

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

COD PROIECT: ID_1024

DIRECTOR: PROF. DR. ING. EMIL SIMION

CONTRACTOR: UNIVERSITATEA TEHNICĂ DIN CLUJ-NAPOCA

Conf.dr.ing.mat. Dan Doru MICU

Conf.dr.ing. Laura DĂRĂBANT (CRET)

As. drd. ing. Denisa ȘTET (DUMA)

Drd. ing. Mihaela PLEȘA

Drd. ing. Andrei CECLAN

Drd. ing. Lucian MAN

Indicatori de performanță 2007 (septembrie-decembrie)

Articole publicate în baze de date internaționale: planificat – 1; realizat – 1

IEEEExplore, Compendex 10.1109/EPQU.2007.4424091, ISBN 978-84-690-9441-9

Articole publicate în reviste indexate ISI: planificat – 1; realizat – 1

International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, IJAEM - Volume 26, Nos 3,4, 2007, IOS Press, ISSN 1383-5416, pp. 243-251. (premiat CNCSIS)

Articole publicate la conferințe internaționale sau în reviste cotate CNCSIS: 8

2007

(septembrie-decembrie)

OBIECTIV 1 – 2007

**STUDIUL SISTEMATIC AL LITERATURII DE
SPECIALITATE ÎN DOMENIUL PROIECTULUI PROPUȘ**

OBIECTIV 2 – 2007

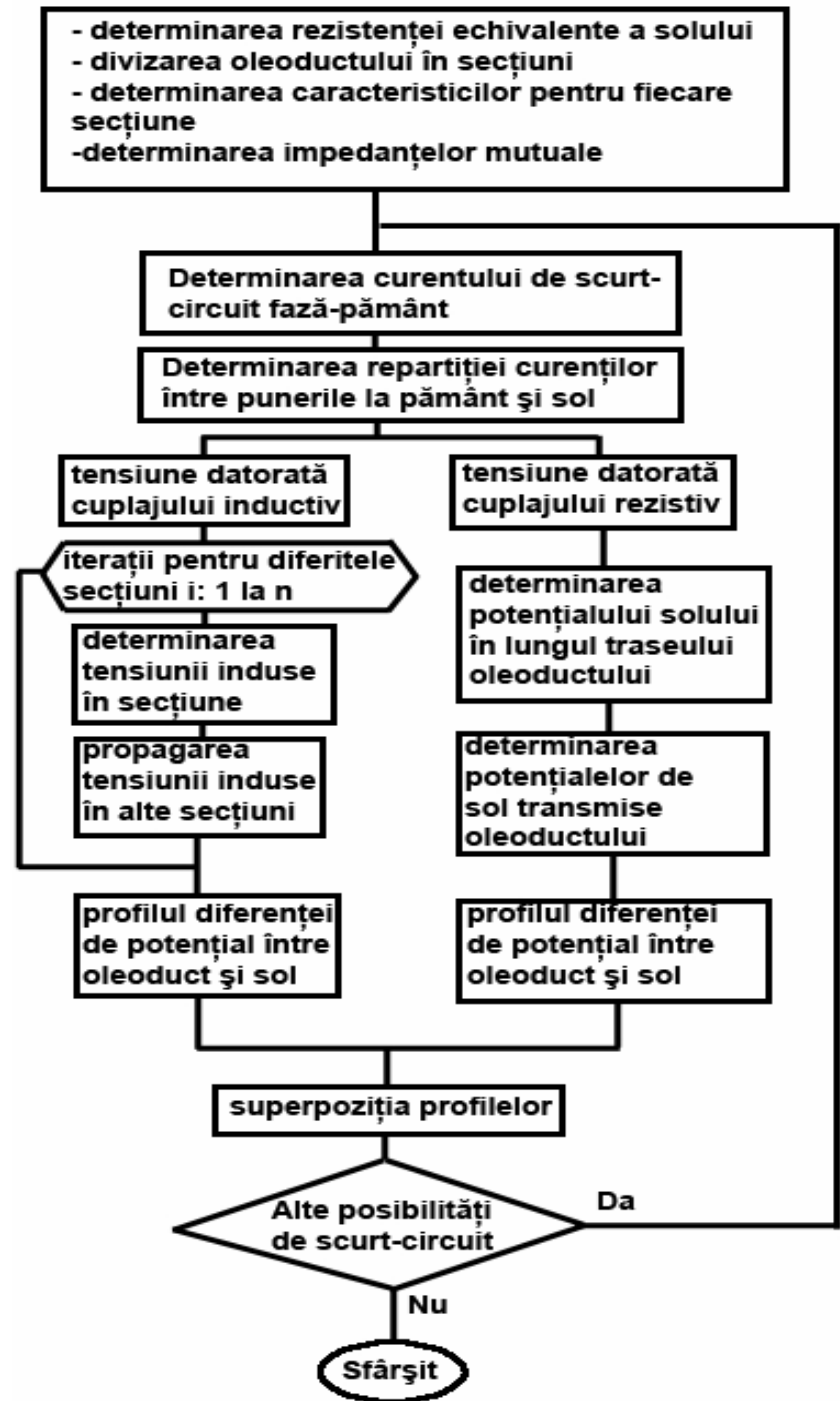
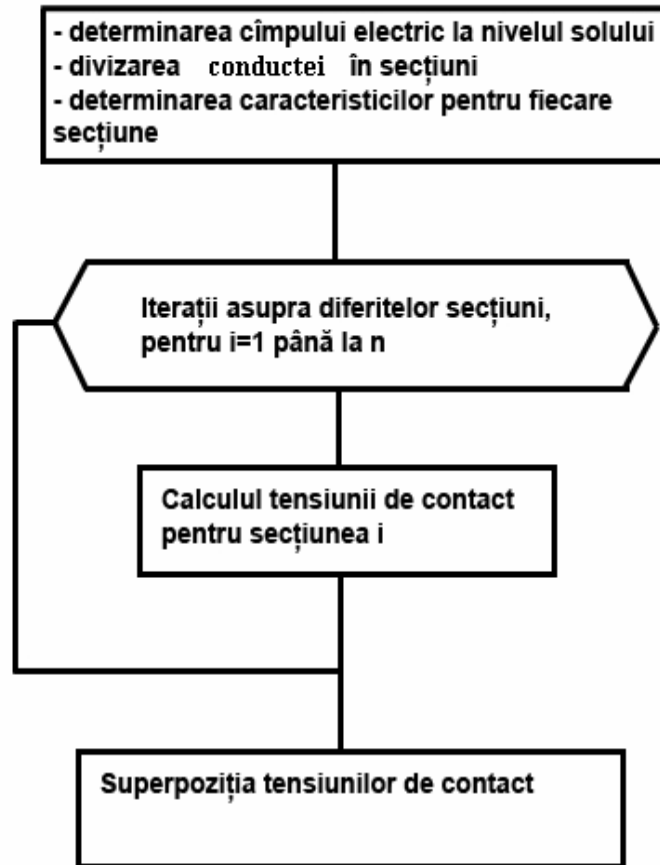
**STUDIUL PACHETELOR SOFTWARE EXISTENTE
PENTRU ANALIZA FENOMENELOR DE CUPLAJE
ELECTROMAGNETICE ȘI PREDICȚIE ȘI CONTROL
A FENOMENELOR DE COROZIUNE**

Concluzii și contribuții originale

Obiectiv 1 și Obiectiv 2 – 2007 (3 luni)

- **Sistematizarea conceptelor** din literatura de specialitate legate de problemele de interferență electromagnetică LEA IT – CM
- **Modelarea mecanismelor de cuplaj** inductiv-conductiv-capacitiv LEA - CM
- **Întocmirea unei documentații complete** continand descrierea posibilitatilor si limitelor de utilizare corespunzatoare pachetelor software studiate și **aplicarea lor pe diverse studii de caz**
- Conceperea unui **ghid practic de specialitate (Proiect bilateral de cercetare UTCN-Compania Națională Transgaz S.A, nr. 24716)** care soluționează sistematic cu o abordare etapizată metodele de protecție catodică prezentând într-un mod original tehnicile și metodele moderne de investigare de la suprafață a defectelor de izolație ale conductelor metalice subterane.
- Formularea unor **constatări și idei de aplicare** ale diverselor tehnici utilizate, în măsură să reabiliteze sistemul, cu costuri minime, asigurând siguranța în exploatare cerută de exigențele eficienței economice și ecologice
- Introducerea **conceptului de rentabilitate a reabilitării conductelor** prin concentrarea doar asupra zonelor cu probleme ale unei conducte.

Algoritmi de modelare a mecanismelor de cuplaj dintre LEA și CM



Prescripții pentru Transgaz

Studiul coroziunii conductelor de transport gaze naturale, aflate sub influența liniilor electrice aeriene ce au tensiuni mai mari de 100 kV și metode de reducere a acesteia. studiu de caz.

Proiect bilateral de cercetare UTCN-Transgaz, nr. 24716

2007-2008

Pentru a fi într-adevăr rentabilă, reabilitarea trebuie să se concentreze asupra zonelor cu probleme ale unei conducte:

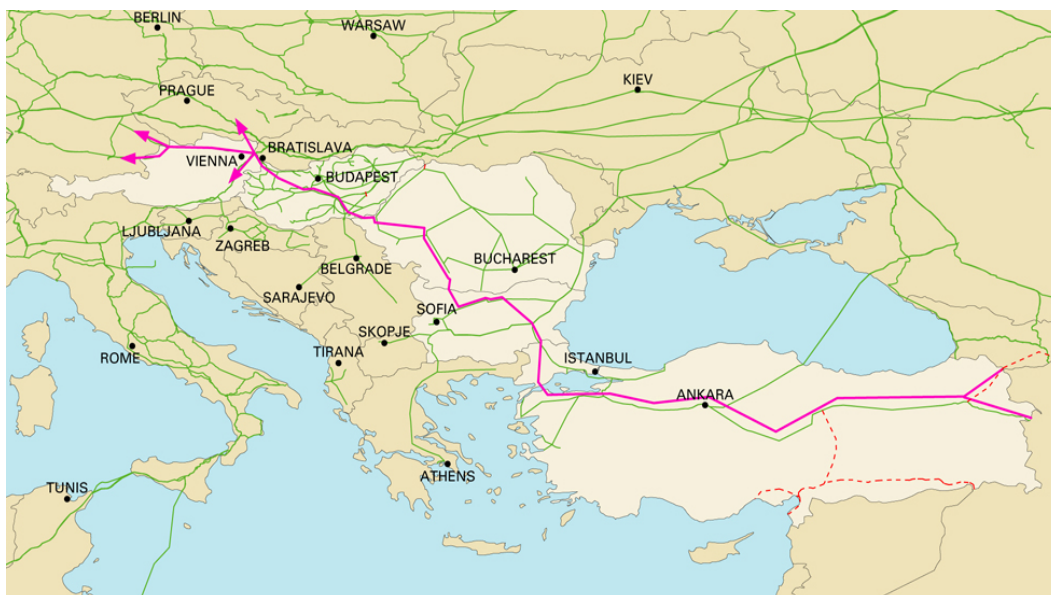
- **investigarea de la suprafața a stării izolației conductelor metalice îngropate**, aplicabilă la conductele protejate catodic, dar care prezintă dezavantajul necesității executării de gropi de poziție după depistarea defectelor de izolație, în vederea controlului ultrasonic al integrității materialului tubular
- **investigarea din interior cu metode magnetice și ultrasonice a conductelor** în funcțiune cu aparatura specifică („PIG”-inteligent), care prezintă dezavantajul major că poate fi aplicată numai pe conducte proiectate și construite ținând cont de anumite prescripții tehnice



Conducta Szeged-Arad



Tranzitul de gaze spre Balcani



Traseul conductei Nabucco

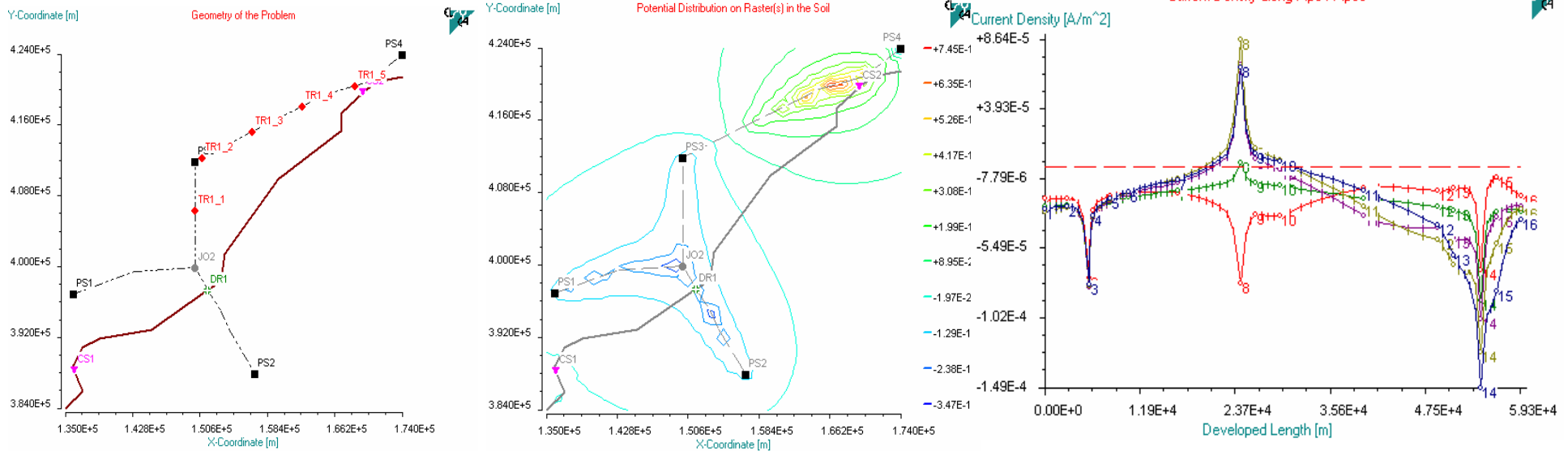
Recomandări!

- Proasta interpretare a rezultatelor este frecventă, mai ales atunci când erori de 200-300 mV în citire devin “**erori de rutina**”.
- Aceasta este una din cauzele pentru care, conducte aflate sub protecție catodică, “**considerată bună**”, continuă să se corodeze.
- Este deci recomandabil ca aplicarea metodelor de investigare să se concentreze în zonele dificile în care poate să apară pierderea de metal.

Pachete de programe studiate

- **CAT.Pro - Vrije Universiteit Brussels + Elsyca-Brussel**
- **CDEGS - Safe Engineering Services**
- **OPERA 2D - Vector Fields**
- **MAXWELL 3D – Ansoft**
- **COMSOL Multiphysics**

Pachetul de programe CAT.Pro



Programul foarte flexibil

- model tridimensional de calcul în regim staționar de c.c
- valoarea potentialului electric în sol la diferite adâncimi
- valoarea densității de curent de-a lungul conductei metalice

BILA 2000 (UTCN-VRIJE): “*Development of methods and tools for analysis of the electromagnetic AC interference between high voltage transmission systems and metallic pipelines*”

- implementarea soluției fundamentale în metoda elementelor de frontieră

Pachetul de programe SES Safe Engineering Services & Technologies

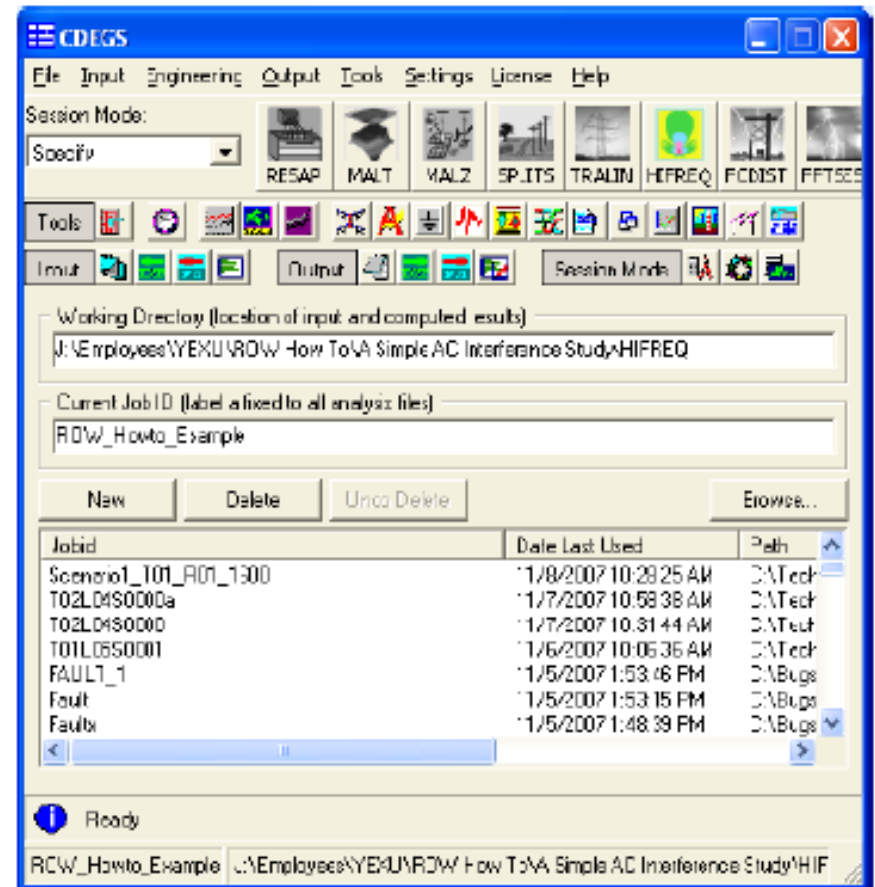
RIGHT-OF-WAY

- Simplificarea modelării configurațiilor complexe LEA-Conductă
- Calcularea curenților longitudinali induși în conductă, curenților injectați în sol, potențialelor între diverse puncte

