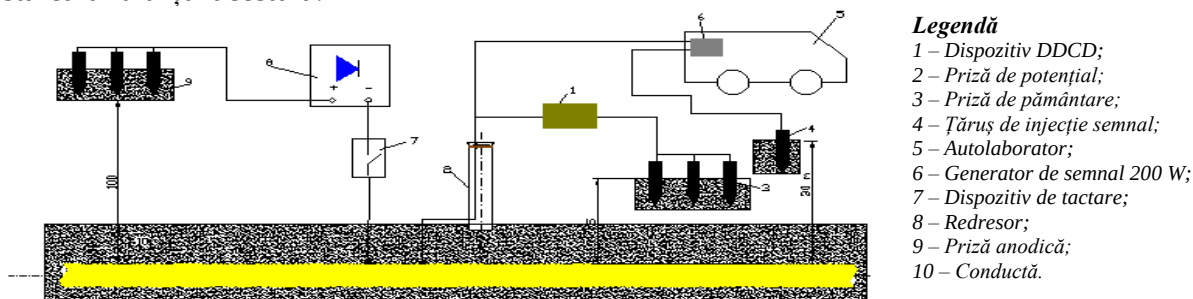


Figura IV.9: Testarea *on-site* a dispozitivului DDCD prin injecție forțată de semnal

Injectia de semnal a fost asigurată de un generator de semnal cu o putere de 200 W care asigură ca indiferent de calitatea izolației conductei, semnalul injectat să fie suficient de puternic pentru a asigura o testare la amplitudini mari a dispozitivului.

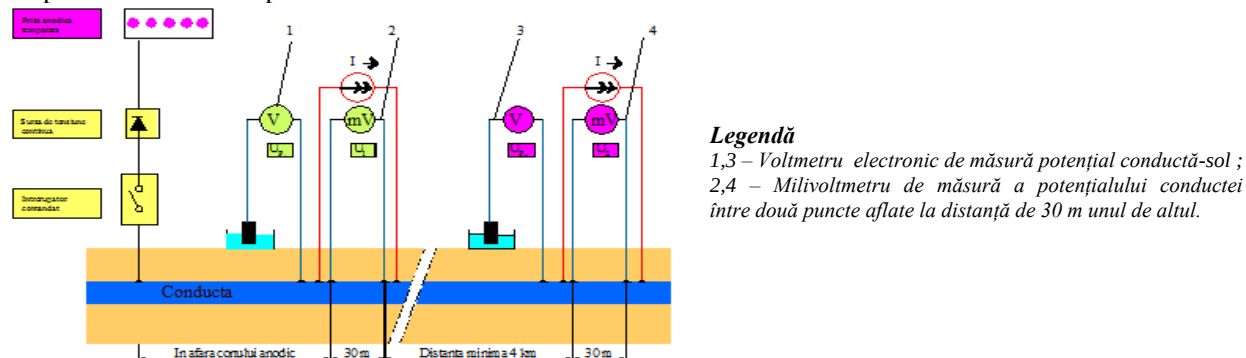


Figura IV.10: Testarea on-site a dispozitivului DDCC prin injectie forțată de semnal

În etapa a doua a măsurărilor on-site pentru testarea eficienței dispozitivelor de tip DDCC, s-au analizat curenții de dispersie care apar pe o serie de conducte de transport gaze naturale, aflate sub influența LEA (cazuri practice). Dispozitivul s-a montat la prizele de potențial între conductă și o priză de pământare, Figura IV.10.

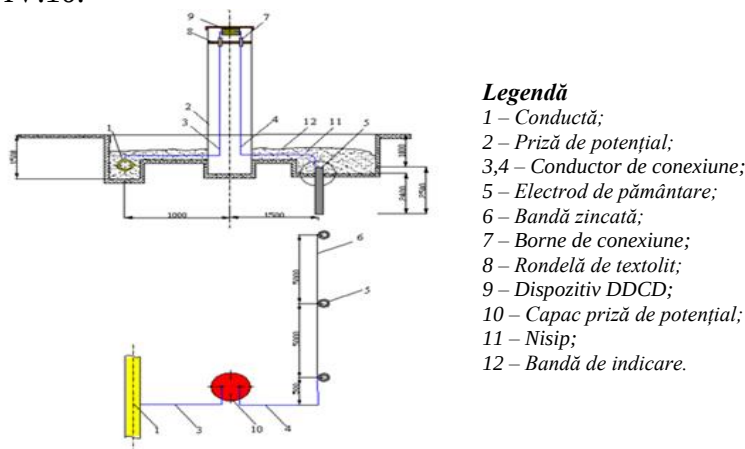


Figura IV.11: Testarea on-site a dispozitivului DDCC prin injectie forțată de semnal

IV.3.2 Testarea in situ a dispozitivului de drenare a curenților de dispersie

Pentru punerea în evidență a eficienței dispozitivului, s-a realizat o interpretare a măsurărilor efectuate pe un caz practic - un sistem de conducte paralele cu o LEA de 400 kV, cu sau fără influența curenților de dispersie alternativă Figura III.16: Conducta Tranzit 2 (T2) - 1200 mm – izolație cu bitum foarte întărită – anul punerii în funcțiune 1988 – grosimi de perete 14,3 mm și 17,3 mm; Conducta Tranzit 3 (T3) - 1200 mm – izolație cu bitum foarte întărită – anul punerii în funcțiune 2001 – grosimi de perete 14 mm, 17 mm și 22 mm.

