

PROGRAM DE CALCUL PENTRU DETERMINAREA PARAMETRIILOR ELECTRICI SPECIFICI AI LINIILOR ELECTRICE AERIENE

1. Introducere

Liniile electrice aeriene sau cele în cablu reprezintă elemente de circuit cu parametri uniform distribuiți pe lungimea acestora. Parametrii lineici sau specifici pe unitatea de lungime, asociați unei faze a unui circuit de linie, se împart în două categorii:

- Parametri longitudinali:
 - Rezistența, r_0 [Ω/km];
 - Reactanța inductivă, $x_0 = \omega l_0$ [Ω/km];
- Parametri transversali:
 - Conductanța (perditanța), g_0 [S/km];
 - Susceptanța capacitivă, $b_0 = \omega c_0$ [S/km].

Rezistența și reactanța inductivă specifice formează împreună *impedanța* pe unitatea de lungime a liniei, având următoarea formă:

$$\underline{z}_0 = r_0 + j\omega l_0 = r_0 + jx_0 \quad [\Omega/\text{km}]$$

Conductanța și susceptanța capacitivă specifice formează împreună *admitanța* pe unitatea de lungime a liniei, fiind de forma:

$$\underline{y}_0 = g_0 + j\omega c_0 = g_0 + jb_0 \quad [\text{S}/\text{km}]$$

Parametrii globali – impedanța longitudinală $\underline{Z} = R + jX$ și admitanța transversală $\underline{Y} = G + jB$ - pentru o linie cu lungimea L , în km și n_c circuite identice care funcționează în paralel, se calculează cu următoarele relații:

$$\underline{Z} = R + jX = \frac{1}{n_c} \cdot (r_0 + jx_0) \cdot L \quad [\Omega]$$

$$\underline{Y} = G + jB = n_c (g_0 + jb_0) \cdot L \quad [\text{S}]$$

2. Parametrii liniilor electrice

2.1. Rezistența liniilor electrice

În curent continuu, rezistența specifică și, respectiv, globală a conductoarelor liniilor electrice se calculează cu relațiile cunoscute din electrotehnică și anume:

$$r_{cc_0} = K' \cdot \rho \cdot \frac{1000}{S} \quad [\Omega/\text{km}] \quad (1)$$

$$R_{cc} = K' \cdot \rho \cdot \frac{L}{S} \quad [\Omega] \quad (2)$$

unde:

- L – lungimea conductorului, în m;
- S – secțiunea conductorului, în mm^2 ;

- K' – coeficient de corecție ce ține seama de tipul constructiv al conductoarelor ($K' = 1$ pentru conductoare masive și $K' = 1.02 \div 1.04$ pentru conductoare funie la care, datorită răsucirii, lungimea firelor componente este cu 2 ÷ 4% mai mare decât lungimea conductorului);
- ρ – rezistivitatea materialului conductor, în $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ dată de obicei în standarde pentru temperatura de 20°C și variabilă cu temperatura θ , după o relație de forma următoare:

$$\rho_\theta = \rho_{20^\circ\text{C}} \cdot [1 + \alpha(\theta - 20) + \beta(\theta - 20)^2] \quad (3)$$

în care:

- $\rho_{20^\circ\text{C}}$ - rezistivitatea materialului conductor la temperatura de 20°C , în $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$;
- α și β – coeficienți de variație a rezistivității cu temperatura (pentru cupru, $\alpha = 0.00417 \text{ grad}^{-1}$, $\beta = 0.45 \cdot 10^{-6} \text{ grad}^{-2}$, iar pentru aluminiu, $\alpha = 0.0387 \text{ grad}^{-1}$, $\beta = 1.10 \cdot 10^{-6} \text{ grad}^{-2}$).

În curent alternativ, rezistența conductoarelor *LEA* este puțin mai mare decât cea în curent continuu ($R_{ca} > R_{cc}$), datorită, în principal, efectului pelicular și, în mai mică măsură, efectului de apropiere sau de proximitate.