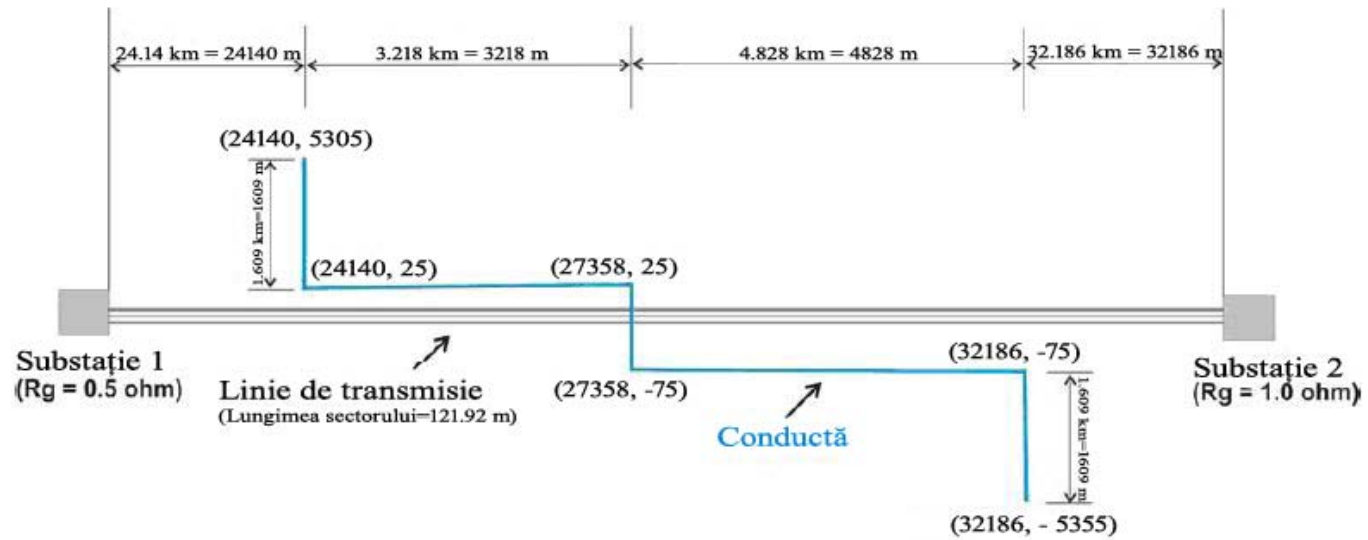
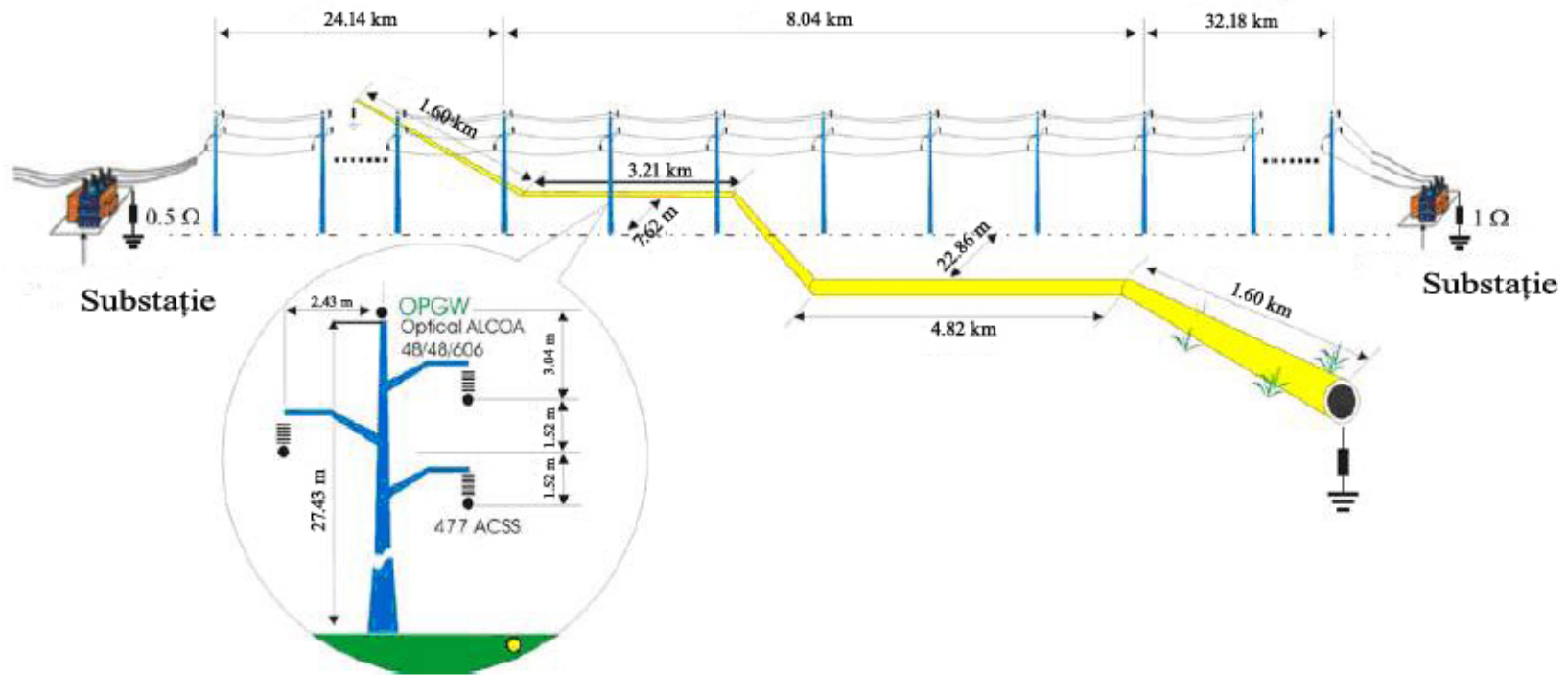
TRALIN (Transmission Line Parameters)

HIFREQ (High Frequency Electromagnetic Analysis)

SPLITS (Simulation of Power Lines, Interconnections and Terminal Stations)

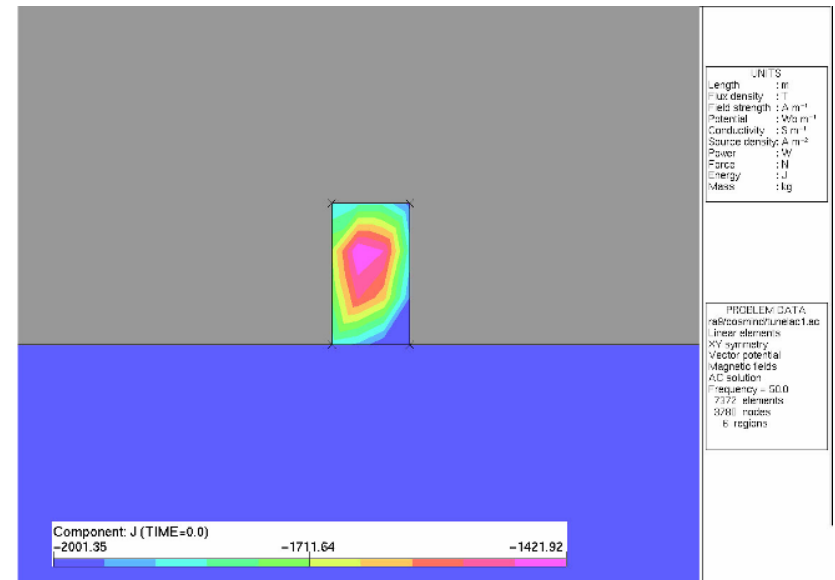
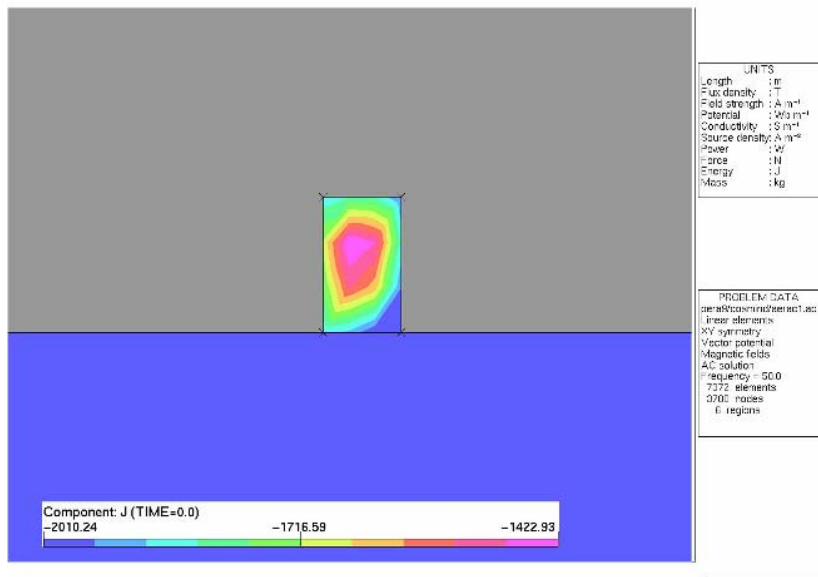
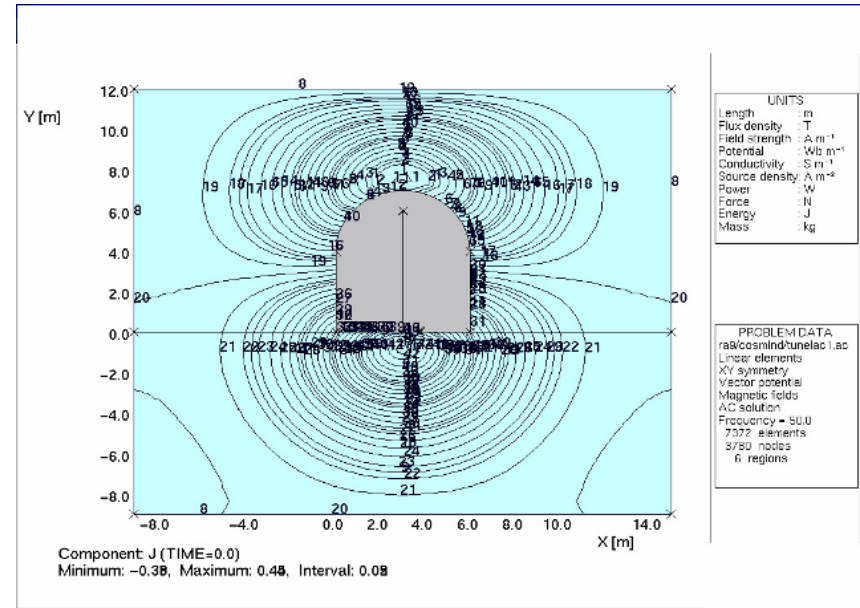
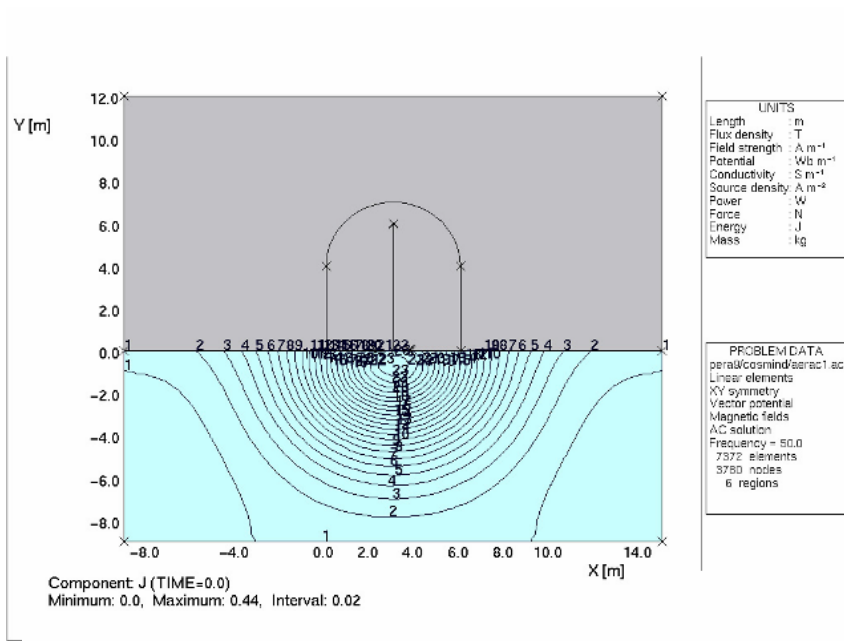


Pagina principală a pachetului de programe CDEGS



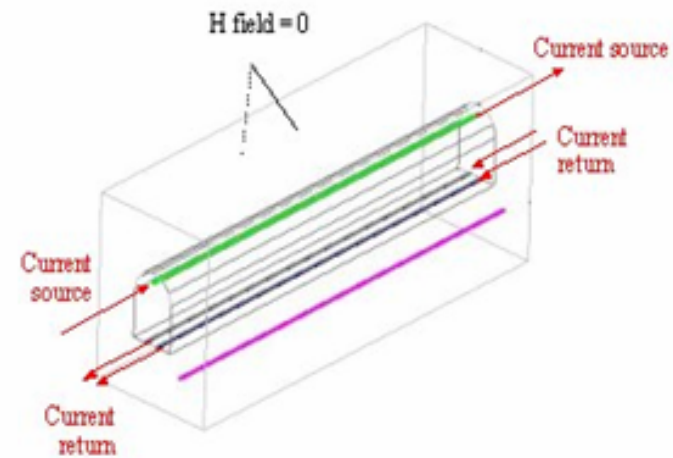
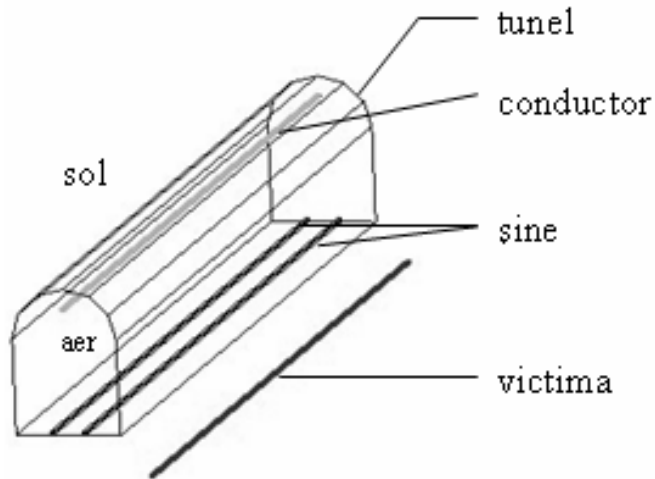
Pachetul de programe OPERA 2D

Configurația linie de tracțiune electrică-tunel

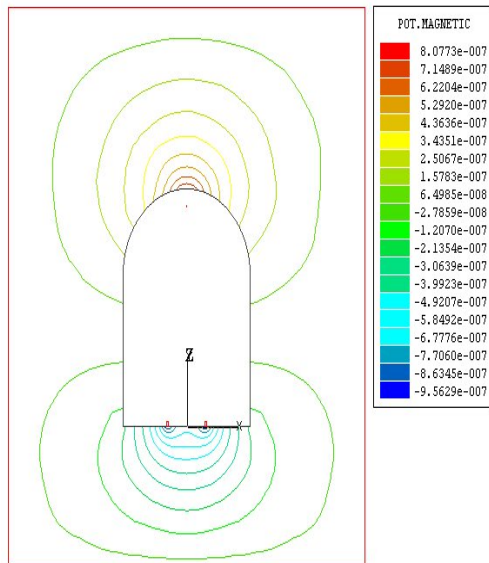


Pachetul de programe MAXWELL 3D

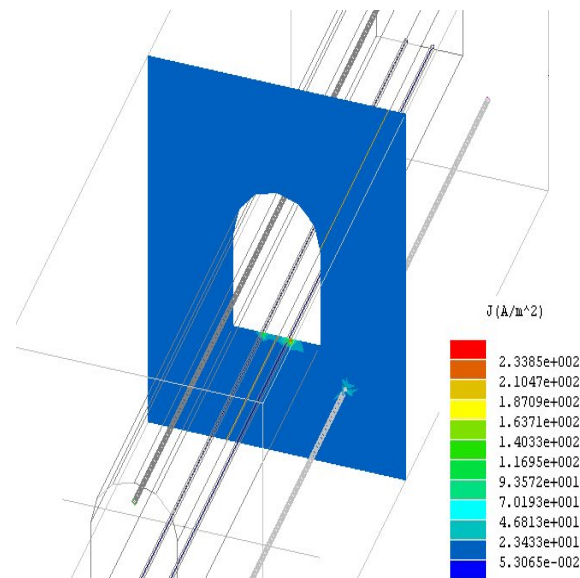
Determinarea curenților induși în conductele metalice subterane de către sistemele de tracțiune electrică în curent alternativ



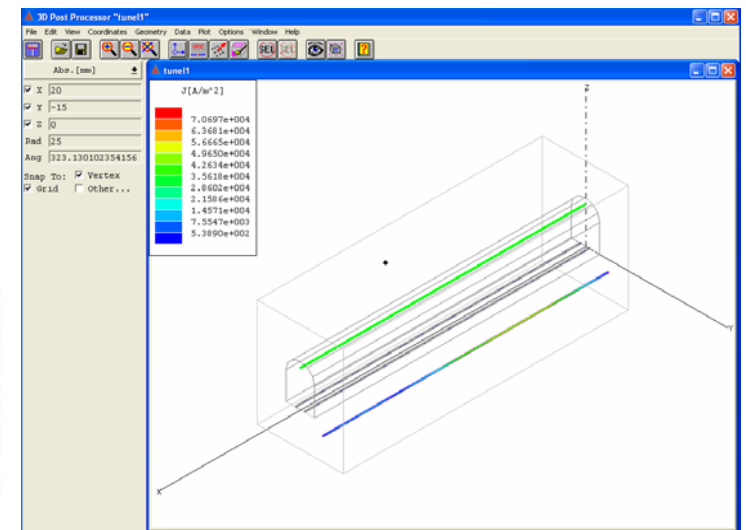
•Rezultatele simulărilor cu programul MAXWELL 3D