Situația existentă în momentul măsurărilor a permis folosirea tuturor stațiilor de protecție catodică de pe întreg traseul. S-au măsurat potențialele naturale conductă-sol pe întreg sistemul de conducte paralele, potențialele On și Off pe întregul sistem în momentul tactării stațiilor de protecție catodică de pe T3 (cuplarea stațiilor 12 secunde în On și 3 secunde în Off).

S-au realizat analizele influențelor paralelismului în dreptul fiecărei stații de protecție catodică unde circulația de curenți între conducte este mai mare. S-a analizat și modul în care pornirea unei stații de protecție catodică influențează conductele paralele din apropiere.

Potențialele conductă-sol, măsurate cu osciloscopul catodic la locația aleasă sunt prezentate în Figura IV.12a și Figura IV.12b:

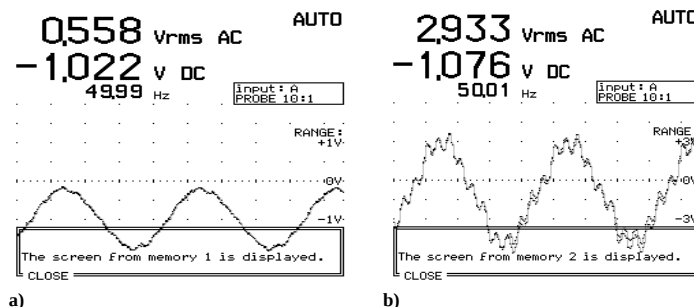


Figura IV.12: Potențial conductă-sol pe conducta a) T2, respectiv b) T3

Se poate observa prezența pe cele două conducte a unor curenți de dispersie alternativi la frecvența de 50 Hz, pe conducta T3 apar spike-uri de ordinul a 8 V_{VV} și un V_{rms} de 2.933 V, spike-uri periculoase de aproximativ 2 V_{VV} sesizându-se și pe conducta T2.

Deși în momentul măsurării, nu existau stații de protecție catodică în imediata apropiere (cele mai apropiate stații erau la aproximativ 8 km distanță), practic potențialele măsurate în c.c. pe cele două conducte erau suficient de apropiate de potențialul de protecție de -1.1 V (potențialele în c.c.). Dar prezența curenților de dispersie induși de LEA alterează alura potențialele conductă-sol. În figura IV-10b se poate observa că peste frecvența de 50 Hz, este modulat un semnal de origine necunoscută.

Pentru a observa influența pe care DDCD o are asupra unei conducte pe care există protecție catodică, curenți de dispersie și semnal injectat suplimentar de frecvență cunoscută, s-a integrat pe conducta T2 o stație de protecție catodică cu următoarele caracteristici: tensiune U=12.6 V și respectiv curent injectat de 4.8A. Suplimentar din generatorul de semnal s-a injectat un semnal în conducta T2 cu frecvența de 491 Hz la tensiune de 35 V și curent de 2 A care modulează frecvența de 50 Hz a LEA din apropierea conductei, Figura IV.12.

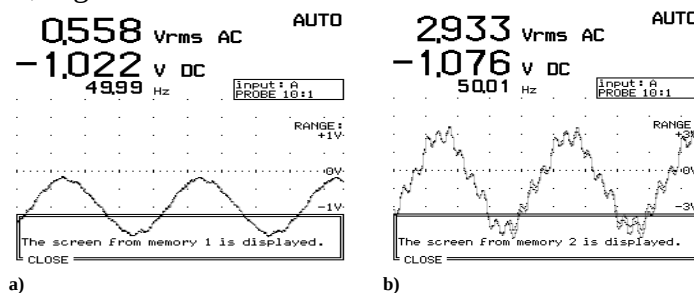


Figura IV.13: Potențial EON (a), respectiv EOFF (b) pe conducta T2 cu injecție de semnal

În Figura IV.13a a fost măsurat potențialul E_{ON} (pe durata celor 12 secunde de pornire a stației de protecție catodică) și apoi cu același osciloscop digital, s-a măsurat și potențialul E_{OFF} pe aceeași conductă. Graficele din Figura IV.13a și Figura IV.13b, respectiv Figura III.14a și Figura III.14b au fost obținute fără DDCD montat respectiv cu DDCD montat pe T2.

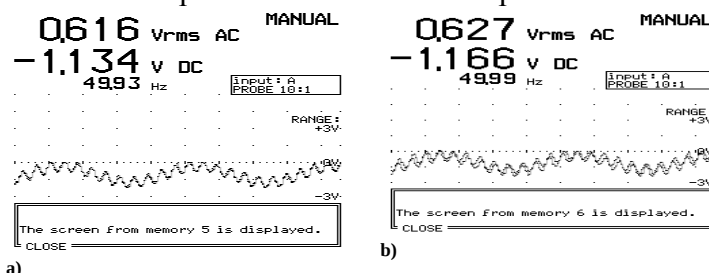


Figura IV.14: Potențial EON (a), respectiv EOFF (b) pe conducta T2 cu montare DDCD

După montarea dispozitivului DDCD pe conducta T2 apare: modificarea potențialului E_{ON} și a potențialului E_{OFF} al conductei T2 și menținerea lor în parametri corespunzători unei protecții catodice de foarte bună calitate; reducerea amplitudinii potențialului conductei și a spike-urilor la valori la care nu există riscul apariției fenomenului de desprindere catodică; potențialul E_{OFF} este păstrat în condiții optime chiar dacă inițial acesta avea valoarea în c.c. de numai -0.606 (a ajuns la valoarea de -1.166 V).