Efectul pelicular reprezintă fenomenul de distribuție neuniformă a curentului în secțiunea transversală a unui conductor și se manifestă printr-o creștere a densității curentului la periferia conductorului, ceea ce echivalează cu o micșorare a secțiunii lui reale, fapt ce conduce la o creștere a rezistenței. Acest efect este influențat de frecvența curentului, de dimensiunile conductorului și de natura materialului conductor.

Efectul de apropiere (proximitate) reprezintă fenomenul de distribuție neuniformă a curentului în secțiunea transversală a unui conductor, produs de variația în timp a curentului în unul sau mai multe conductoare învecinate acestuia. Acest efect depinde atât de frecvența curenților, dimensiunile și modul de dispunere a conductoarelor, natura materialului conductor, cât și de legătura dintre amplitudinile și fazele curenților, precum și de distribuția fluxului magnetic în interiorul și exteriorul conductorului.

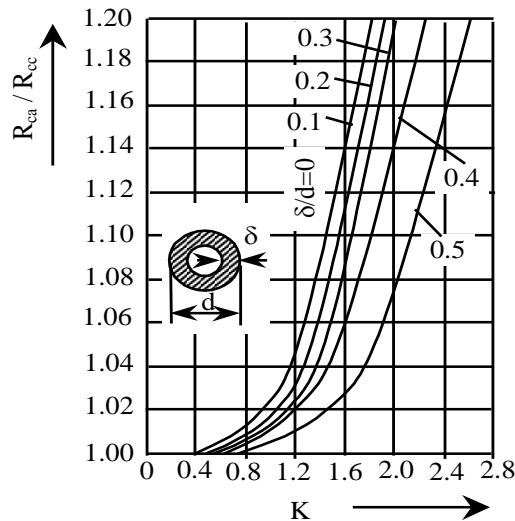


Figura 1 Curbele lui Ewan pentru calculul raportului R_{ca}/R_{cc} , în cazul conductoarelor tubulare

În practică, pentru calculul rezistenței în curent alternativ a conductoarelor liniilor electrice se utilizează tabele sau curbe precalculate. Astfel, curbele lui Ewan, reprezentate în Figura 1, permit determinarea raportului R_{ca}/R_{cc} , pentru conductoare tubulare, în funcție de coeficientul K , definit de relația următoare:

$$K = 0,0503 \sqrt{\frac{\delta f}{R_{cc}(d-f)}} \quad (4)$$

în care: d – diametrul conductorului; δ - grosimea peretelui; f – frecvența.

La conductoarele funie din Ol-Al, efectul pelicular scade cu creșterea numărului de straturi, iar considerarea inimii de oțel complică mult calculul rezistenței în curent alternativ. Din aceste motive, prin neglijarea curentului ce parcurge inima de oțel, aceste conductoare bimetalice din OL-Al pot fi echivalate cu cele de construcție tubulară.

Pentru LEA alimentate în curent alternativ cu frecvența de 50 Hz, creșterea rezistenței datorită efectului pelicular este mică și poate fi neglijată în cazul secțiunilor mai mici de 450 mm², pentru conductoarele din cupru și mai mici de 600 mm² pentru cele din aluminiu, conform variației raportului R_{ca}/R_{cc} în funcție de secțiune, reprezentată în Figura 2.

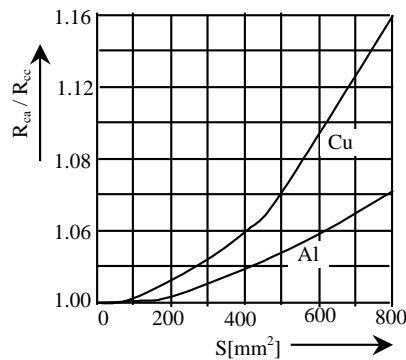


Figura 2 Variația raportului R_{ca}/R_{cc} în funcție de secțiune la conductoarele LEA din cupru sau aluminiu

În cazul LEC rezistența în curent alternativ este mai mare decât cea în curent continuu ($R_{ca} > R_{cc}$), datorită efectului pelicular, a efectului de apropiere și a pierderilor determinate de curenții induși în ecrane, mantaua metalică și armăturile cablurilor.