Potențialul magnetic vector pentru o secțiune transversală

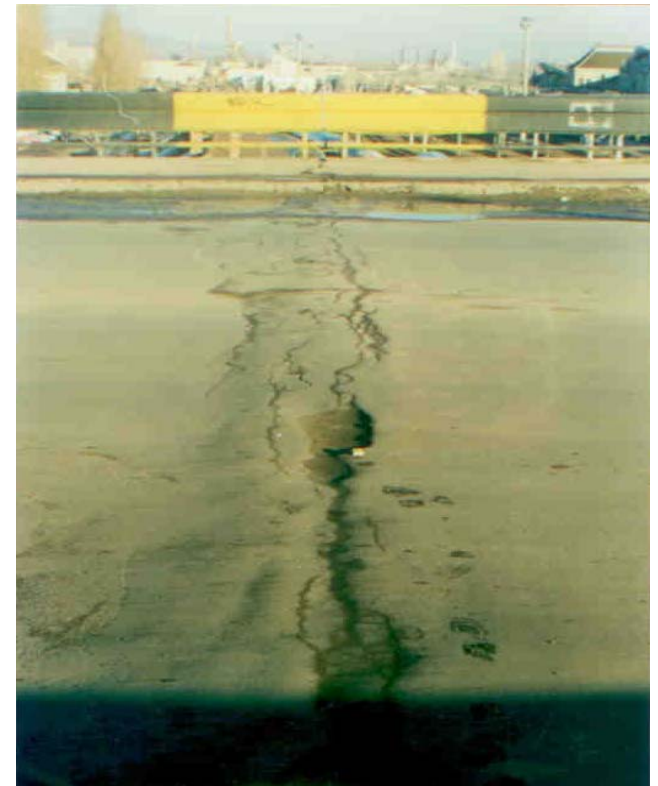


Densitate de curent J (A/m²) pe o secțiune transversală

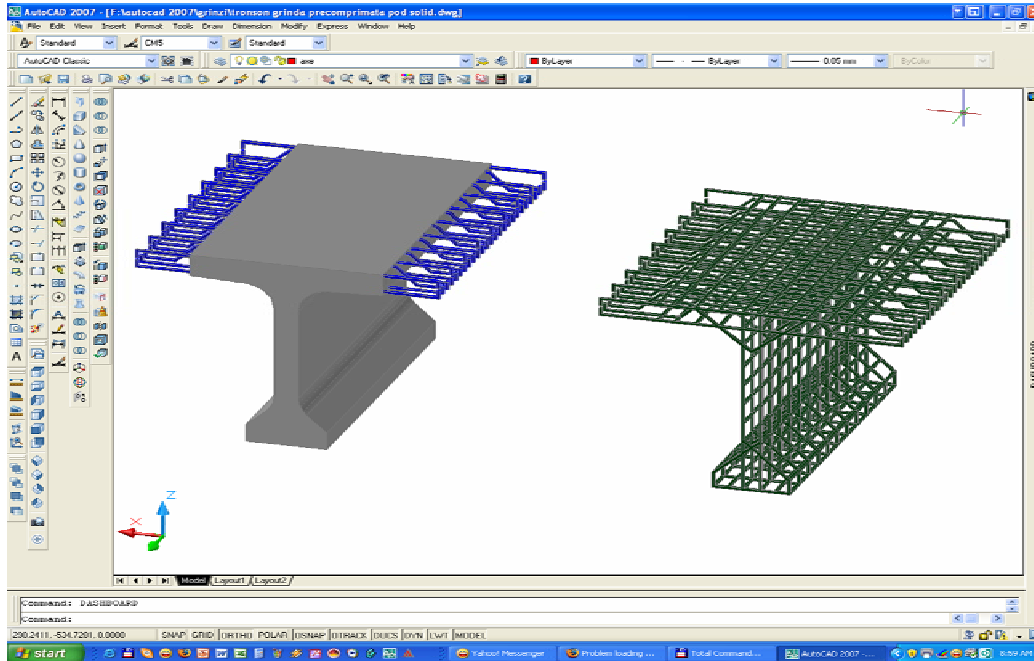


Determinarea curenților induși în structurile de beton armat de către sistemele de tracțiune electrică în curent alternativ

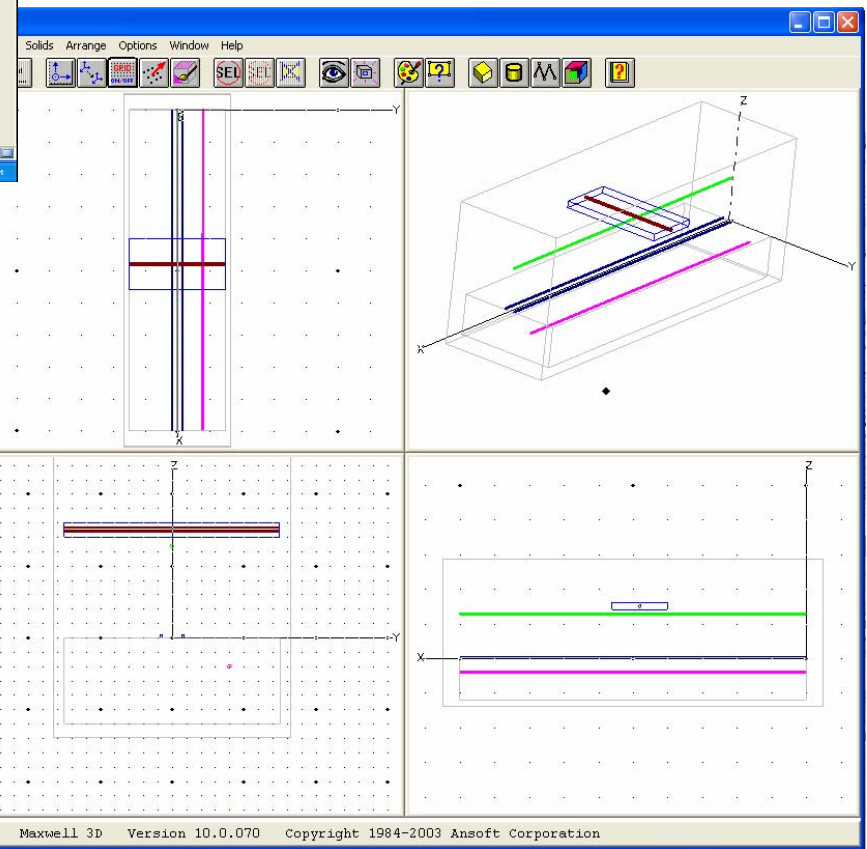
Studiu de caz - Pasajul superior de pe strada Căii Ferate (Cluj-Napoca)

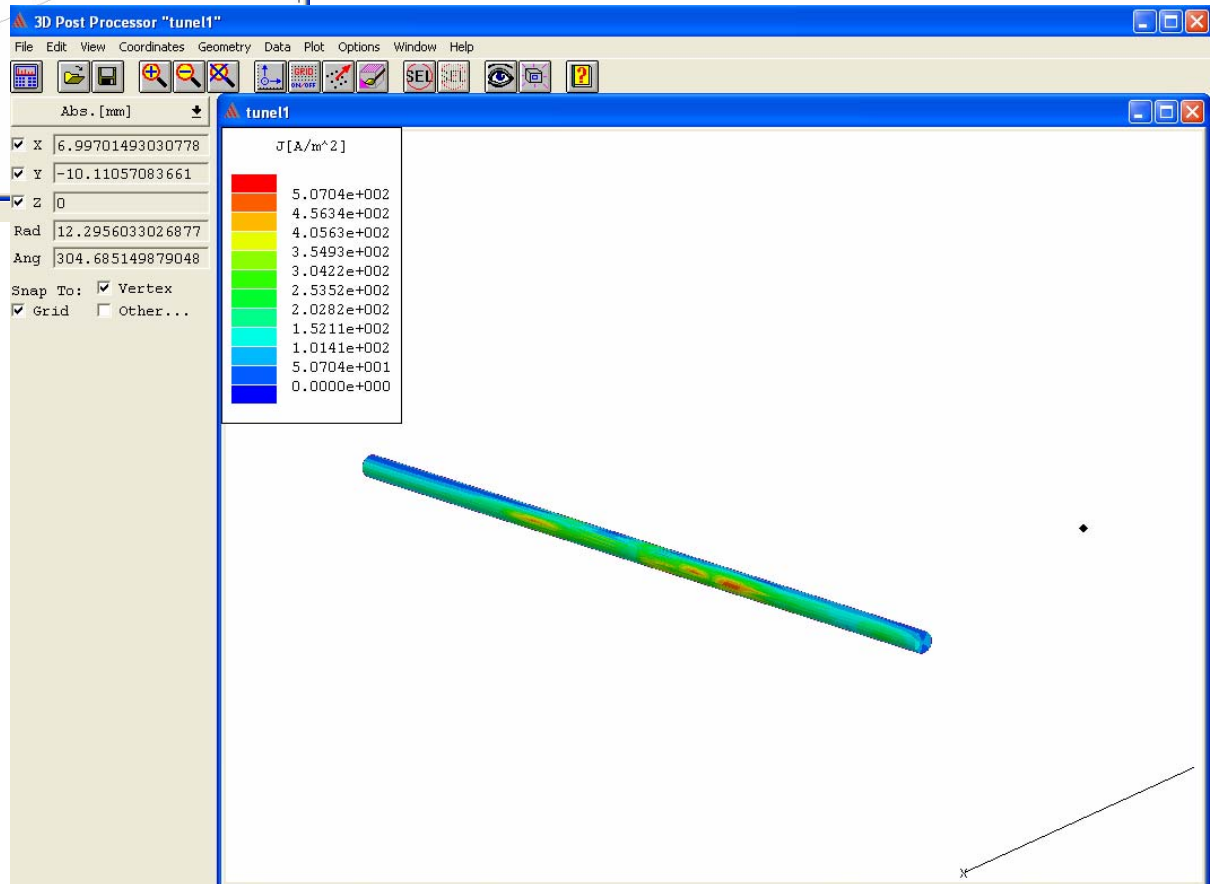
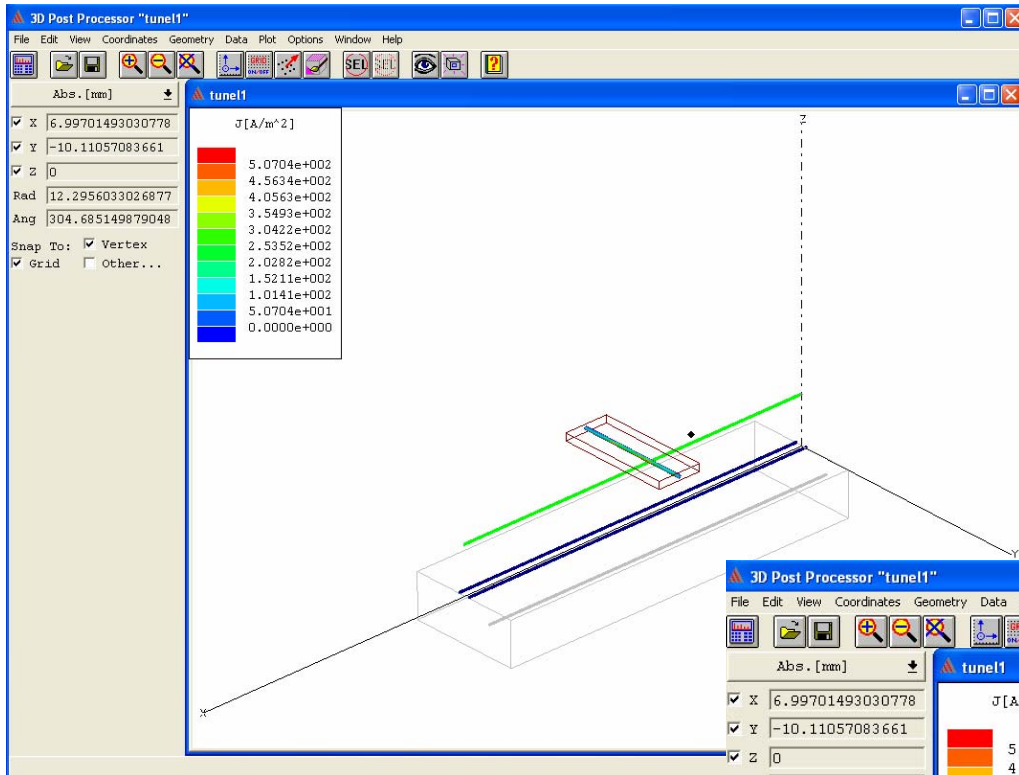


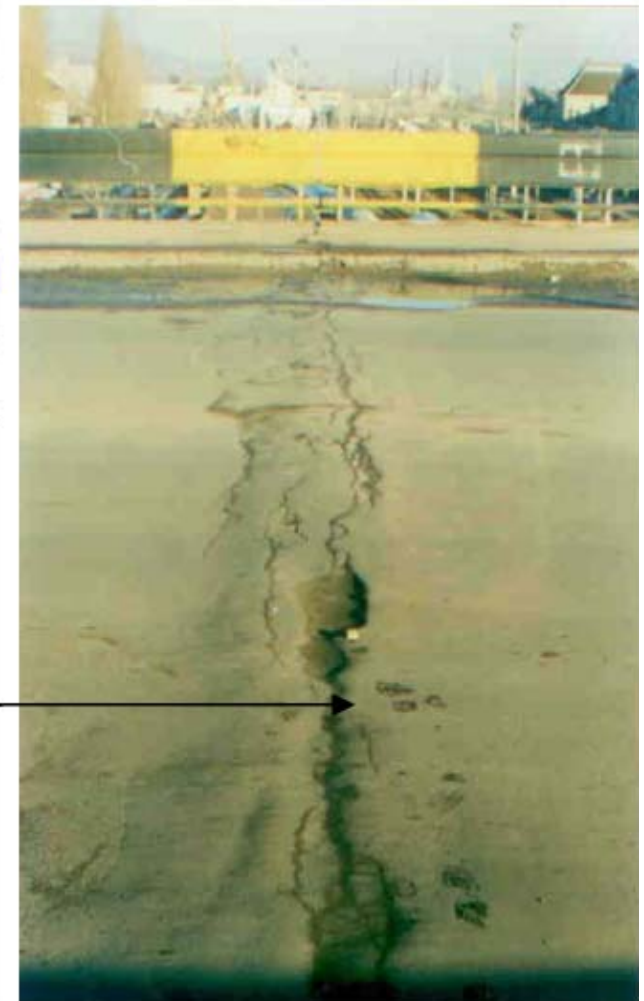
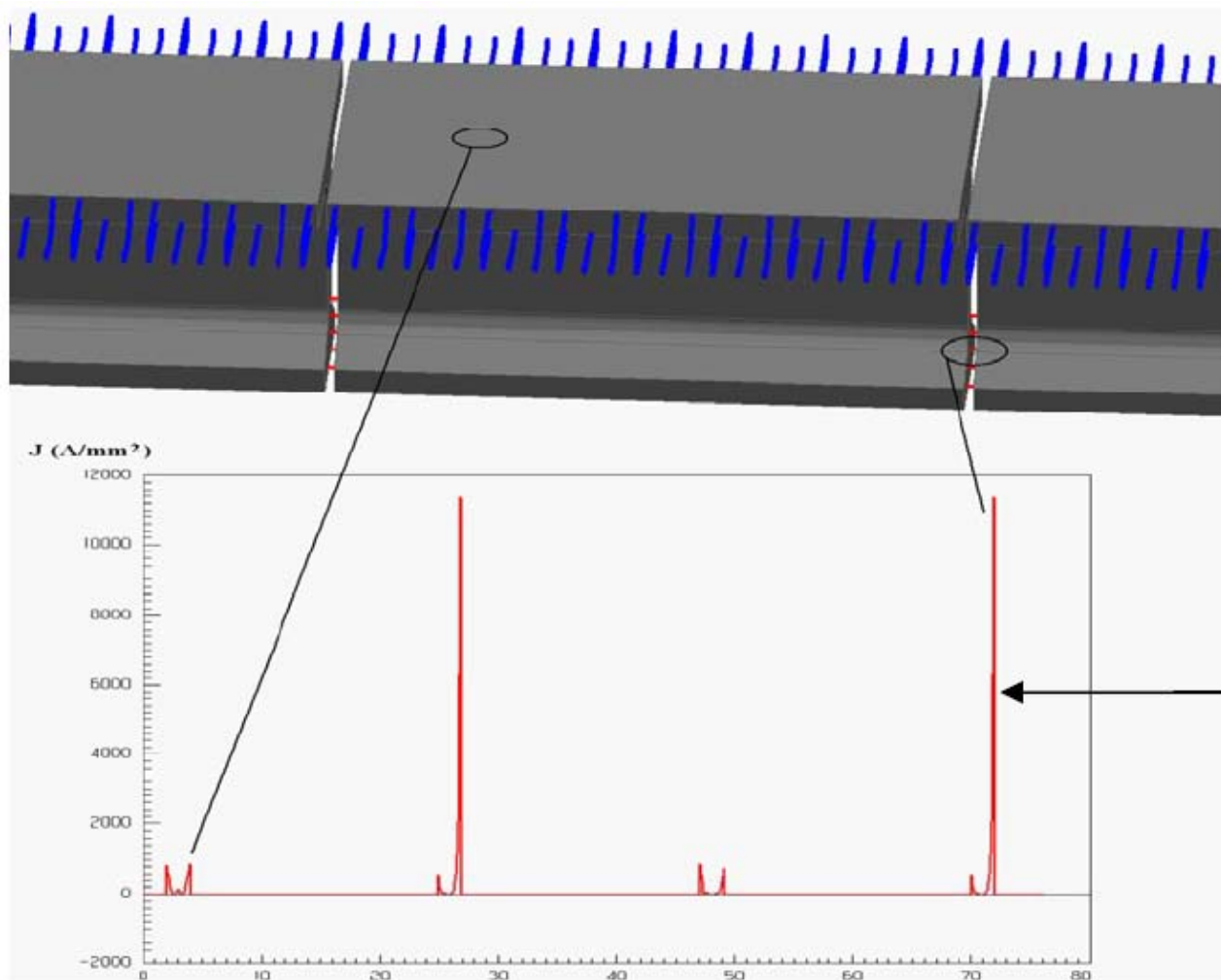
Rezultatele simulărilor cu programul MAXWELL 3D



✓ Z | 0
Rad | 67.2309452558864
Ang | 22.7509763427876
Snap To: Vertex
 Grid Other...







Distribuția densității de curent J (A/mm²) într-o secțiune transversală în armăturile centrale (vedere 3D a podului)

Indicatori de performanță

2008

Articole publicate în baze de date internaționale: planificat – 3; realizat – 4

- IEEEExplore, Compendex 14.1104/UPEC, ISBN 978-88-89884-09-6.
- IEEEExplore Catalog number 08EX1996C, ISBN 1-4244-1545-4.
- IEEEExplore Catalogue number 08EX1996C, ISBN 1-4244-1545-4, LC 2007905111.
- IEEEExplore INSPEC Accession Number: 10183422, ISBN 978-1-4244-1542-7.

Articole publicate în reviste indexate ISI: planificat – 0; realizat - 2 (acceptate spre publicare – apariție 2009 vol.3)

- Revue Roumaine des Sciences Techniques, serie Electrotechnique et Energetique, no. 2, 2009, ISSN 0035-4066.
- IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 45, no. 3, 2009.