De asemenea s-a montat un dispozitiv cu memorie și pe conducta T2 pentru a observa toate influențele ce apar la măsurători, Figura IV.15, influența tactării On/Off a conductei T2 asupra conductei T3 fiind mult diminuată.

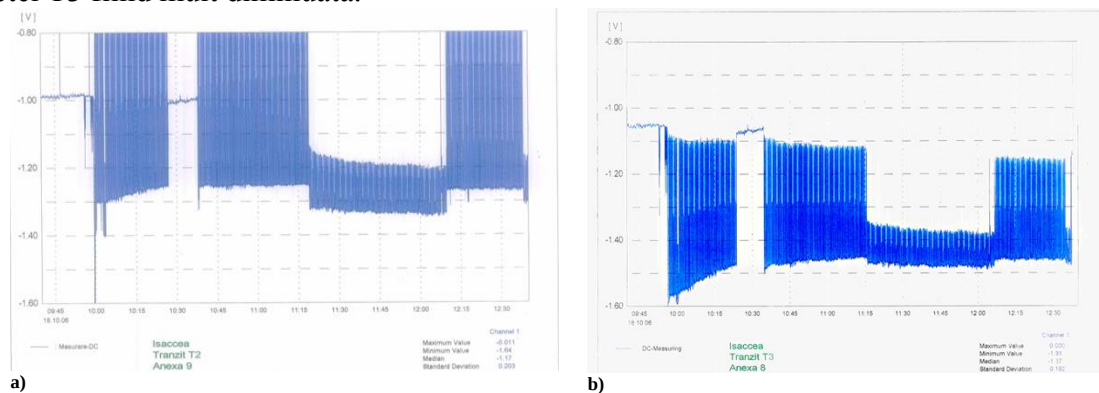
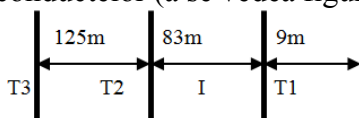


Figura IV.15: Potențial ON/OFF măsurat cu dispozitive de tip Minilog pe conducta T2 (a), respectiv conducta T3 (b)

IV.3.3 Studiu de caz S.P.C. Saun

Date inițiale: Stațiile de protecție catodică instalate pe conductele Tranzit T1, T2, T3 și Import I; Rezistivitatea solului $44 \Omega \cdot m$; Potențial natural conductă-sol: T1: -355 mV, T2: -425 mV, T3: -530 mV, I: -384 mV; Schița amplasării conductelor (a se vedea figura IV-10; în dreptul locațiilor A și B):



Măsurători: La această locație au fost identificați curenți de dispersie și au fost măsurate potențialele pe conductele T1 și I. Formele de undă în cazul pornirii stației de protecție catodică pe T3 și opririi stațiilor de protecție catodică pe T2, T1 și I sunt prezente în figura IV-14:

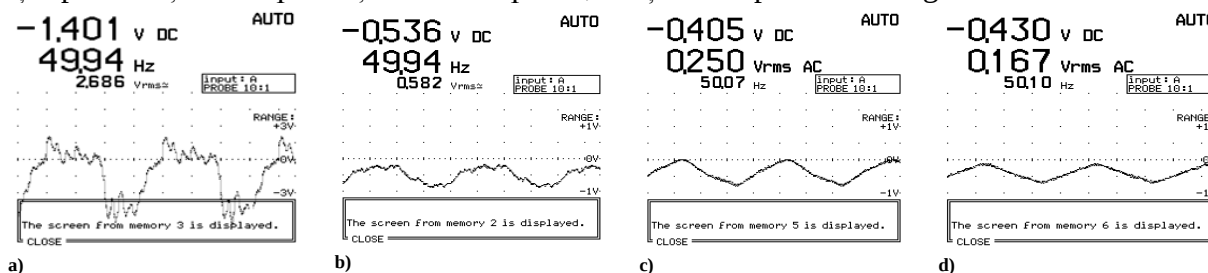
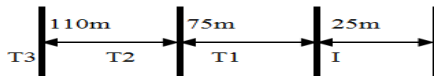


Figura IV.16: a) Potențial EON pe conducta T3; b) Potențial EOFF pe conducta T2; c) Potențial EOFF pe conducta T1; d) Potențial EOFF pe conducta Import

IV.3.4 Studiu de caz S.P.C. Mihai Bravu

Date inițiale: Stațiile de protecție catodică instalate pe conductele Tranzit T1, T2, T3 și Import I; Rezistivitatea solului $32 \Omega \cdot m$; Potențial natural conductă-sol: T1: -291 mV, T2: -344 mV, T3: -592 mV, I: -326 mV; Schița amplasării conductelor:



Măsurători: În această locație la pornirea stației de protecție catodică pe conducta T3 și oprirea celorlalte stații s-a constatat că pentru păstrarea unui potențial de E_{OFF} de -1.1 V pe conducta T3, au fost necesari anumiți parametri total diferiți față de alte locații studiate. Tensiunea secundară a redresorului a fost de 16 V și curentul de 18 A, datorită faptului că din modul de amplasare al prizelor anodice ale stațiilor de protecție catodică, există tendința ca stația de protecție catodică de pe conducta T3 să protejeze catodic și celelalte conducte. Dacă se pornesc și celelalte stații de pe conductele paralele care injectează curenți de ordinul amperilor (1.63 A pentru stația de pe conducta T2, 10 A pentru cea de pe conducta T1 și 4.3 A pentru cea de pe conducta de Import), atunci curentul pe conducta T3 scade la 0.55 A.