Pierderile determinate de curenții induși în mantalele cablurilor pot fi însemnate. Aceste pierderi pot fi echivalate cu pierderile Joule, pe o rezistență suplimentară înseriată cu rezistența pe fază a cablului. Pentru reducerea acestor pierderi, în dreptul manșoanelor de înădădire, mantalele celor două cabluri dispuse consecutiv se izolează între ele și se leagă la pământ.

În calculele practice, pentru a evidenția creșterea rezistenței în curent alternativ, datorită efectului pelicular și de apropiere, se utilizează relații de tipul:

$$R_{ca} = (1 + Y_p + Y_a) R_{cc} \quad (5)$$

în care Y_p și Y_a reprezintă coeficienți de creștere a rezistenței datorită efectului pelicular și de apropiere.

Valorile coeficienților Y_p și Y_a se determină cu relații de următoarea formă:

$$Y_p = 0,159 \cdot 10^{-2} \sqrt{f \frac{K_p}{R_{cc}}} \quad (6)$$

$$Y_a = 0,159 \cdot 10^{-2} \sqrt{f \frac{K_a}{R_{cc}}}$$

unde K_a și K_p sunt coeficienți care depind de forma și numărul conductoarelor cablului.

Creșterea rezistenței cablurilor, în curent alternativ, poate fi influențată constructiv sau prin dispunerea acestora. Astfel, dacă secțiunile circulare ale cablurilor cu secțiuni mari sunt realizate din sectoare izolate între ele prin benzi de hârtie, atunci se reduce influența efectului pelicular și a celui de apropiere.

La cablurile monofazate de înaltă tensiune, montate în tuburi metalice, influența celor două efecte este mai accentuată, în comparație cu montarea normală în pământ. De exemplu, în cazul dispunerii acestora în tuburi metalice după un triunghi cu vârful în sus (Figura 3a) creșterea celor două efecte este de 70%, iar la o dispunere după un triunghi cu vârful în jos (Figura 3b), creșterea este de 100%.

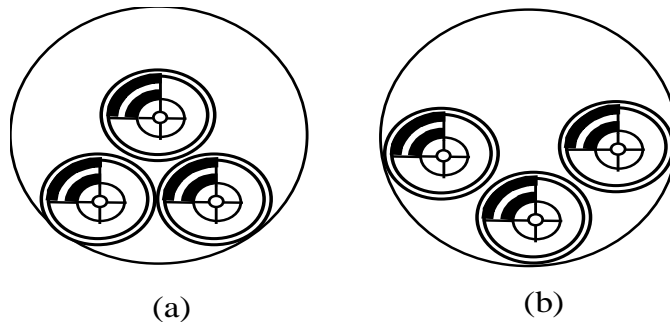


Figura 3 Variante de dispunere a cablurilor în tuburi metalice
a) triunghi cu vârful în sus; b) triunghi cu vârful în jos

Pentru cabluri de diferite secțiuni, de construcție funie, cu mai multe vâne conductoare, la frecvența de 50 Hz, în Tabelul 1 sunt indicate valorile raportului R_{ca}/R_{cc} , iar în Figura 4 sunt reproduse, după Siemens, valorile rezistenței suplimentare pentru diferite tipuri de cabluri cu mai multe conductoare.

Valorile raportului R_{ca}/R_{cc} la cablurile de construcție funie de diferite secțiuni, cu mai multe vâne conductoare

S [mm ²]	50	125	150	200	250	300	350	375
R_{ca}/R_{cc}	1,02	1,06	1,07	1,10	1,13	1,16	1,19	1,21

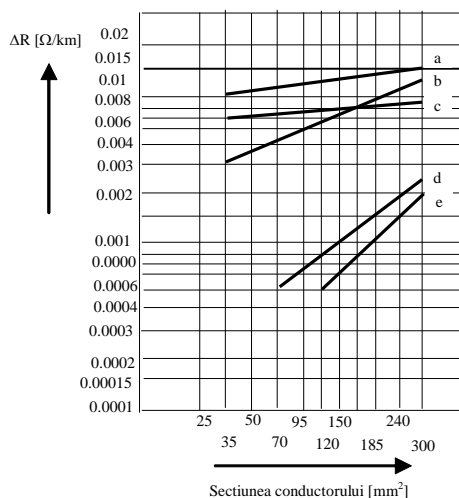


Figura 4 Rezistența suplimentară a cablurilor cu mai multe conductoare la frecvență 50Hz:

- a) cabluri armate cu manta de plumb și conductoare de cupru sau de aluminiu;
- b) cabluri nearmate cu manta de aluminiu și conductoare de cupru sau de aluminiu;
- c) cabluri armate cu izolație din material plastic și conductoare de cupru sau aluminiu;
- d) cabluri nearmate cu izolație din material plastic și conductoare de cupru sau aluminiu;
- e) cabluri nearmate cu izolație din material plastic și conductoare de aluminiu

Din analiza datelor prezentate în Tabelul 1 și Figura 4 se constată că, în cazul cablurilor, diferența dintre rezistența în curent alternativ și cea în curent continuu este mai mare decât la LEA, începând chiar de la secțiuni relativ mici.

De asemenea, în curent alternativ, creșterea rezistenței conductoarelor liniilor electrice în cablu este mai accentuată la cupru față de aluminiu, aceasta fiind cu atât mai ridicată pe măsura creșterii frecvenței, a secțiunii conductoarelor și a micșorării distanței dintre acestea.

2.2 Reactanța liniilor electrice

Reactanța inductivă pe fază a unei linii trifazate se determină cu o relație de forma:

$$X = \omega L = 2\pi f L \quad (7)$$

în care:

L – inductivitatea pe fază, în H;

f – frecvența, în Hz;

Stabilirea inductivității LEA se poate face pornind de la relația fundamentală a raportului dintre fluxul magnetic total (Φ) care străbate suprafața limitată de conturul circuitului și curentul (I) care străbate circuitul:

$$L = \frac{\Phi_t}{I} \quad (8)$$

Pentru conductoarele cilindrice masive, drepte și paralele, situate în medii omogene neferomagnetice, inductivitatea reprezintă o mărime de material, care depinde de natura materialului, de forma și de dimensiunile geometrice ale circuitului sau ale circuitelor ce se influențează reciproc.

În cazul prezenței mai multor conductoare sau circuite în același spațiu, se definește o inductivitate proprie (L) și o inductivitate mutuală (M).

Inductivitatea proprie a conductoarelor are două componente și anume:

$$L = L_{ext} + L_{int} = \frac{\Phi_{ext}}{I} + \frac{\Phi_{int}}{I} \quad (9)$$

în care:

L_{ext} – inductivitatea exterioară corespunzătoare liniilor de câmp magnetic exterior (Φ_{ext});

L_{int} – inductivitatea interioară corespunzătoare liniilor de câmp magnetic interior (Φ_{int}).

Pentru un conductor cilindric cu raza r și lungimea l , inductivitatea exterioară este definită de următoarea relație:

$$L_{ext} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{D_x}{r} \quad [\text{H}] \quad (10)$$

iar inductivitatea interioară este de forma:

$$L_{int} = \frac{\mu l}{8\pi} \quad [\text{H}] \quad (11)$$

în care:

D_x – distanța de la axa conductorului până la punctul în care intensitatea câmpului magnetic este nulă ($H = 0$);

μ_0 - permeabilitatea magnetică a vidului ($\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m);

μ - permeabilitatea magnetică a materialului conductor.

Din relațiile (9) ÷ (11), rezultă că inductivitatea proprie a conductorului masiv are următoarea formă:

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{D_x}{r} + \frac{\mu}{4\mu_0} \right) = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{D_x}{r_e} \quad [\text{H}] \quad (12)$$

în care r_e reprezintă raza echivalentă medie:

$$r_e = r e^{-\frac{\mu}{4\mu_0}} \quad (13)$$

Inductivitatea mutuală M dintre două conductoare cilindrice, paralele, de lungime l , situate într-un mediu neferomagnetic și cu distanța D între axe, este dată de relația:

$$M = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{D_x}{D} \quad [\text{H}] \quad (14)$$

2.2.1 Reactanța LEA trifazate cu simplu circuit

În cazul LEA trifazate simplu circuit, conductoarele de fază sunt dispuse pe coronamentul stâlpilor în vârfurile unui triunghi sau în același plan orizontal, conform celor reprezentate în Figura 5.