Articole publicate la conferințe internaționale sau în reviste cotate CNCSIS: 14

OBIECTIV 1 – 2008

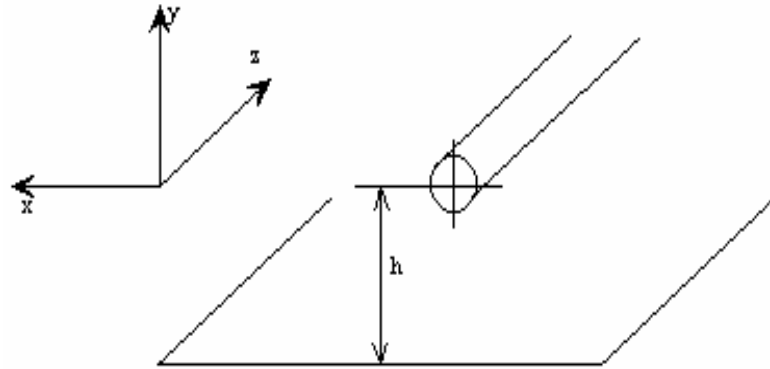
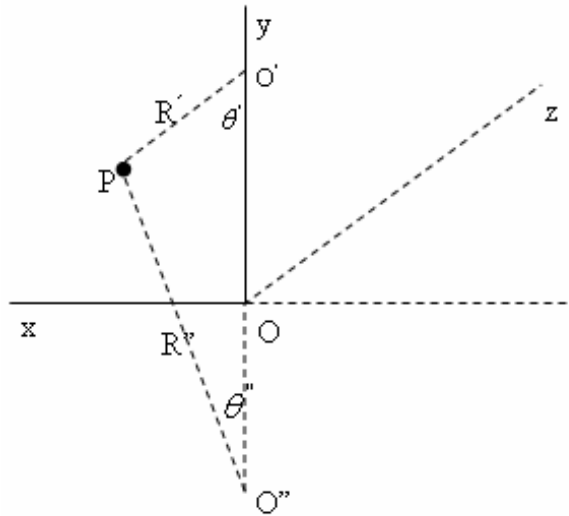
**REZOLVAREA PROBLEMELOR MATEMATICE
COMPLICATE CARE APAR DATORITĂ
APROXIMAȚIILOR FĂCUTE ÎN STUDIUL TEORETIC AL
CUPLAJELOR INDUCTIVE ȘI CONDUCTIVE ȘI AL
DIMENSIONĂRII PROTECȚIILOR CATODICE**

Concluzii și contribuții originale

Obiectiv 1 – 2008

- S-a realizat rescrierea într-o formă matematică mai simplă a **componentei axiale a câmpului electric** indus în sol
- S-a realizat o **evaluare numerică a integralei semiinfinite** (care apare la calculul parametrilor LEA și în expresia densității curentului indus în sol) cu ajutorul a două **serii infinite rapid convergente** obținându-se diverse forme ale termenilor de corecție care apar datorită prezenței solului
- S-a analizat un **tip special de funcție complexă**, definit ca o integrală și care satisface o ecuație diferențială, în rezolvarea acesteia ținându-se cont de faptul că funcția complexă are o singularitate, aspect neglijat până în prezent
- S-a demonstrat că trebuie introdusă o **serie adițională** pentru distanțe mari între conductoare sau între conductoare și sol, adică în seria asimptotică se cere o expresie adițională pentru a obține valori exacte pentru $\theta > 45^\circ$
- S-a demonstrat faptul că termenul adițional este important la **valori foarte mari ale parametrului θ** , situație întâlnită frecvent în calculele de interferențe inductive și conductive

Rescrierea într-o formă matematică mai simplă a **componentei axiale a câmpului electric** indus în sol



$$E_z = -4\omega I \cdot \int_0^{\infty} \left(\sqrt{\mu^2 + j} - \mu \right) \cdot e^{-\mu \cdot h'} \cdot e^{y' \sqrt{\mu^2 + j}} \cdot \cos(x' \mu) \cdot d\mu, \quad y \leq 0$$

$$E_z = -4\omega I \cdot \int_0^{\infty} \left(\sqrt{\mu^2 + j} - \mu \right) \cdot e^{-\mu \cdot (h' + y')} \cdot \cos(x' \mu) \cdot d\mu - 2j\omega I \cdot \ln\left(\frac{R''}{R'} \right) - \frac{\partial V}{\partial z}, \quad y \geq 0$$

$$J(p, q) = J = \int_0^{\infty} \left(\sqrt{\mu^2 + j} - \mu \right) \cdot e^{-\mu \cdot p} \cdot \cos(q\mu) \cdot d\mu = \int_0^{\infty} \frac{j \cdot e^{-\mu \cdot p} \cdot \cos(q\mu)}{\sqrt{\mu^2 + j} + \mu} \cdot d\mu$$

$$J = P + jQ$$

Evaluare numerică a integralei semiinfinite - serii infinite rapid convergente: obțin diverse forme ale termenilor de corecție care apar datorită prezenței solului

Frecvențe înalte ($a > 5$) dezvoltările asimptotice a termenilor de corecție:

$$P \cong \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{\cos \theta}{a} - \frac{\sqrt{2} \cos 2\theta}{a^2} + \frac{\cos 3\theta}{a^3} + \frac{3 \cos 5\theta}{a^5} \dots \right) Q \cong \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{\cos \theta}{a} - \frac{\cos 3\theta}{a^3} + \frac{3 \cos 5\theta}{a^5} \dots \right)$$

Frecvențe joase $a \leq 0,25$ dezvoltările asimptotice a termenilor de corecție:

$$P \cong \frac{\pi}{8} - \frac{a \cdot \cos \theta}{3\sqrt{2}} + \frac{a^2}{16} \cos 2\theta \cdot \left(0.6728 + \ln \frac{2}{a} \right) + \frac{a^2}{16} \cdot \theta \sin 2\theta$$

$$Q \cong -0,0386 + \frac{1}{2} \ln \frac{2}{a} + \frac{a \cdot \cos \theta}{3\sqrt{2}}$$

Analiza unui **tip special de funcție complexă**, definit ca o integrală și care satisface o ecuație diferențială

Termenul de corecție al impedanței mutuale (influența solului):

$$Z_{mg} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \int_0^\infty \frac{2e^{-(h_k+h_1)\cdot\lambda}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + j\omega\mu_0\sigma}} \cdot \cos(\lambda \cdot d_{kl}) \cdot d\lambda \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu_0}}; \quad w = (1-j)\sigma\lambda$$

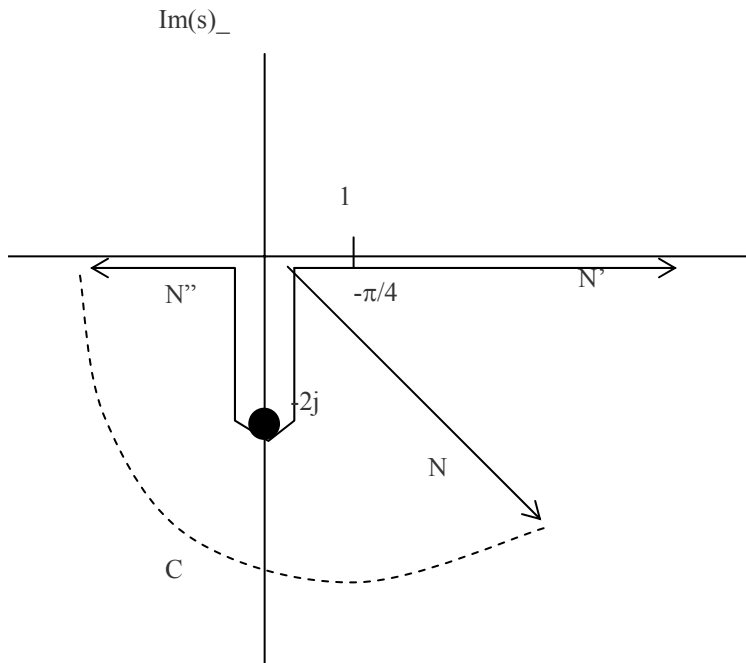
$$Z_{mg} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \int_0^\infty \frac{e^{\frac{-(h_k+h_1)\cdot(1+j)w}{2\delta}}}{\frac{w}{2} + \sqrt{\left(\frac{w}{2}\right)^2 + 1}} \cos\left(\frac{1+j}{2\delta} w \cdot d_{kl}\right) dw = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{1}{2} \int_0^\infty \left[\sqrt{\left(\frac{w}{2}\right)^2 + 1} - \frac{w}{2} \right] (e^{s_1 w} + e^{s_2 w}) dw$$

Calea de integrare în plan complex- linia la (-45°):

$$s_{1,2} = \left(-\frac{h_k + h_1}{2\delta} \pm j \frac{d_{kl}}{2\delta} \right) (1 + j)$$

Analiza funcției complexă definită ca o integrală

$$k(s) = \int_0^\infty \left[\sqrt{\left(\frac{w}{2}\right)^2 + 1} - \frac{w}{2} \right] \cdot (e^{sw}) dw$$



$$Z_{\text{mg}} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{k(s_1) + k(s_2)}{2}$$

$$s^2 k''(s) + 3sk'(s) + 4s^2 k(s) = -2 - 4s$$

Soluția particulară $k_p(s) = -2 \left[\frac{1}{(2s)^2} + \frac{1}{(2s)} + \frac{1}{(2s)^3} - \frac{1 \cdot 3}{(2s)^5} + \frac{1 \cdot 3^2 \cdot 5}{(2s)^7} - \frac{1 \cdot 3^2 \cdot 5^2 \cdot 7}{(2s)^9} + \dots \right]$

Ecuția omogenă $sK''(s) + 3K'(s) + 4sK(s) = 0 \quad K(s) \cong \frac{1}{s\sqrt{s}} (F \cdot e^{2js} + E \cdot e^{-2js})$

Expresia precisă a funcției $k(s) = k_p(s) + \sqrt{j}\sqrt{\pi} \cdot \frac{e^{-2js}}{s\sqrt{s}} \cdot \left(1 - j\frac{3}{16s} + \frac{15}{512s^2} + \frac{105}{8192s^3} j + \dots \right)$

Demonstrația necesității introducerii unei **serii adițională** pentru distanțe mari între conductoare sau între conductoare și sol

Termenii de corecție

$$R_{\text{mg}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \omega \sqrt{2} \left[\frac{\cos \theta}{a} - \frac{\sqrt{2} \cos(2\theta)}{a^2} + \frac{\cos(3\theta)}{a^3} + \frac{3 \cos(5\theta)}{a^5} - \frac{45 \cos(7\theta)}{a^7} + \dots \right]$$

(influența solului)

$$X_{\text{mg}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \omega \sqrt{2} \left[\frac{\cos \theta}{a} - \frac{\cos(3\theta)}{a^3} + \frac{3 \cos(5\theta)}{a^5} - \frac{45 \cos(7\theta)}{a^7} + \dots \right]$$

Impedanța adițională

$$Z_{\text{ad}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \omega \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{e^{2s_3}}{s_3 \sqrt{s_3}} \cdot \left(1 - \frac{3}{16s_3} - \frac{15}{512s_3^2} - \frac{105}{8192s_3^3} - \dots \right)$$

Termenul adițional este foarte important la valori foarte mari ale parametrului θ , care este de fapt un caz foarte des întâlnit în calculele de interferențe electromagnetice!

OBIECTIV 2 – 2008

**DETERMINAREA UNUI ALGORITM NUMERIC PRECIS
DE CALCUL AL TENSIUNILOR ȘI CURENȚILOR
CARE SE POT INDUCE ÎNTR-O REȚEA COMPLEXĂ
DE CONDUCTE METALICE SUBTERANE**

Concluzii și contribuții originale

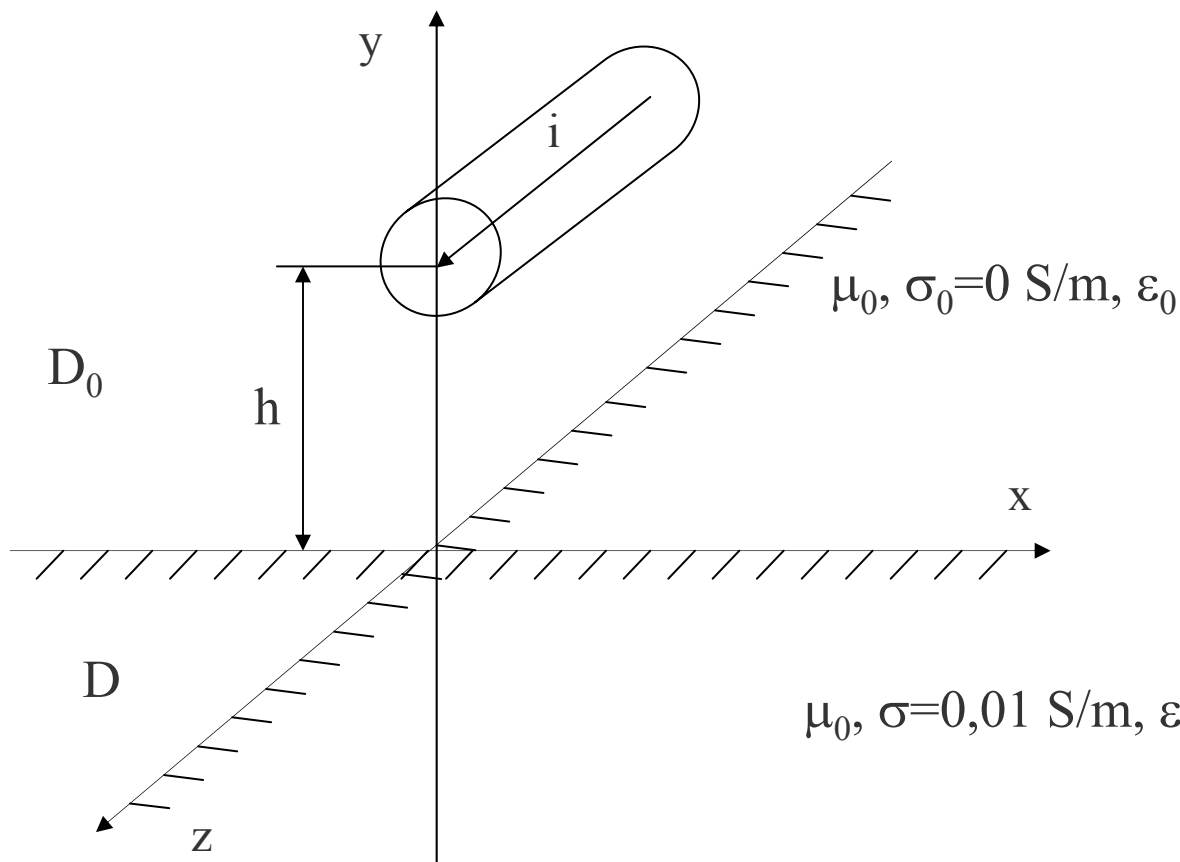
Obiectiv 2 - 2008

- S-a determinat **expresia densității curentului indus în sol** și a pierderilor de putere în sol;
- S-a făcut o **extindere a formulelor** pentru cazul unui conductor deasupra solului și celălalt îngropat în sol, utilizând o analogie cu expresia determinată a densității curentului indus în sol;
- S-a dezvoltat un **model matematic diferențial** pentru calculul tensiunii induse într-o conductă subterană pornind de la ecuațiile lui Maxwell aplicate pentru regim cvasistaționar magnetic;
- S-a aplicat **modelul numeric diferențial** pentru calculul tensiunii induse în conducta amplasată pe un traseu paralel cu linia, utilizând modelul unui plan paralel și rețea de discretizare dreptunghiulară;

Determinarea expresiei densității curentului indus în sol și a pierderilor de putere în sol

Mediul liniar, omogen, izotrop

Determinarea în domeniul D $\longrightarrow \bar{\mathbf{A}}$ și $\bar{\mathbf{J}}$



$$i = I\sqrt{2} \sin(\omega \cdot t), \quad \underline{I} = I$$

În D_0 -cond. de etalonare Coulomb $(\sigma = \sigma_0 = 0)$ Ec Laplace $\Delta \bar{A}_0 = 0$
 $\nabla \bar{A} = 0$

În D-cond. de etalonare Lorentz $\nabla \bar{A} = -\mu_0 \sigma V$ Ec. Helmholtz $\Delta \bar{A} = \gamma^2 \bar{A} = j\omega\mu_0 \sigma \bar{A}$

Metoda separării variabilelor pentru rezolvarea ecuației Helmholtz $A = P(x) \cdot Q(y)$

$$P(x) = S \cdot \sin mx + B \cdot \cos mx$$

soluțiile

$$Q(y) = \underline{C} \cdot e^{(\sqrt{m^2 + \gamma^2})y} + \underline{D} \cdot e^{-(\sqrt{m^2 + \gamma^2})y}$$

$$\underline{A}(x, y) = \int_0^{\infty} [\underline{D}_1(m) \cdot e^{ky} + \underline{D}_2(m) \cdot e^{-ky}] \cos mx \cdot dm; (y < 0)$$

$$\underline{A}_0(x, y) = \int_0^{\infty} [\underline{C}_1(m) \cdot e^{my} + \underline{C}_2(m) \cdot e^{-my}] \cos mx \cdot dm; (y > 0)$$

$$\underline{A}_0(x, y) = \frac{\mu_0 \underline{I}}{2\pi} \cdot \int_0^{\infty} \left[e^{-(h-y)m} + \frac{m - \sqrt{m^2 + j\omega\mu_0\sigma}}{m + \sqrt{m^2 + j\omega\mu_0\sigma}} \cdot e^{-(h-y)m} \right] \cdot \frac{\cos(mx)}{m} \cdot dm$$

$$\underline{A}(x, y) = \frac{\mu_0 \underline{I}}{\pi} \cdot \int_0^{\infty} \left[\frac{e^{y\sqrt{m^2 + j\omega\mu_0\sigma}} \cdot e^{-mh}}{m + \sqrt{m^2 + j\omega\mu_0\sigma}} \right] \cdot \cos(mx) \cdot dm$$

$$\underline{J}(x, y) = \sigma \cdot \underline{E}(x, y) = -j\sigma\omega \underline{A}(x, y) = -\frac{j\omega\mu_0\sigma \underline{I}}{\pi} \cdot \int_0^{\infty} \left[\frac{e^{y\sqrt{m^2 + j\omega\mu_0\sigma}} \cdot e^{-mh}}{m + \sqrt{m^2 + j\omega\mu_0\sigma}} \right] \cdot \cos(mx) \cdot dm$$