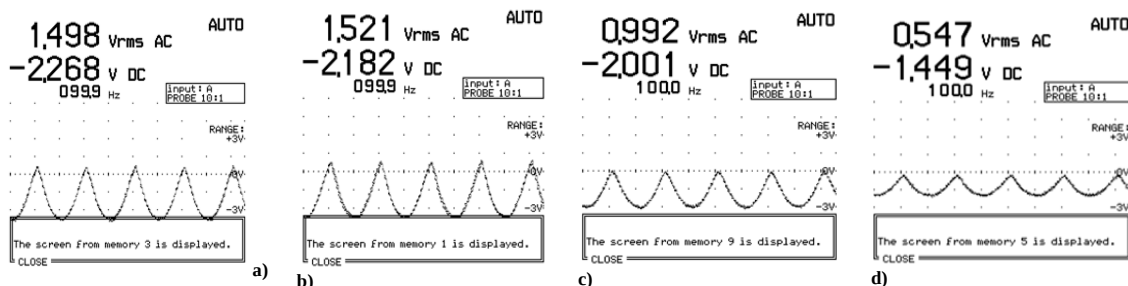


Figura IV.17: Potențial EON pe conducta T3: a) la punctul de injecție; b) la 20 m de punctul de injecție; c) la 80 m de punctul de injecție; d) la 300 m de punctul de injecție;

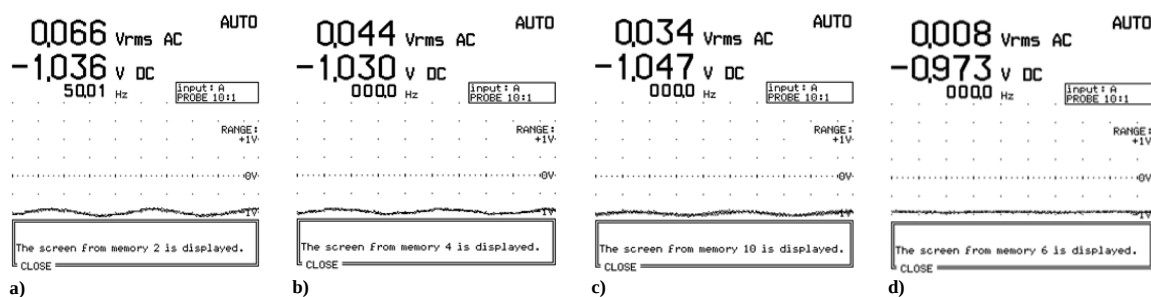


Figura IV.18: Potențial EOFF pe conducta T3: a) la punctul de injecție; b) la 20 m de punctul de injecție; c) la 80 m de punctul de injecție; d) la 300 m de punctul de injecție;

În acest caz nu s-au descoperit curenți de dispersie și în consecință nu există curenți de schimb în c.a., se observă că singura mărime în alternativ este tensiunea injectată de stația de protecție catodică montată pe T3. Forma tensiunii injectate nu este alterată de alți curenți de dispersie alternativi, curenții de schimb fiind minimi și în cazul injecției în curent continuu ei nefiind importanți în acest studiu de caz.

IV.4. Procedeu de predicție și monitorizare a coroziunii conductelor metalice subterane

Măsurarea coroziunii este metoda cantitativă prin care eficacitatea tehnicilor de control și predicție poate fi evaluată și de asemenea oferă feedback-ul care dă posibilitatea optimizării metodelor de control și prevenție a fenomenului de coroziune.

Monitorizarea coroziunii este imperios necesară deoarece rata coroziunii dictează cât timp un proces inițiat poate funcționa cu succes și/sau poate opera în siguranță.

Ca urmare, măsurarea deteriorărilor datorate coroziunii și măsurile luate pentru a remedia această problemă permit alegerea procesului cu cele mai scăzute costuri în ceea ce privește implementarea și asigurarea unei mente abilități ridicate în funcționare.

Se propune un procedeu de predicție și monitorizare a coroziunii conductelor metalice îngropate denumit Procedul PMCSI (**P**redicție și **M**onitorizare a **C**oroziunii pentru **S**tructurii Metalice **Î**ngropate) și se dorește a fi un ghid practic foarte util pentru operatorii din sistem. Poate fi considerat ca un proces menit să ducă la o îmbunătățire a condițiilor în care operează structurile metalice subterane. Poate fi utilizat și pentru stabilirea unor activități de bază în evaluarea unei eventuale coroziuni viitoare chiar și în cazul conductelor care în prezent nu sunt amenințate de fenomenul de coroziune.