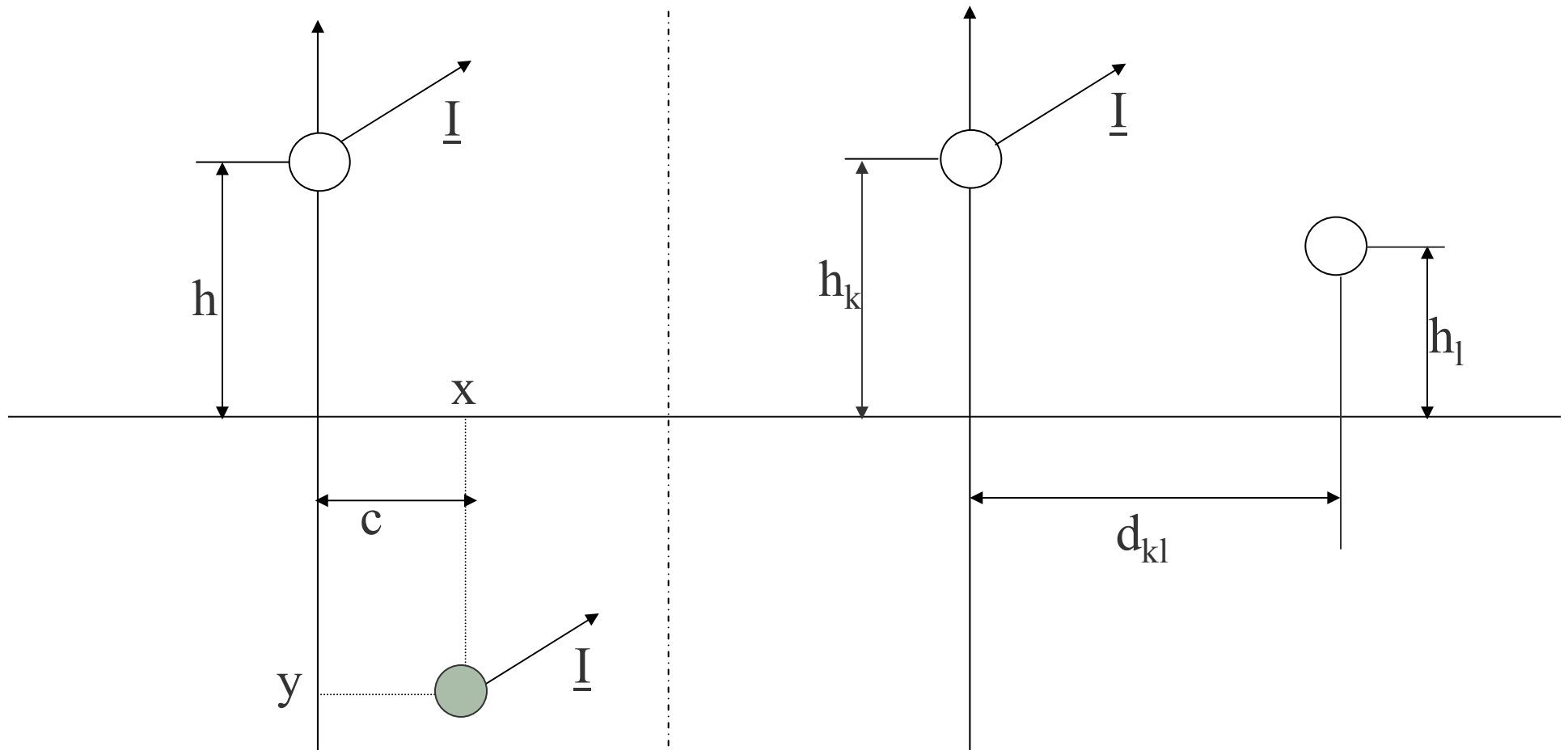
$$P = 2 \cdot \rho_{\text{sol}} \cdot \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} |\underline{J}(x, y)|^2 \cong \frac{\rho_{\text{sol}} \cdot I^2}{L \cdot l}$$

$$|\underline{J}(x, y)|^2 = I^2 \cdot \left| \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} g(\lambda) d\lambda \cdot g(\theta) d\theta \right| = I^2 \cdot \left| \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} g(\lambda) \cdot g(\theta) \cdot d\lambda d\theta \right|$$

Extindere a formulelor pentru cazul unui conductor deasupra solului și celălalt îngropat în sol, utilizând o analogie cu expresia determinată a densității curentului indus în sol

Un conductor deasupra celălalt îngropat

Analogia cu expresia densității de curent



Analogie cu expresia determinată a densității curentului indus în sol!

$$\frac{-\rho \cdot \underline{J}(x, y)}{\underline{I}} = \frac{\omega \mu_0}{\pi} \cdot \int_0^{\infty} \frac{j \cdot e^{-mh} \cdot e^{m \cdot y \sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{m^2}}}}{m + \sqrt{m^2 + j\omega \mu_0 \sigma}} \cdot \cos(mx) \cdot dm$$

$$\underline{Z}_m = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{(h_k + h_l)^2 + d_{kl}^2}}{\sqrt{(h_k - h_l)^2 + d_{kl}^2}} \right) + \omega \frac{\mu}{\pi} \cdot J_m, \quad \mu = \mu_0$$

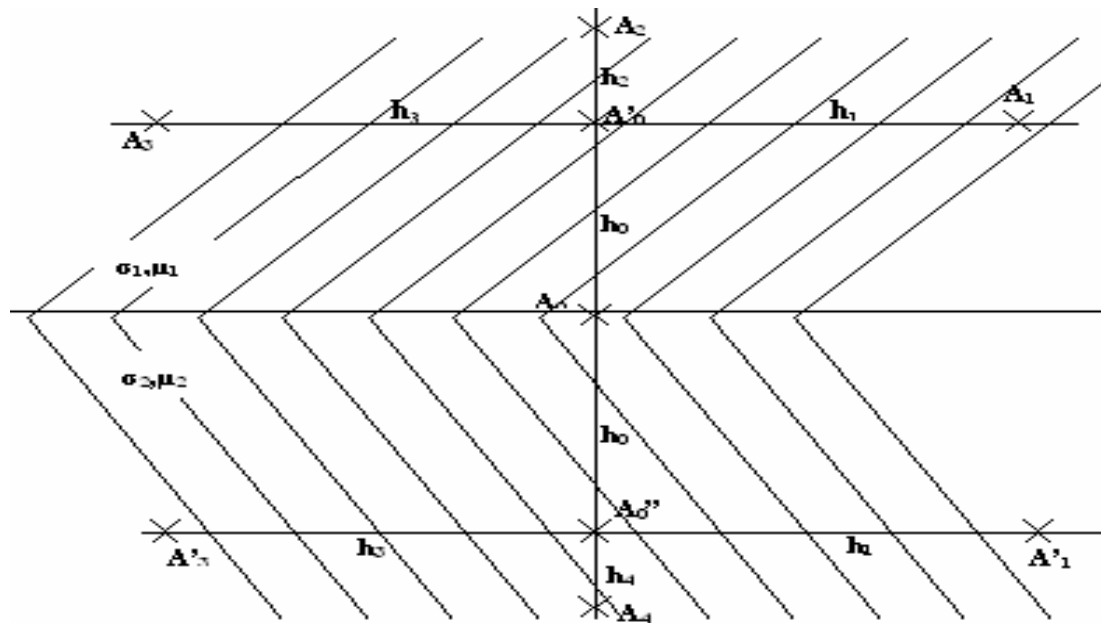
$$J_m = P_m + jQ_m = \int_0^{\infty} \frac{j e^{-(h_k + h_l)\lambda}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + j\omega \mu_0 \sigma}} \cdot \cos(\lambda \cdot d_{kl}) \cdot d\lambda$$

$$h_1 = -y \cdot \sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{m^2}} = -y \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{p^2 \cdot m^2}} \quad \gamma = 1/p$$

$d_{kl} \rightarrow x, \quad \lambda \rightarrow m$

Dezvoltarea unui **model matematic diferențial** pentru calculul tensiunii induse

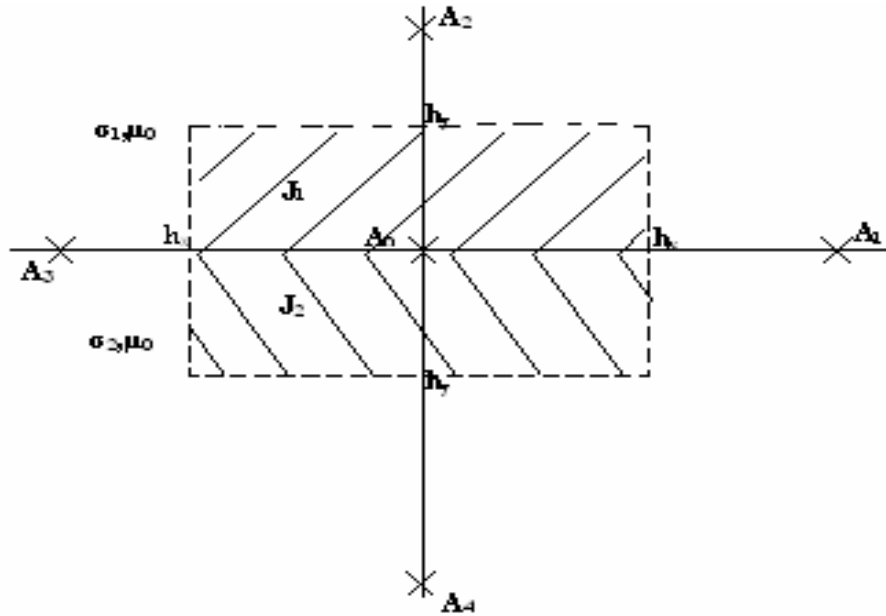
- Ecuațiile lui Maxwell - regim cvasistaționar magnetic
- Condiția de etalonare Coulomb
- Dezvoltare în serie Taylor – evaluarea laplaceanului
- Forma numerică a ecuației Helmholtz pentru mediu neomogen



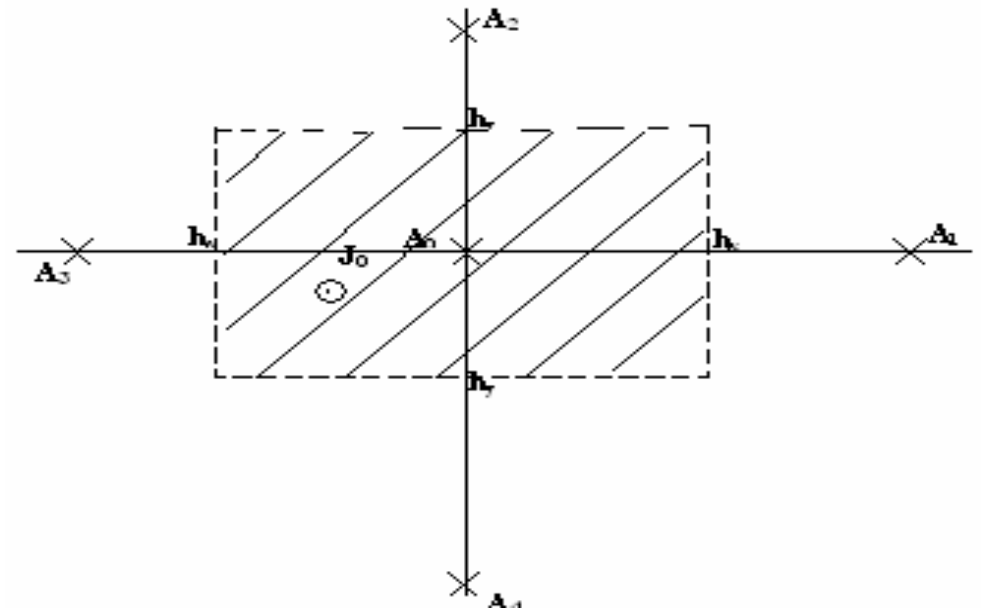
$$A_{0n} \left(\frac{v_1}{h_2} + \frac{v_2}{h_4} + \frac{v_1 h_2 + v_2 h_4}{h_1 h_3} \right) = A_{1n} \frac{v_1 h_2 + v_2 h_4}{h_1 (h_1 + h_3)} + \frac{v_1}{h_2} A_{2n} + A_{3n} \frac{v_1 h_2 + v_2 h_4}{h_3 (h_1 + h_3)} + \frac{v_2}{h_4} A_{4n} -$$

$$- \frac{\sigma_1 h_2 + \sigma_2 h_4}{2} \cdot \frac{A_{0(n+1)} - A_{0n}}{\Delta t} + \frac{h_2 J_{1(n+1)} + h_4 J_{2(n+1)}}{2}$$

•Mediu neomogen



•Mediu omogen



•rețea dreptunghiulară de discretizare

$$A_{0n} \left[\frac{2}{h_x^2} + \frac{2}{h_y^2} \right] = \frac{A_{1n}}{h_x^2} + \frac{A_{2n}}{h_y^2} + \frac{A_{3n}}{h_x^2} + \frac{A_{4n}}{h_y^2} - \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{2v_0} \frac{A_{0(n+1)} - A_{0n}}{\Delta t} + \frac{(J_{1(n+1)} + J_{2(n+1)})}{2v_0}$$

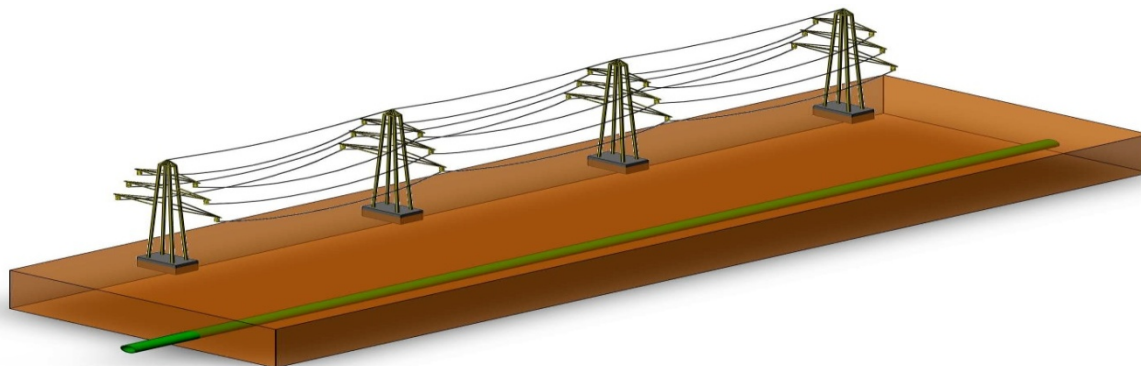
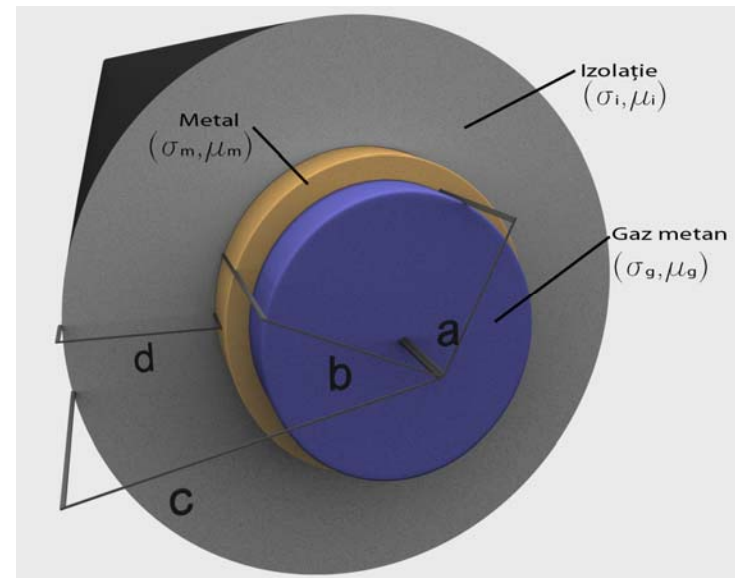
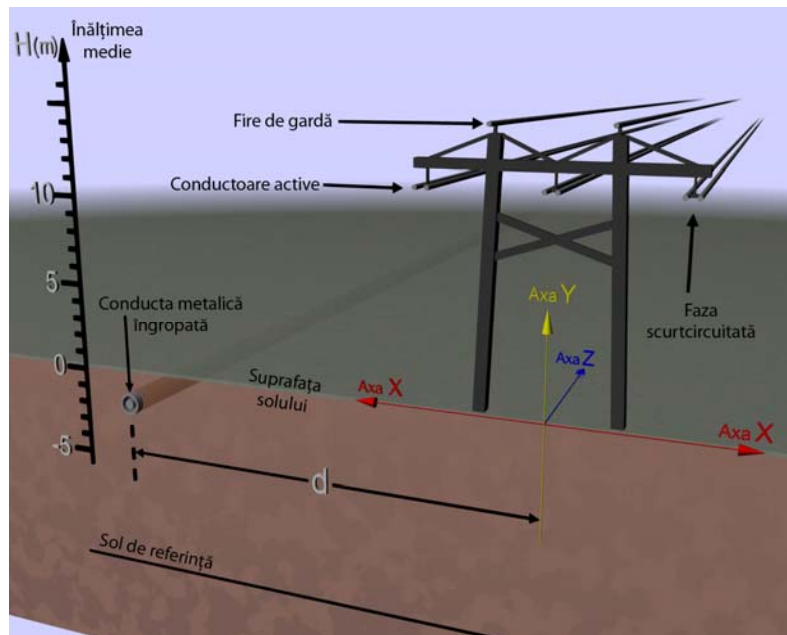
$$A_{0n} \left[\frac{2}{h_x^2} + \frac{2}{h_y^2} \right] = A_{1n} \frac{1}{h_x^2} + A_{2n} \frac{1}{h_y^2} + A_{3n} \frac{1}{h_x^2} + A_{4n} \frac{1}{h_y^2} - \frac{\sigma}{v_0} \frac{A_{0(n+1)} - A_{0n}}{\Delta t} + \frac{J_0}{v_0}$$

Model numeric diferențial pentru calculul tensiunii induse în conducta amplasată pe un traseu paralel cu linia, utilizând modelul unui plan paralel și rețea dreptunghiulară

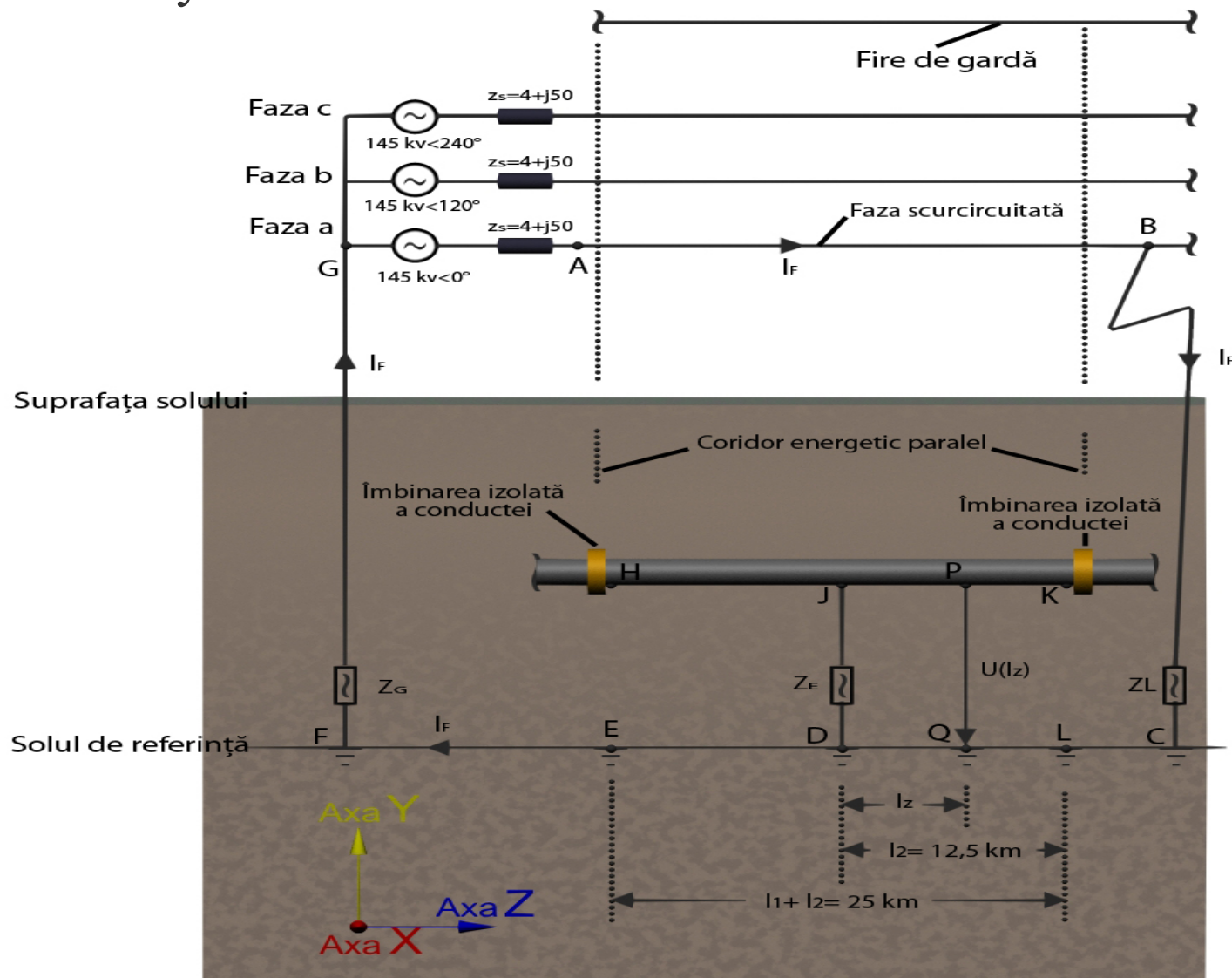
- **MDF + legea lui Faraday – tensiuni induse**
 - Defect în afara zonei de paralelism – cuplaj conductiv neglijat

- **Comparație MDF - CIGRE**

- Zonă de influență comună: conductă (îngropată 2m) și linie electrică
- Calculul curentului de defect I_f în conductorul liniei de înaltă tensiune

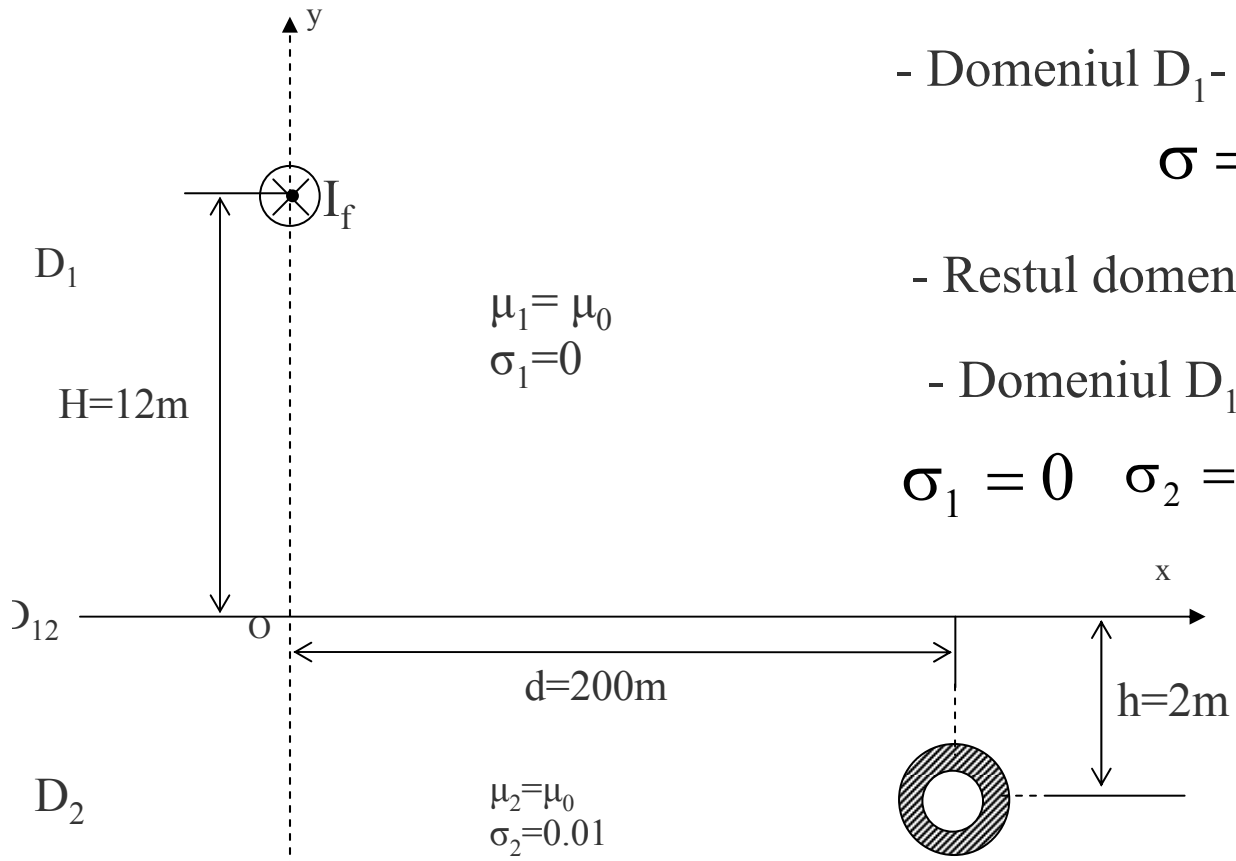


Legea lui Faraday – conturul închis Γ



$$\underline{I}_f = \underline{U}_0 \left(\operatorname{Re}\{\underline{Z}_s\} + \frac{1}{\sigma \cdot S} + R_f + R_g \right)^{-1} \quad \underline{I}_f = I_f = 1000 \text{ A.}$$

Model plan-paralel și rețea de discretizare dreptunghiulară



- Domeniul D_1 - vecinătatea punctului (I_f)

$$\sigma = \sigma_1 = 0 \quad \mu_1 = \mu_0$$

- Restul domeniului D_1 $J_0 = 0$

- Domeniul D_{12} la suprafața de separație

$$\sigma_1 = 0 \quad \sigma_2 = \sigma \quad J_{1(n+1)} = J_{2(n+1)} = 0$$

$$A_{0n} \left[\frac{2}{h_x^2} + \frac{2}{h_y^2} \right] = A_{1n} \frac{1}{h_x^2} + A_{2n} \frac{1}{h_y^2} + A_{3n} \frac{1}{h_x^2} + A_{4n} \frac{1}{h_y^2} + \mu_0 J_0$$

$$A_{0n} \left[\frac{2}{h_x^2} + \frac{2}{h_y^2} \right] = A_{1n} \frac{1}{h_x^2} + A_{2n} \frac{1}{h_y^2} + A_{3n} \frac{1}{h_x^2} + A_{4n} \frac{1}{h_y^2} - \frac{\sigma}{2} \mu_0 \frac{A_{0(n+1)} - A_{0n}}{\Delta t}$$

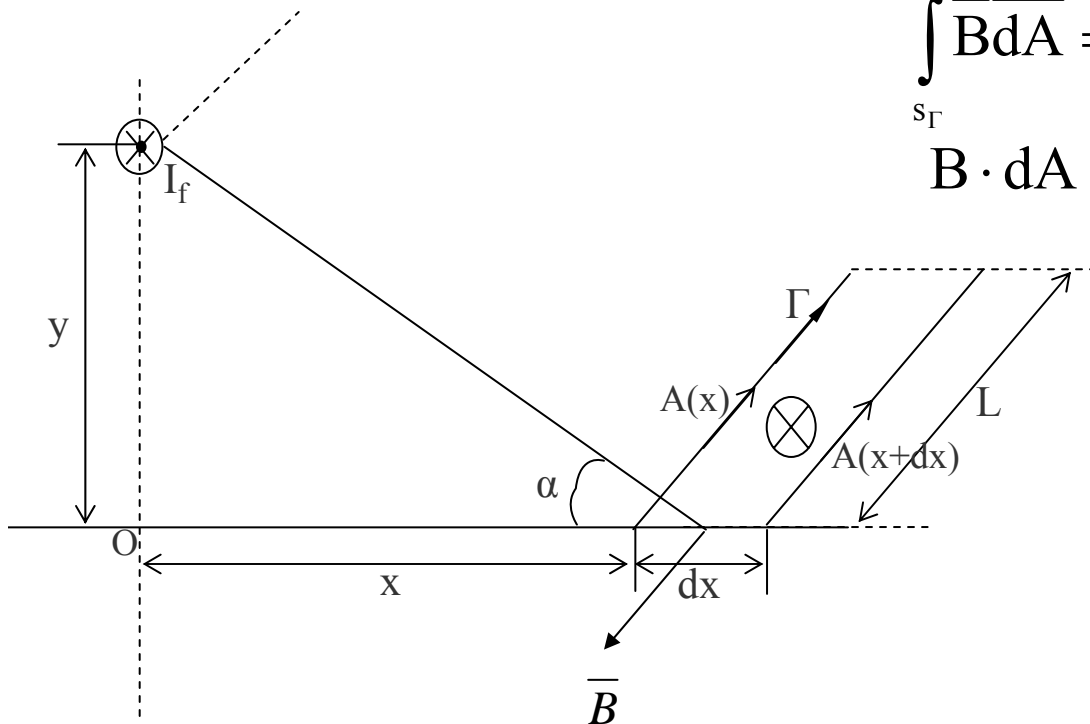
- Domeniul D_2 în sol $J_{1(n+1)} = J_{2(n+1)} = 0$ $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$

$$A_{0n} \left[\frac{2}{h_x^2} + \frac{2}{h_y^2} \right] = A_{1n} \frac{1}{h_x^2} + A_{2n} \frac{1}{h_y^2} + A_{3n} \frac{1}{h_x^2} + A_{4n} \frac{1}{h_y^2} - \sigma \mu_0 \frac{A_{0(n+1)} - A_{0n}}{\Delta t}$$

Determinarea expresiei analitice a potențialului magnetic vector în domeniul D_1 deasupra solului

$$\int_{s_\Gamma} \overline{B} dA = \int_\Gamma \overline{A} dl$$

$$\overline{B} \cdot dA \cdot \cos \alpha = A(x) \cdot L - A(x + dx) \cdot L$$



$$\frac{\mu_0 I_f}{4\pi} \frac{2x}{x^2 + y^2} = -\frac{dA(x)}{dx}$$

$$A(x) = C - 10^{-4} \ln(x^2 + y^2)$$

Presupunere: $x = 2000\text{m}$ la suprafața solului MVP=0; $y = H = 12\text{m}$

$$A(2000) = C - 10^{-4} \ln(4 \cdot 10^6 + 144) = 0 \quad C = 1,52 \cdot 10^{-3}$$

•MDF pe un contur dreptunghiular $x \in [0, 2000], y \in [-40, 0]$

•Pașii $h_x = 25, h_y = 1$

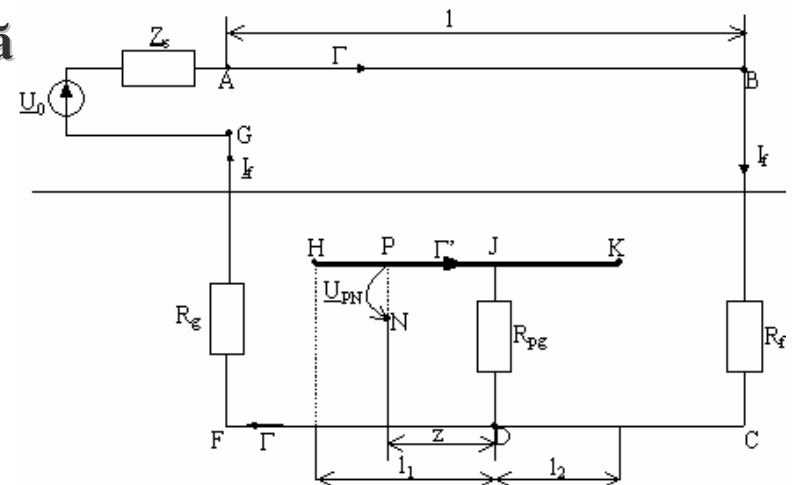
$$A(200, -2) = 0.28 \cdot 10^{-3}$$

•Legea lui Faraday pe conturul închis $\Gamma' = \text{PJDN}$

• A_z , este constant în fiecare punct de pe segmentul de conductă HK (simetrie)

Valoarea absolută a tensiunii induse în conductă

$$|U_{PN}| = \omega |A_z| z = 314 \cdot 0.28 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 = 87.92 \text{ (V)}$$



Comparație MDF-CIGRE

Tensiunea indusă U_{PN} la un curent de defect $I_f = 1000$ A, între un punct P de pe conductă (la distanța $z = 1000$ m de J) și un punct din sol

Distanța de separație x (m)	CIGRE Working Group 36.02 U_{PN} (V)	MDF U_{PN} (V)
50	206.5	146.12
200	107.7	87.92
2000	8.46	5.26

- Rezultatele obtinute cu MDF – concordanta cu CIGRE
- Solutiile ecuatiilor Maxwell obtinute cu MDF-concluzii utile – cuplajul inductiv LEA-conducta
- Complementara altor metode propuse in literatura de specialitate

OBIECTIV 3 – 2008

**CREAREA UNUI MODEL FIZICO-MATEMATIC
GENERALIZAT PENTRU ESTIMAREA EFECTELOR
CUPLAJELOR INDUCTIVE ȘI CONDUCTIVE ÎN
REGIM ARMONIC DINTRE O REȚEA COMPLEXĂ DE
CONDUCTE METALICE SUBTERANE ȘI O LINIE
ELECTRICĂ**

Concluzii și contribuții originale

Obiectiv 3 - 2008

- S-a propus o **metodă a subdivizării în celule** a zonei de influență și crearea unui **model de circuit echivalent** pentru evaluarea cu mai multă precizie a tensiunilor și curenților induși în structura victima
- S-a demonstrat, că procedura de descompunere utilizând **circuitele echivalente Thevenin** este foarte importantă deoarece prin acest artificiu efectul impedanței de sarcină poate fi separat de efectul sursei de tensiune repartizată pe lungimea conductei.
- S-a prezentat un **algoritm de calcul** în patru etape al tensiunilor și curenților care se pot induce într-o rețea complexă de conducte metalice subterane localizate în apropierea unei stații electrice de transformare
- S-a realizat **calculul tensiunilor și curenților induși** în rețeaua de conducte metalice

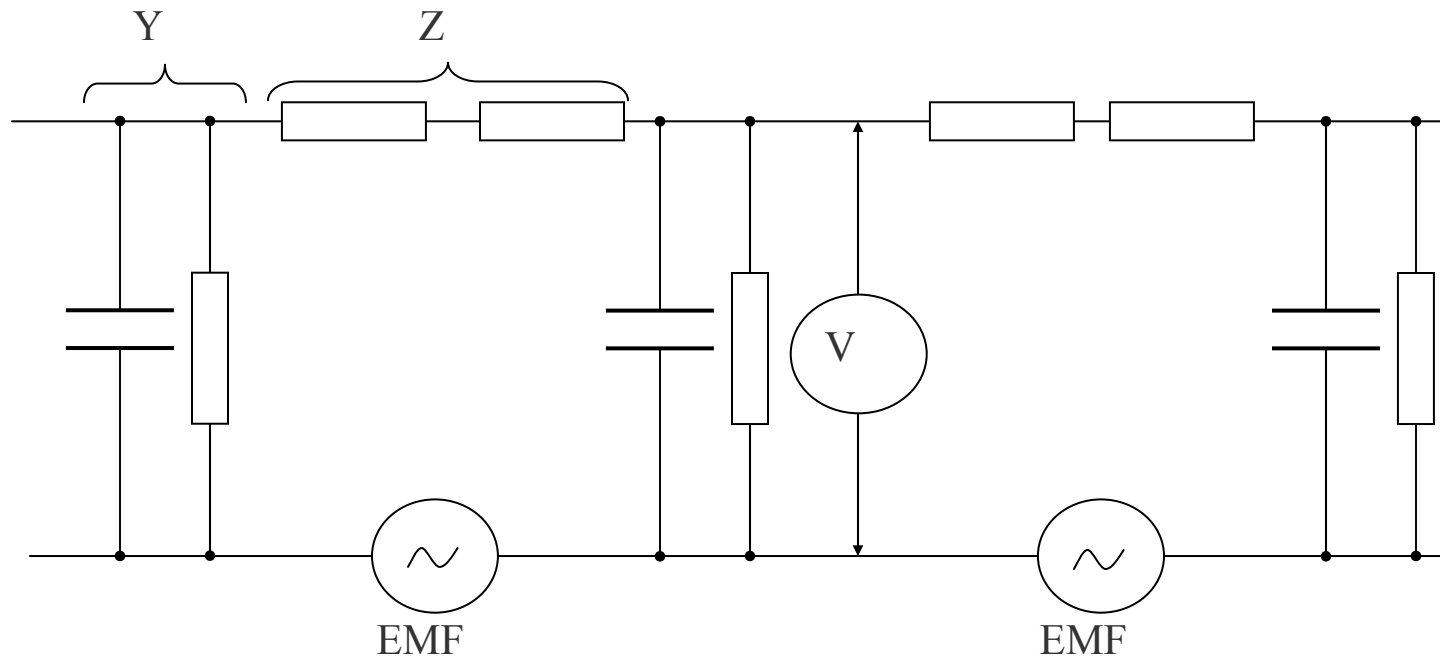
- S-a introdus o **observație importantă**: subdivizarea în secțiuni să fie făcută astfel încât punctele de punere la pământ ale conductei să coincidă cu extremitățile secțiunilor și cu joncțiunile rețelei
- S-a susținut cu ajutorul formulelor că o **tensiune de vârf indusă** într-o conductă îngropată cu un traseu comun cu o linie electrică este așteptată pe porțiunile în care una dintre caracteristicile electrice și fizice se schimbă brusc
- S-a demonstrat că utilizarea unei ecuații într-un singur nod, de-a lungul unui lanț de circuite echivalente Thevenin ale conductei este suficientă pentru **estimarea tensiunilor de vârf** pe o multisecțiune de conductă îngropată
- S-a realizat un **program în Mathcad** pentru calculul valorilor tensiunilor în diferite puncte de acces pe conductă conform datelor măsurate pentru două cazuri practice