Procedul PMCSI propune o analiză a informațiilor obținute în urma mai multor tipuri de măsurători efectuate la suprafața solului precum și la suprafața conductei, coroborate cu date referitoare la caracteristicile fizice și operaționale ale structurii metalice, toate acestea fiind structurate în patru etape principale (vezi Figura IV.19 și Figura IV.20).

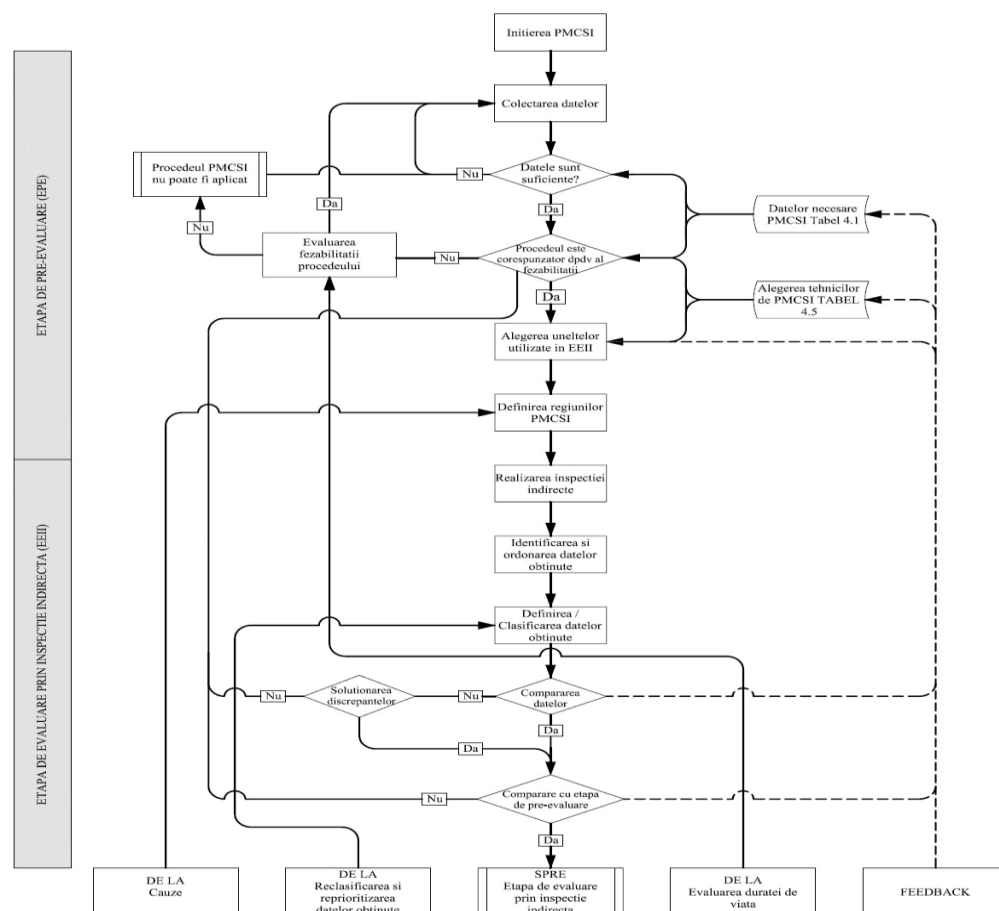


Figura IV.19: Procedul PMCSI – algoritmul de aplicare

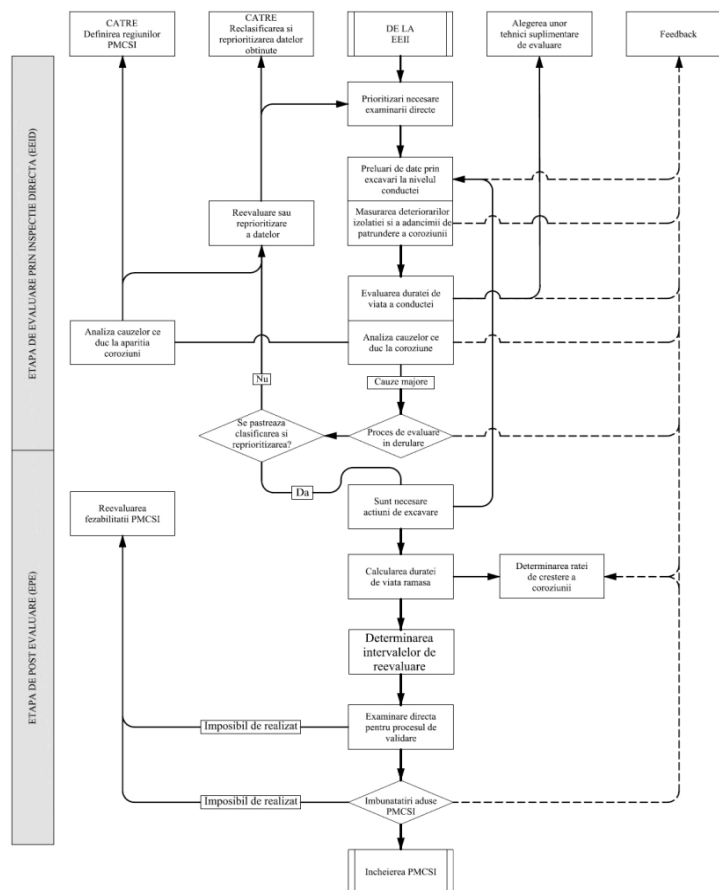


Figura IV.20: Procedul PMCSI – algoritmul de aplicare (Continuare)

V.Bibliografie

- [1]. **Micu D.D**, Ceclan A., Darabant L., **Șteț D.:** „Analytical and Numerical Development of the Electromagnetic Interference Between a High-Voltage Power Line and an Underground structures”, *6th International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems*, Lille, France, July 1-3, **2009**.
- [2]. Li Y., et all: „Electromagnetic Interference Caused by a Power System Network and a Neighbouring Pipeline”, *62nd Annual Meeting of the American Power Conference*, pp. 311-316, Chicago, USA, April 10-12, **2000**.
- [3]. Haubrich H., Flechner B., Machcynski W.: „An Universal Model For the computation of the Electromagnetic Interference on Earth Return Circuits”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 9, No. 3, July, **1994**.
- [4]. Southey R., et all: „On the Mechanisms of Electromagnetic Interference between Electrical Power Systems and Neighbouring Pipelines”, *NACE 2000 T10B Symposium on DC & AC Interference*, Orlando, March 26-31, **2000**.
- [5]. Satsios K.J., Labridis D.P.: „Finite Element Calculations and Fuzzy Logic Development”. *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 35, No. 1, January, **1999**.

- [6]. **Micu D.D.**, Lingvay I., Simion E.: *Modelarea și predicția fenomenelor de interferență în regim electrocinetic*, Ed. ELECTRA, București, **2006**.
- [7]. **Micu D.D.**, Munteanu R.jr., Christoforidis G.C., Manea B., Ceclan A.: „Original Approaches for Solving Electromagnetic Interference Problems”, *Advances in Electrical and Computer Engineering*, No. 2, pp. 82-90, **2009**.
- [8]. Salazar-Palma M., Sarkar T.: *Iterative and Self Adaptive Finite-Elements Electromagnetic Modeling*, AETech House Press, London, UK, **1998**.
- [9]. **Micu D.D.**, **Czumbil L.**, Christoforidis G., Ceclan A.: „Proposed Monte Carlo – Neural Network method for solving Electromagnetic Interference Problems”, *45th International Universities Power Engineering Conference, UPEC*, Cardiff, Wales, September 1-3, **2010**.
- [10]. Epperson J.: *An introduction to numerical methods and analysis*, John Wiley INC., New York, **2002**.
- [11]. Lucca G., Zucchelli L.: „Electromagnetic interference produced on a complex metallic pipeline network by a fault in a power substation”, *CIGRE*, Paper No. 36-01, Paris, France, **2002**.
- [12]. Dawalibi F.: „Analysis of electrical interference from power lines to gas pipelines. Part II-Parametric analysis”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 5, No. 1, pp. 415-421, January, **1990**.
- [13]. Franz J.: *OrCAD PSpice with Circuit Analysis*, Ed. Prentice Hall, Columbus, USA, **2001**.
- [14]. **Micu D.D.**, Lingvay I., Lingvay C., Darabant L., Ceclan A.: „Numerical evaluation of induced voltages in the metallic underground pipelines”, *Revue Roumaine des Sciences Techniques, serie Électrotechnique et Énergetique*, Vol. 54, No. 2, pp.175-184, **2009**.
- [15]. *** CIGRE WG.36.02. *Guide Concerning Influence of High Voltage AC Power Systems on Metallic Pipelines*, **1995**.
- [16]. *** CEN/TS 15280: „Evaluation of A.C. Corrosion Likelihood of Buried Pipelines - Application to Cathodically Protected Pipelines”, *European Committee for Standardization*, CEN, ICS 23.040.99; 77.060, March, **2006**.
- [17]. **Micu D.D.**, **Șteț D.**, **Răcășan A.**, **Czumbil L.**: *Dezvoltarea unei metode hibride generalizate pentru determinarea efectelor interferențelor inductive și conductive asupra conductelor metalice subterane de transport gaz care împart același coridor de distribuție cu o LEA*, Raport de activitate I, Contract TE_253/2010.
- [18]. **Micu D.D.**, **Șteț D.**, **Răcășan A.**, **Czumbil L.**: *Dezvoltarea și implementarea unor tehnici de inteligență artificială pentru rezolvarea problemelor de interferență dintre linii electrice aeriene de înaltă tensiune și conducte metalice de transport gaz. Dezvoltarea unei soluții generalizate*, Raport de activitate II, Contract TE_253/2010.
- [19]. **Micu D.D.**, **Șteț D.**, **Răcășan A.**, **Czumbil L.**: *Dezvoltarea unor soluții tehnice pentru diminuarea fenomenelor de coroziune în mediul electromagnetic prin atenuarea tensiunilor induse în conductele de gaz care împarte același coridor de distribuție cu o linie electrică aeriană*, Raport de activitate III, Contract TE_253/2010.
- [20]. **Micu D.D.**, **Șteț D.**, **Răcășan A.**, **Czumbil L.**: *Dezvoltarea și implementarea unor dispozitive de drenare controlată a curenților de dispersie induși pentru protejarea și îmbunătățirea protecției catodice a conductelor metalice subterane cu traseu comun cu o LEA*, Raport de activitate IV, Contract TE_253/2010.
- [21]. Al-Alawi S., Al-Badi A., Ellity K.: „An artificial neural network model for predicting gas pipeline induced voltage caused by power lines under fault conditions”, *COMPEL: Intern. Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 24, No. 1, **2005**.
- [22]. Beale M.H., Haga M.T., Demuth H.B.: *Neural Network Toolbox – User’s Guide*, ver. 7.0.2 (2011b), The MATHWORKS Inc., **2011**.
- [23]. Caudil M., Butler C.: *Understanding Neural Networks: Computer Exploration*, Vol. 1÷2, MA: The MIT Press, Cambridge, USA, **1992**.
- [24]. Voloșenco C.: *Sisteme Fuzzy și Neuronale*, Ed. Politehnica, Timișoara, Romania, **2007**.
- [25]. **Micu D.D.**, **Czumbil L.**, Christoforidis G.C., Ceclan A.: „Layer Recurrent Neural Network Solution for an Electromagnetic Interference Problem”, *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 47, No. 5, pp. 1410-1413, **2011**.