Calculul **tensiunilor induse** în conductă se realizează în două etape:

1. Determinarea tensiunii electromotoare induse în conductă de curenții din linia de înaltă tensiune care are traseu comun cu conducta subterană

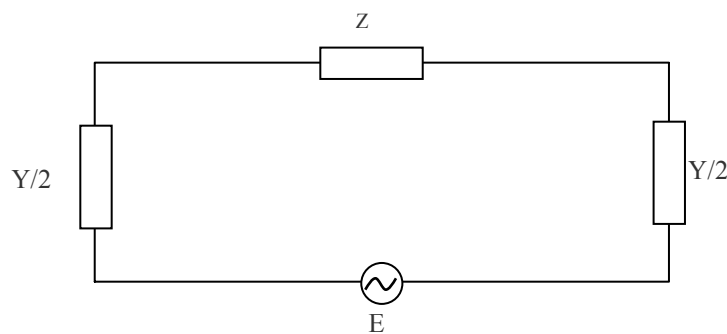
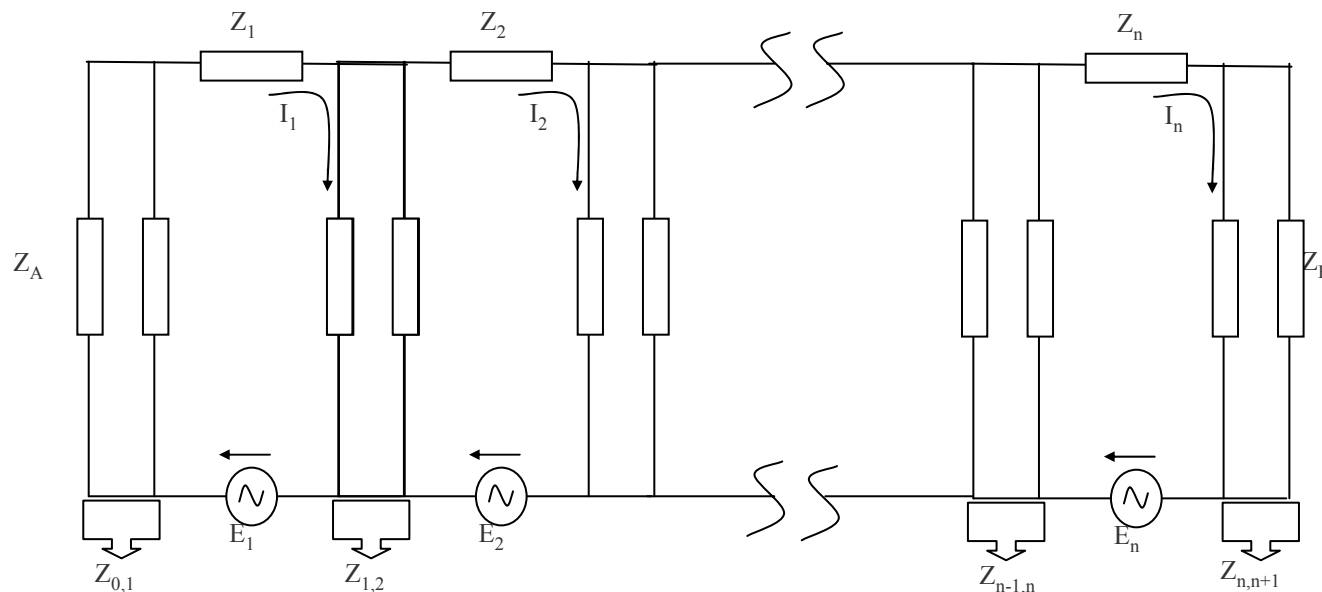
Tensiunile electromotoare longitudinale cauzează circulații de curenți în conductă și tensiuni între conductă și sol.

2. Calculul tensiunilor și a curenților ca răspuns la tensiunile electromotoare longitudinale induse



Propunerea unei **metode a subdivizării în celule** a zonei de influență și crearea unui **model de circuit echivalent** pentru evaluarea cu mai multă precizie a tensiunilor și curenților induși în structura victima

- subdivizarea zonei de influență într-un număr mare de secțiuni (scheme echiv. π)
- determinarea tensiunilor la cât mai multe poziții de-a lungul conductei



$$Z = \underbrace{\frac{1}{\pi D} \sqrt{\frac{\rho_p \mu_0 \mu_r \omega}{2}}}_{Z_{\text{int}}} + \underbrace{\frac{\mu_0 \omega}{8} + j \mu_0 f \ln \frac{3.7}{D} \sqrt{\frac{\rho \mu_0}{\omega}}}_{Z_{\text{ext}}}$$

$$Y = \frac{\pi D}{r_c} + j \omega \frac{\epsilon_0 \epsilon_r \pi D}{\delta_c}$$

Algoritm de calcul al tensiunilor și curenților care se pot induce într-o rețea complexă de conducte metalice subterane localizate în apropierea unei stații electrice de transformare

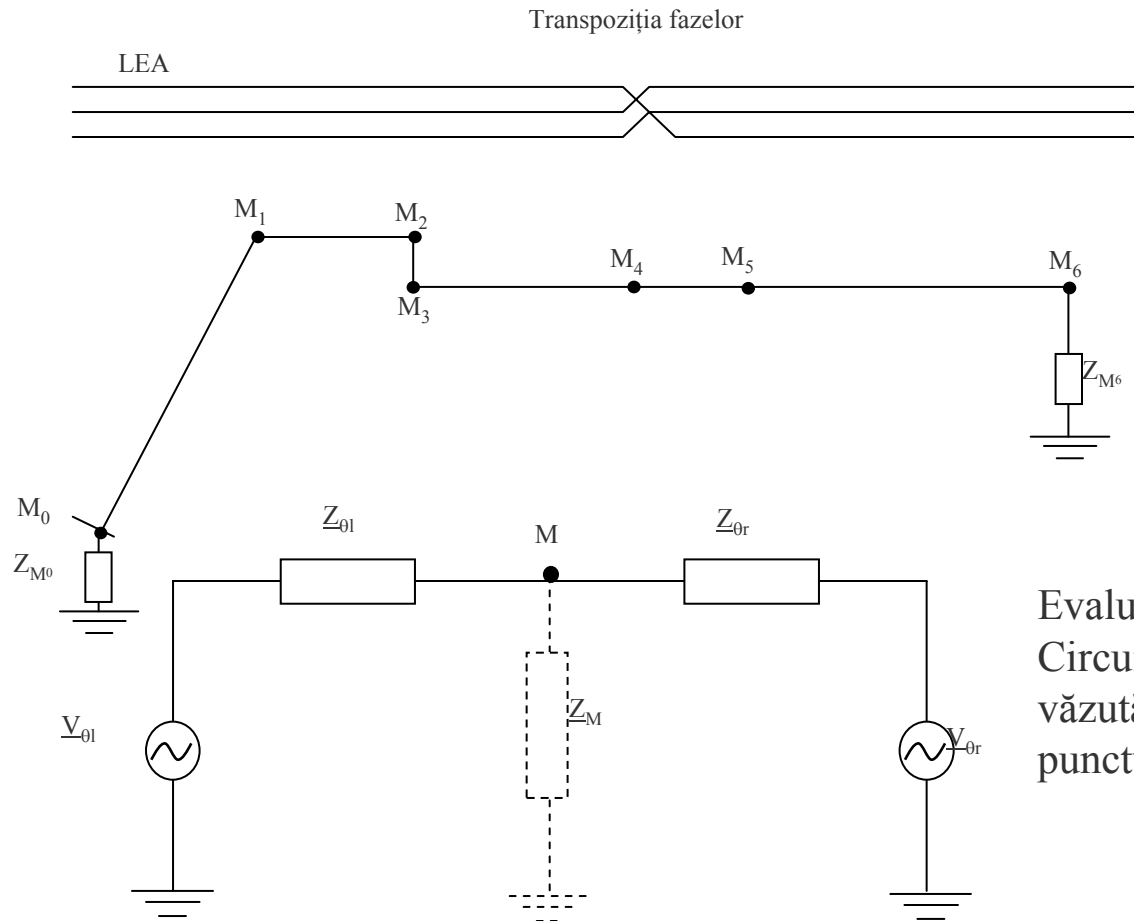
- **Calculul câmpului inductor**
- **Calculul tensiunii electromotoare longitudinale și a curențului transversal care reprezintă influența electromagnetică produsă de sursă (linia electrică) asupra victimei (rețeaua de conducte metalice)**
- **Modelarea rețelei de conducte metalice prin intermediul unui circuit electric echivalent**
- **Calculul tensiunilor și curenților induși în rețeaua de conducte metalice.**

•Ecuatia celulei i:
$$-Z_{i-1,i}I_{i-1} + (Z_{i-1,i} + Z_i + Z_{i,i+1})I_i - Z_{i,i+1}I_{i+1} = E_iL_i$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (Z_{0,1} + Z_1 + Z_{1,2})I_1 - Z_{1,2}I_2 = E_1L_1 \\ -Z_{1,2}I_1 + (Z_{1,2} + Z_2 + Z_{2,3})I_2 - Z_{2,3}I_3 = E_2L_2 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ -Z_{n-2,n-1}I_{n-2} + (Z_{n-2,n-1} + Z_{n-1} + Z_{n-1,n})I_{n-1} - Z_{n-1,n}I_n = E_{n-1}L_{n-1} \\ -Z_{n-1,n}I_{n-1} + (Z_{n-1,n} + Z_n + Z_{n,n+1})I_n = E_nL_n \end{array} \right.$$

- Rezultat - valorile tensiunilor la capetele celulelor și curentul indus în fiecare celulă (curentul de-a lungul conductei)
- Block Solver pentru rezolvarea procesului iterativ care apare pentru fiecare secțiune în parte – **matrice cu număr de condiționare mare**
- Sistem instabil la perturbații**

Tensiune de vârf indusă într-o conductă îngropată cu un traseu comun cu o linie electrică este așteptată pe porțiunile în care una dintre caracteristicile electrice și fizice se schimbă brusc



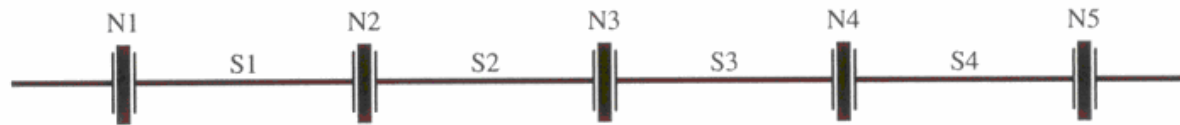
Evaluarea tensiunii induse la un punct M
Circuit echivalent Thevenin pentru conducta văzută din stânga, respectiv din dreapta punctului de observație

$$\underline{V}(M) = \frac{\frac{V_{\theta 1}}{Z_{\theta 1}} + \frac{V_{\theta r}}{Z_{\theta r}}}{\frac{1}{Z_{\theta 1}} + \frac{1}{Z_M} + \frac{1}{Z_{\theta r}}} = \frac{Z_M (Z_{\theta r} V_{\theta 1} + Z_{\theta 1} V_{\theta r})}{Z_{\theta r} Z_{\theta 1} + Z_{\theta 1} Z_M + Z_{\theta r} Z_M}$$

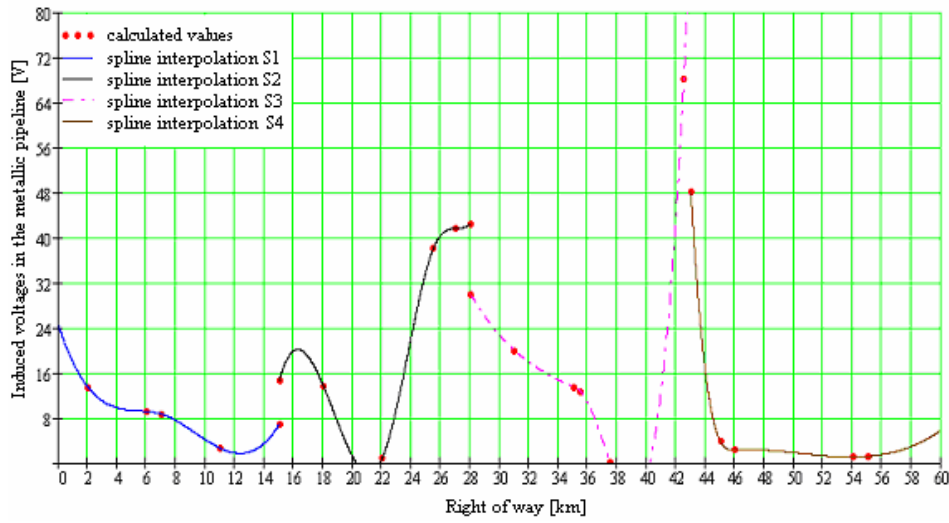
Calculul valorilor tensiunilor în diferite puncte de acces pe conductă

Studiu de caz I.

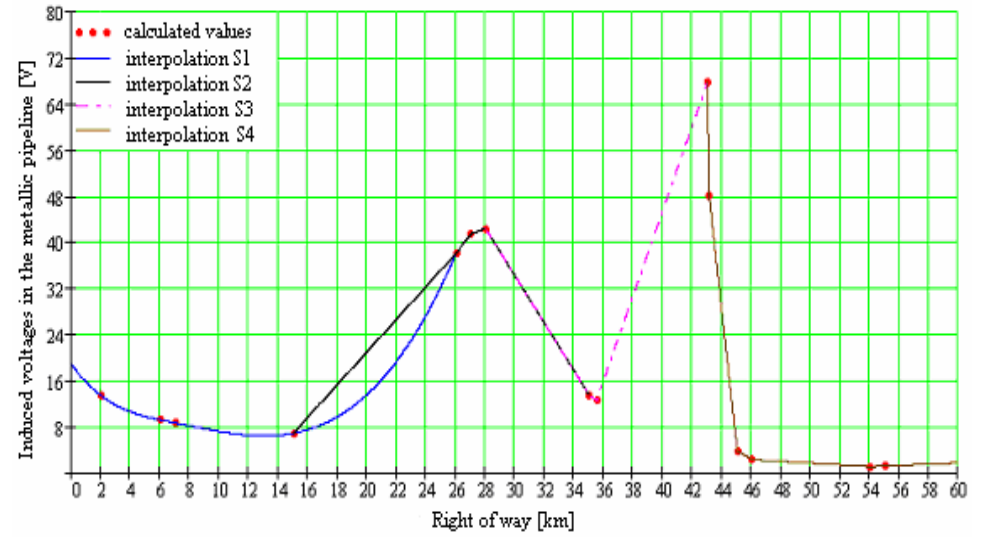
- LEA (220 kV) – conducta metalica subterana de gaz
- S-a determinat o functie de interpolare globală pentru toate cele 4 sectoare în care s-a împărțit traseul comun!!!