- [26]. Satsios K.J., Labridis D.P., Dokopoulos P.S.: „An Artificial Intelligence System for a Complex Electromagnetic Fields Problem: Part I – Finite Element Calculations and Fuzzy Logic Development”, *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 35, No. 1, pp. 516-522, **1999**.
- [27]. Satsios K.J., Labridis D.P., Dokopoulos P.S.: „An Artificial Intelligence System for a Complex Electromagnetic Fields Problem: Part II – Method Implementation and Performance Analysis”, *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 35, No. 1, pp. 523-527, **1999**.
- [28]. Goldberg D.E.: *Genetic Algorithms in Search Optimization & Machine Learning*, Addison Longman Inc., **1989**.
- [29]. **Micu D.D., Czumbil L.**, Ceclan A., Dărăbant L.: „Accurate methods for solving Electromagnetic Interference problems between Power Lines and underground Metallic Pipelines”, *44th International Universities' Power Engineering Conference, UPEC*, Glasgow, Scotland, September 1-4, **2009**.
- [30]. Ancăș L., **Micu D.D.**, Țopa V.: „Right of Way - Buried Metallic Pipelines HV-Power Lines. Mitigation Techniques”, *46th International Universities Power Engineering Conference, UPEC*, Soest, Germany, September 5-8, **2011**.
- [31]. Abu-Siada A., Bahram M.: „Effect of HVAC System on Neighbouring Pipelines and Communication Cables”, *Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC*, Adelaide, Australia, September 27-30, **2009**.
- [32]. Al-Badi A.H.: „Analysis of Factors Affecting the Level of Electromagnetic Interference on Pipelines close to Power Lines”, *International Conference on Power Engineering, ICOPES*, Rio de Janeiro, Brazil, October 12-15, **2004**.
- [33]. Al-Badi A.H., Ghanian S.M., EL-Saadany E.F.: „Prediction of Metallic Conductor Voltage Owing to Electromagnetic Coupling Using Neuro Fuzzy Modeling”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 24, No. 1, pp. 319-327., January, **2009**.
- [34]. Ametani A., Hosakawa Y.: „EMTP Simulations and Theoretical Formulation of Induced Voltages to Pipelines from Power Lines”, *International Conference on Power Systems Transients, IPST*, Lyon, France, June 4-7, **2007**.
- [35]. Bortels L., Deconinck J., Munteanu C., Țopa V.: „A General Applicable Model for AC Predictive and Mitigation Techniques for Pipeline Networks Influenced by HV Power Lines”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 21, No. 1, pp. 210-217., January, **2006**.
- [36]. Braunstein R., Schmautzer E., Propst G.: „Comparison and Discussion on Potential Mitigation Measures Regarding Inductive Interference of Metallic Pipelines”, *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion, ESARS*, Bologna, Italy, October 19-21, **2010**.
- [37]. Braunstein R., Schmautzer E., Oelz M.: „Impacts of Inductive and Conductive Interference due to High-Voltage Lines on Coating Holidays of Isolated Metallic Pipelines”, *21st International Conference on Electricity Distribution, CIRED*, Frankfurt, Germany, June 6-9, **2011**.
- [38]. Christoforidis G.C., Labridis D.P., Dokopoulos P.S., Kioupis N.: „AC Interference On A Gas Pipeline Caused By Nearby Power Lines In A Complex Right-Of-Way. Comparison between Measurements and Calculations”, *CEOCOR Meeting*, Dresden, Germany, June 15-17, **2004**.
- [39]. Christoforidis G.C., Labridis D.P. & Dokopoulos P.S.: „A Hybrid Method for Calculating the Inductive Interference Caused by Faulted Power Lines to Nearby Buried Pipelines”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 20, No. 2, pp.1465-1473., April, **2005**.
- [40]. Djogo G., Salama M.M.A.: „Calculation of Inductive Coupling From Power Lines to Multiple Pipelines and Buried Conductors”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 41, No. 1, pp. 75-84., **1997**.
- [41]. **Czumbil L., Micu D.D.**, Christoforidis G.C., Ceclan A., Miron O.: „User Friendly EMI Software for Induced A.C. Potential Evaluation”, *8th International Conference on Computation in Electromagnetics, CEM*, Wroclaw, Poland, April 11-14, **2011**.
- [42]. **Czumbil L.**, Christoforidis G.C., **Micu D.D.**, Șteț D., Ceclan A., Pop O.: „A User-Friendly Software Application for Induced A.C. Interference Evaluation”, *46th International Universities' Power Engineering Conference, UPEC*, Soest, Germany, September 5-8, **2011**.