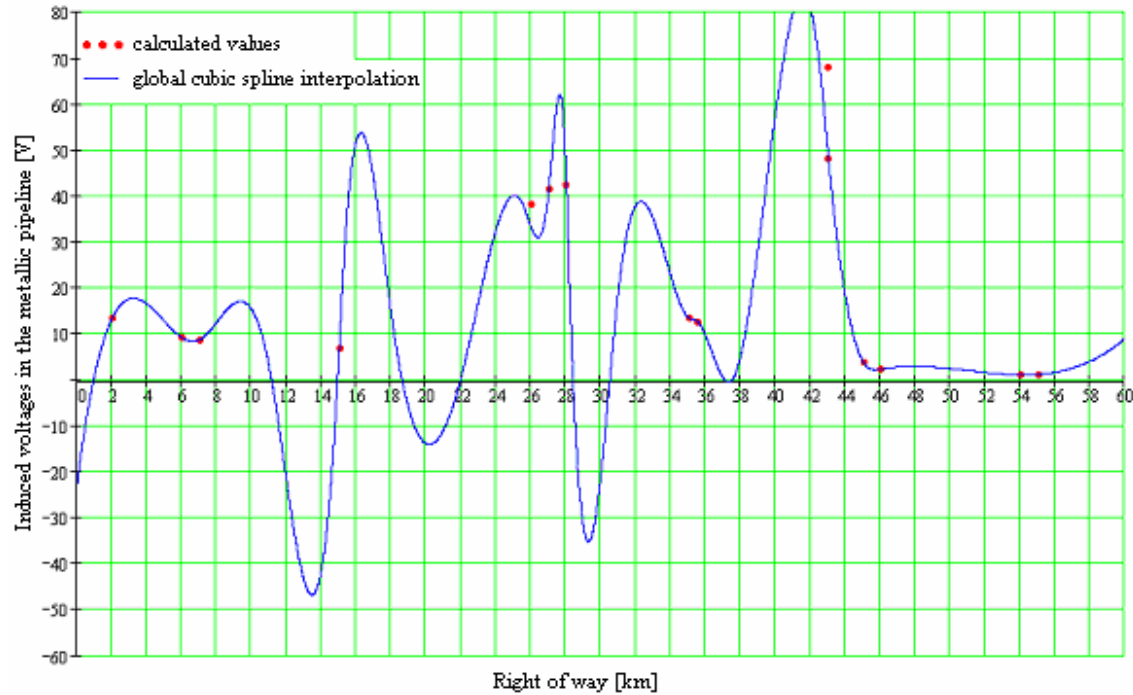
Secțiunea de coridor		Localizarea kilometrică [km]	Estimarea tensiunii induse [V]
S1	1	2	13.42
	2	6	9.18
	3	7	8.68
	4	15	6.91
S2	1	25.5	38.22
	2	27	41.61
	3	28	42.42
S3	1	35	13.49
	2	35.5	12.66
	3	42.5	68.02
S4	1	43	48.09
	2	45	3.81
	3	46	2.32
	4	54	1.07
	5	55	1.18



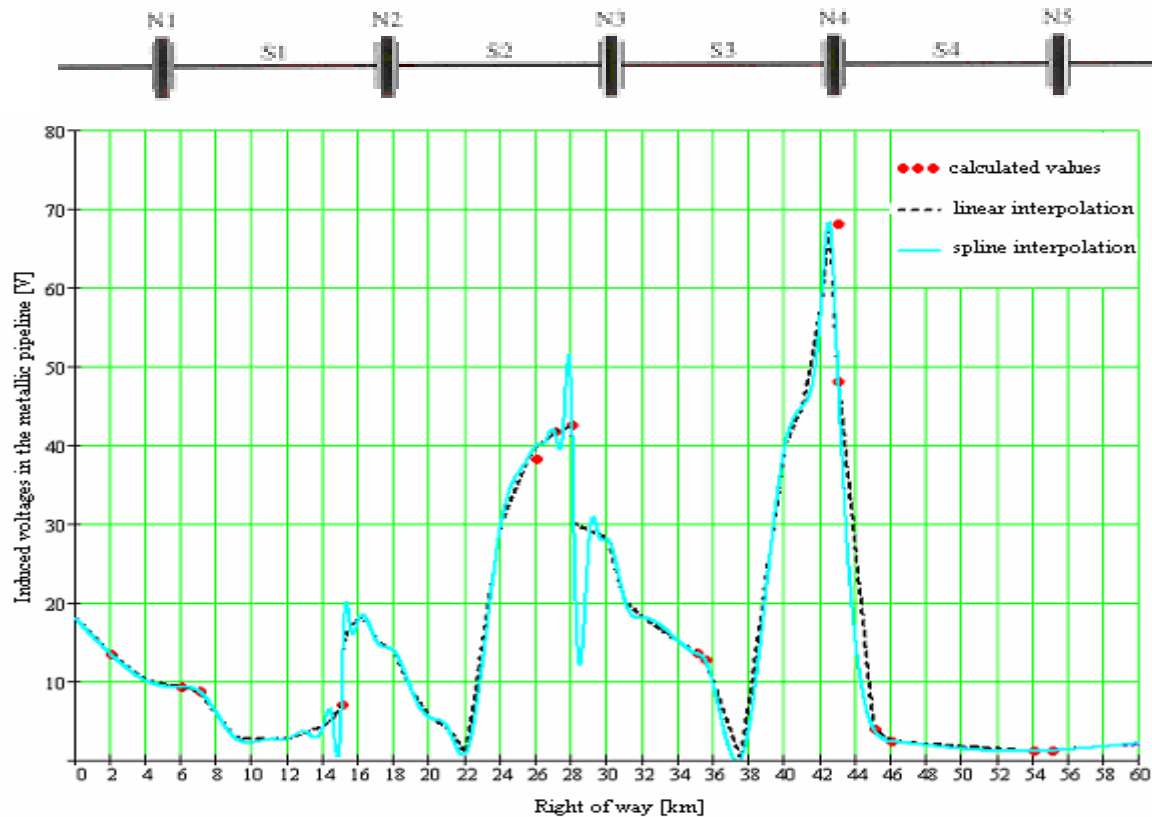
Interpolare numerica sectoriala cu valori adaugate si fara continuitatea functiei de interpolare la limita dintre zone



Interpolare numerica sectoriala fara valori adaugate dar cu impunerea conditiei de continuitate a functiei de interpolare



Interpolare globala cu functii spline "predictor"



Interpolare globala cu metoda “predictor-corector”

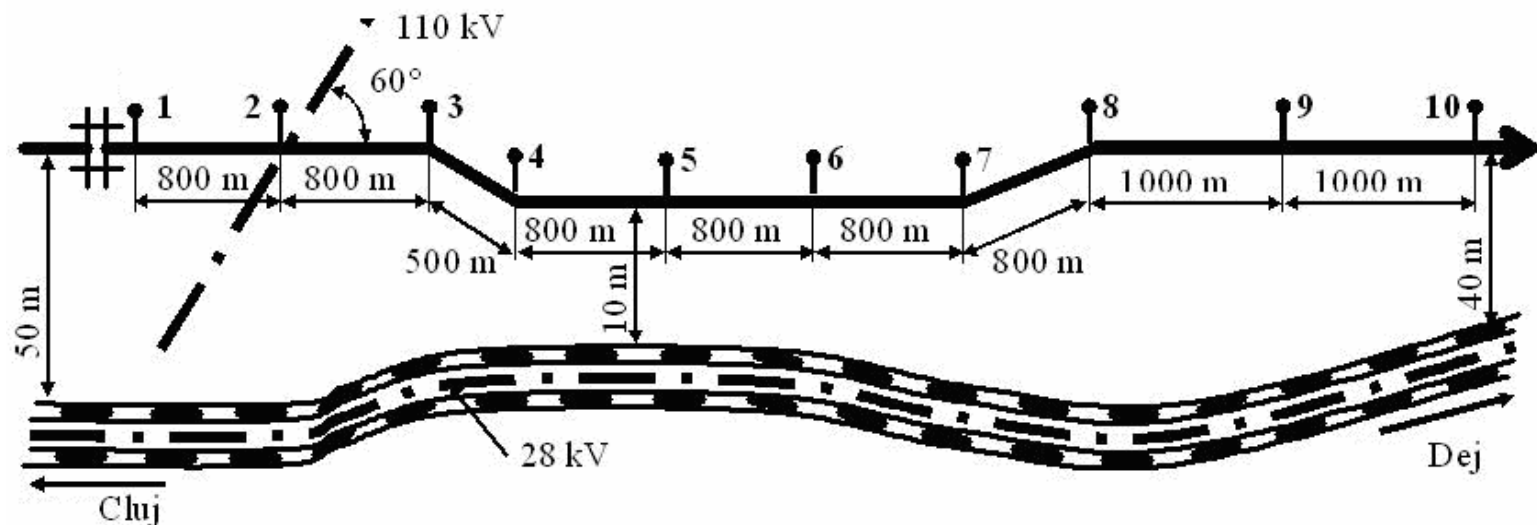
Interpolarea bazata pe metoda de interpolare predictor-corector verifica conditiile reale de coexistenta in aceeasi zona a conductelor metalice si LEA, limitele de continuitate si aproximeaza foarte precis tensiunile induse in conducta.

Studiu de caz II.

- Conductă de gaze de medie presiune pozată în anul 1999, cu diametrul de 300mm și grosimea peretelui de 8 mm
- Izolație de polietilenă extrudată în trei straturi (total 3mm)
- Traseu comun pe cca. 20 km cu o linie dublă de cale ferată electrificată și intersectat de o linie electrică aeriană de 110 kV;

Parametru determinat	Locul determinării									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Rezistivitate sol [$\Omega \cdot m$]	11	18	16	45	32	93	21	64	17	15
U_{CA} [V _{ef}]	8,10	19,1	17,2	29,3	15,2	26,4	7,13	1,89	2,11	4,32
E [V _{Cu/CuSO4}]	-0,353	-0,398	-0,371	-0,325	-0,394	-0,410	-0,387	-0,324	-0,352	-0,365

Rezultatele determinărilor pe conducta



$$x := \begin{pmatrix} 800 \\ 1600 \\ 2400 \\ 2650 \\ 3450 \\ 4250 \\ 5050 \\ 5450 \\ 6450 \\ 7450 \end{pmatrix}$$

$$y := \begin{pmatrix} 8.10 \\ 19.10 \\ 17.2 \\ 29.3 \\ 15.2 \\ 26.4 \\ 7.13 \\ 1.89 \\ 2.11 \\ 4.32 \end{pmatrix}$$

Valorile in volti ale tensiunilor induse (y) masurate pe traseul comun linie-conducta la diferite distante in metri (x)

Functii spline cubice de interpolare si functii de interpolare liniara se utilizeaza pentru evaluarea tensiunilor induse in puncte diferite fata de cele masurate pe traseul comun!!!

$$L := \text{lspline}(x, y) \quad C := \text{cspline}(x, y) \quad P := \text{pspline}(x, y)$$

$$\text{lsp}(t) := \text{interp}(L, x, y, t) \quad \text{csp}(t) := \text{interp}(C, x, y, t)$$

$$\text{psp}(t) := \text{interp}(P, x, y, t) \quad \text{l}(t) := \text{linterp}(x, y, t)$$

$$t := 800, 801.. 7450$$

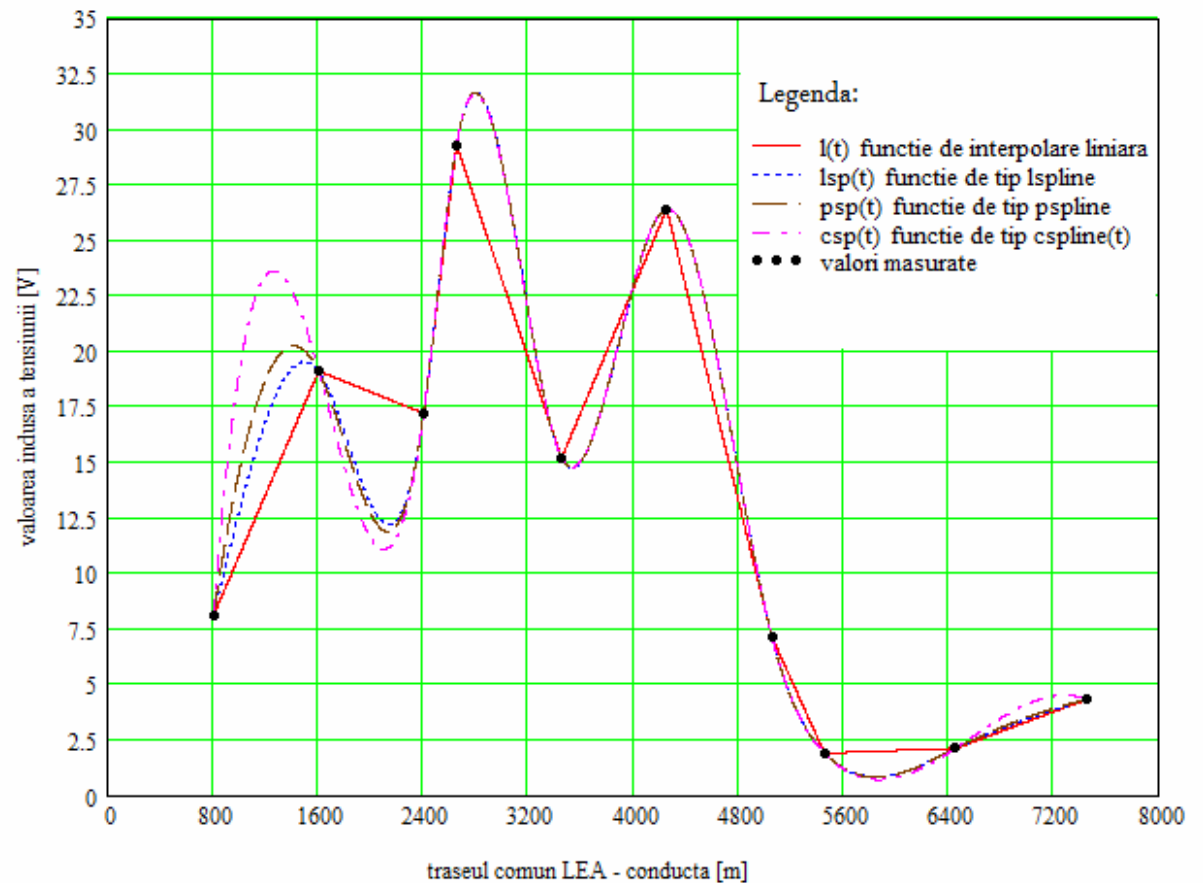
Algoritm MathCAD (zona de influenta > 10 Km) pentru evaluarea tensiunilor induse!

```

A :=
| X ← x
| V ← v
| n ← last(X)
| for j ∈ 0..n
|   Aj,0 ← Vj
| for j ∈ 1..n
|   for k ∈ 0..n - j
|     Ak,j ←  $\frac{A_{k+1,j-1} - A_{k,j-1}}{X_{k+j} - X_k}$ 
|     for i ∈ 1..j
|       An-j+i,j ← 0
|   A
| A
    
```

$$j := 1.. \text{last}(x) \quad \text{last}(x) = 3 \quad z := 56, 58.. 86$$

$$N(z) := \sum_j \left[A_{0,j} \prod_{i=0}^{j-1} [z - (x)_i] \right] + A_{0,0}$$



Distanța pe traseul comun LEA - conducta	Interpolare liniara [V]	Interpolare lspline [V]	Interpolare pspline [V]	Interpolare cspline[V]
800	8,1	8,1	8,1	8,1
850	8,7875	9,3356	9,9995	11,65
900	9,475	10,558	11,737	14,669
950	10,163	11,755	13,314	17,189
1000	10,85	12,913	14,728	19,241
1050	11,538	14,02	15,982	20,859
1100	12,225	15,062	17,073	22,073
1150	12,913	16,027	18,003	22,916
1200	13,6	16,901	18,771	23,421
1250	14,288	17,673	19,378	23,618
1300	14,975	18,328	19,823	23,541
1350	15,663	18,854	20,107	23,22
1400	16,35	19,239	20,228	22,689
1450	17,038	19,468	20,189	21,98
1500	17,725	19,53	19,987	21,124
1550	18,413	19,412	19,625	20,153
1600	19,1	19,1	19,1	19,1
1650	18,981	18,592	18,421	17,997
1700	18,863	17,922	17,622	16,875
1750	18,744	17,138	16,745	15,767
1800	18,625	16,284	15,831	14,704
1850	18,506	15,406	14,922	13,72
1900	18,388	14,549	14,061	12,845
1950	18,269	13,76	13,288	12,113
2000	18,15	13,084	12,645	11,554

- **Modelarea numerică și analitică** a situațiilor concrete din teren - metodă viabilă și eficientă de **predicție a zonelor de risc** cu potențiale periculoase și **de analiză** a metodelor eficiente de înlăturare a efectelor negative ale acestora.
- Elaborarea de **modele fizico-matematice** care pot furniza valori de referință pentru măsurătorile specifice în punctele operaționale, date extrem de utile în urmărirea și rezolvarea oricărei posibile anomalii în funcționarea corectă a sistemelor supuse analizei
- Dezvoltarea și implementarea acestor **metode, instrumente și informații** va asigura integritatea în ansamblu a conductelor metalice expuse coroziunii electrochimice, având ca efect **reducerea costurilor de exploatare, creșterea durabilității** și nu în ultimul rând, **protecția mediului înconjurător**.

Implicarea tinerilor cercetători în activitățile de cercetare Analiză științifică

An	Număr tineri cercetători/ Număr total cercetători	din care doctoranzi cu frecvență	Număr articole științifice având ca prim autor un tânăr cercetător	Număr articole indexate având ca prim autor un tânăr cercetător
2007 (3 luni)	4 / 7	3	6 din 8	0 din 2
2008	3* / 6	2	6 din 14	3 din 4

* - în anul 2008 domnul Man Lucian s-a angajat, prin concurs, pe post de asistent la o altă facultate a universității noastre, încetând din acel moment să mai facă parte din colectivul acestui contract de cercetare

Nume	Funcție	Titlul tezei de doctorat	Stadiul atins în elaborarea tezei
Denisa ȘTEȚ	asistent	Contribuții la modelarea numerica a interferențelor electromagnetice	- realizare măsurători - prezentarea tezei în catedră (aprilie 2010)
Mihaela PLEȘA	doctorand cu frecvență	Contributii la studiul teoretic si experimental al simulării magnetice functionale	- realizare experimente - dezvoltare soft - prezentarea tezei în catedră (martie 2010)
Andrei CECLA N	doctorand cu frecvență	Contribuții la sinteza câmpului electromagnetic	- dezvoltare soft - prezentarea tezei în catedră (septembrie 2009)
Lucian MAN	doctorand cu frecvență	Contributii privind studiul compatibilitatii electromagnetice in instalatii electrice de forta	- dezvoltare soft

Implicarea tinerilor cercetători în activitățile de cercetare
Analiză financiară

An financiar	Cheltuieli de personal		
	Prevăzute	Realizate	din care tineri cercetători
2007	45.000 lei	45.000 lei	20.000 lei (44,5% din total 2007)
2008	125.000 lei	125.000 lei	55.000 lei (44% din total 2008)

Efortul desăvârșirii tezelor de doctorat ale doctoranzilor implicați în proiect este bine susținut de activitatea asumată pentru realizarea acestuia. Ea însă nu se va opri, în nici un caz, o dată cu predarea acestor teze. Implicarea în domeniul studiului interferențelor electromagnetice se vrea a fi continuata pe termen lung.

Detaliere buget program

An	Cheltuieli de personal		Regie		Mobilități		Achiziții	
	Planificat	Realizat	Planificat	Realizat	Planificat	Realizat	Planificat	Realizat
2007	45.000	45.000	11.250	11.250	18.750	18.750	0	0
2008	125.000	125.000	37.500	37.500	44.000	52.300,61	43.500	35.199,39

Echipamente achiziționate în cadrul acestui contract:

- 2 buc HM8115-2 Wattmetru
- Analizor trifazat ION 8800CD + Softul aferent
- Licenta Software MultiFields
- Licenta Mathcad University Classroom Perpetual – 15 Floating

Dificultăți administrative întâmpinate în derularea proiectului

- Procesul de realizare a unei achiziții publice în sistemul bugetar durează foarte mult, încetinind activitatea de cercetare

Dificultăți științifice întâmpinate în derularea proiectului

- Timpul relativ lung de așteptare pentru publicarea unui articol științific într-o revistă cotate ISI

VĂ MULȚUMESC PENTRU ATENȚIE!