- [43]. **Czumbil L., Șteț D., Micu D.D., Țopa V., Ancăș L.:** „Stream Gas Pipeline in Proximity of High Voltage Power Lines. Part II - Induced Voltage Evaluation”, *47th International Universities' Conference on Power Energy, UPEC*, London, September 4-7, **2012**.
- [44]. **Czumbil L., Șteț D., Micu D.D., Țopa V., Ancăș L.:** „Induced Voltage and Current Computation for Different HVPL Operating Conditions”, *International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC Europe*, Rome, Italy, September 17-21, **2012**.
- [45]. **Micu D.D., Czumbil L., Ceclan A., Darabant L., Șteț D., Christoforidis G.C.:** „Electromagnetic Interferences Between HV Power Lines and Metallic Pipelines Evaluated with Neural Network Technique”, *10th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, EPQU*, Lodz, Poland, September 15-17, **2009**.
- [46]. **Micu D.D., Czumbil L., Christoforidis G.C., Simion E.:** „Neural Networks Applied in Electromagnetic Interference Problems”, *Revue Roumain des Sciences Techniques, Serie Electrotechnique et Energetique*, Vol. 57, No. 2, pp.162-171, **2012**.
- [47]. **Micu D.D., Czumbil L., Christoforidis G.C., Ceclan A., Șteț D.:** „Evaluation of Induced AC Voltages in Underground Metallic Pipeline”, *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 31, No. 4, pp.1133-1143, **2012**.
- [48]. **Micu D.D., Czumbil L., Prsa M., Kasas-Lazetic K.:** „InterfStud Electromagnetic Interference Software - An Accurate Evaluation of Current Distribution in Soil and in Underground Pipelines”, *International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC Europe*, Rome, Italy, September 17-21, **2012**.
- [49]. **Șteț D., Czumbil L., Micu D.D., Țopa V., Ancăș L.:** „Stream Gas Pipeline in Proximity of High Voltage Power Lines. Part I - Soil Resistivity Evaluation”, *47th International Universities' Power Engineering Conference, UPEC*, London, September 4-7, **2012**.
- [50]. Brichau F.A., Deconinck J.: „A Numerical Model for Cathodic Protection of Buried Pipes”, *Corrosion*, Vol. 50, No. 1, pp. 39-49, **1994**.
- [51]. *** CEOCOR: „A.C. Corrosion on Cathodically Protected Pipelines. Guidelines for Risk Assessment and Mitigation Measures”, Comité d'Etude de la Corrosion et de la Protection des Canalisations, **2001**.
- [52]. *** EN 50443: „Effects of Electromagnetic Interference on Pipelines cased by High Voltage A.C. Railway Systems and/or High Voltage A.C. Power Supply Systems”, *European Committee for Electrotechnical Standardization, CENELEC*, ICS 33.040.20; 33.100.01, **2011**.
- [53]. Lee H.-G., Ha T.-H., Ha Y.-C., Bae J.-H., Kim D.-K.: „Analysis of Voltages Induced by Distribution Lines on Gas Pipelines”, *International Conference on Power System Technology, PowerCon*, pp. 598-601., Singapore, November 21-24, **2004**.
- [54]. Southey R.D., Ruan W. & Dawalibi F.P.: „AC Mitigation Requirements: A Parametric Analysis”, *CORROSION 2001 NACE International Conference*, Houston, USA, March 11-16, **2001**.
- [55]. Southey R.D., Ruan W., Dawalibi F.P., Fortin S.: „Estimating AC Mitigation Requirements for Pipelines Installed in High Voltage AC Corridors: Fault Conditions”, *CORROSION 2003, NACE International Conference*, San Diego, USA, March 17-21, **2003**.
- [56]. Ma J., Fortin S. & Dawalibi F.P.: „Analysis and Mitigation of Current Unbalance Due to Induction in Heavily Loaded Multicircuit Power lines”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 19, No. 3, pp. 1378-1383, July, **2004**.
- [57]. Munteanu C., Țopa V., Purcar M., **Răcășan A.**, Pop I. & Mateș G.: „Analysis of the Electromagnetic Interferences between Overhead Power Lines and Buried Pipelines”, *International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC Europe*, Rome, Italy, September 17-21, **2012**.
- [58]. Li Y., Dawalibi F.P.: „Effects of Current Unbalance and Transmission Line Configuration on The Interference Levels Induced on Nearby Pipelines”, *CORROSION 2004, NACE International Conference*, New Orleans, USA, March 28 - April 1, **2004**.
- [59]. *** IEEE Std. 81: „IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System”, *IEEE Standards Board*, **1983**.
- [60]. Lingvay I., Secrețeanu N.: *Coroziunea rețelelor de transport și distribuție a gazelor naturale*, Ed. ICPE, București, **2000**.

- [61]. *** CP2 – *Cathodic protection technician course manual* – Nace International **2007**.
- [62]. *** SR EN 15280-2011: *Evaluation of a.c. corrosion likelihood of buried pipelines applicable to cathodically protected pipelines*.
- [63]. *** SR EN 12954 -2002: *Protecția catodică a CM îngropate sau imersate*.
- [64].