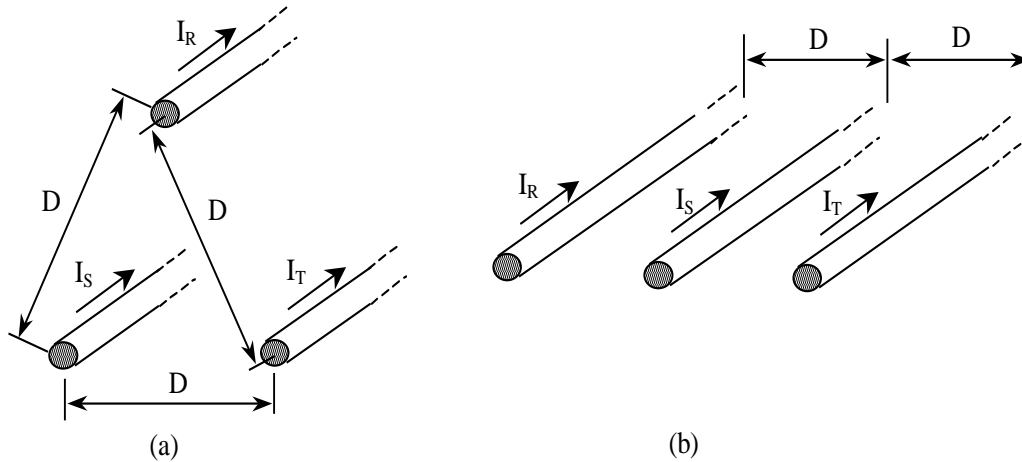


Figura 5 Dispoziția conductoarelor LEA simplu circuit
a) în vârfurile unui triunghi; b) în același plan orizontal

Fluxurile magnetice totale care înlănțuie conductoarele de fază ale liniei trifazate simplu circuit se determină cu relația matriceală:

$$[\underline{\Phi}] = [\beta][I] \quad (15)$$

sau

$$\begin{bmatrix} \underline{\Phi}_R \\ \underline{\Phi}_S \\ \underline{\Phi}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{RR} & M_{SR} & M_{TR} \\ M_{RS} & L_{SS} & M_{TS} \\ M_{RT} & M_{ST} & L_{TT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} \quad (16)$$

unde:

- [$\underline{\Phi}$]- vectorul coloană al fluxurilor totale care înălțuie conductoarele de fază;
- [β]- matricea pătrată a inductivităților proprii și mutuale (L_{ii} – inductivitățile proprii ale conductoarelor de fază, M_{ij} – inductivitățile mutuale dintre perechile de faze);
- [\underline{I}] – vectorul coloană al intensității curenților pe cele trei faze.

Prin explicitarea inductivităților proprii și mutuale din relația (16), conform relațiilor generale (12) și (14), rezultă:

$$\begin{bmatrix} \underline{\Phi}_R \\ \underline{\Phi}_S \\ \underline{\Phi}_T \end{bmatrix} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \begin{bmatrix} \ln \frac{D_x}{r_e} & \ln \frac{D_x}{D_{SR}} & \ln \frac{D_x}{D_{TR}} \\ \ln \frac{D_x}{D_{RS}} & \ln \frac{D_x}{r_e} & \ln \frac{D_x}{D_{TS}} \\ \ln \frac{D_x}{D_{RT}} & \ln \frac{D_x}{D_{ST}} & \ln \frac{D_x}{r_e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_R \\ \underline{I}_S \\ \underline{I}_T \end{bmatrix} \quad (17)$$

Considerând sistemul trifazat de curent simetric ($\underline{I}_R = \underline{I}_R$; $\underline{I}_S = a^2 \underline{I}_R$; $\underline{I}_T = a \underline{I}_R$), fluxurile magnetice totale corespunzătoare celor trei faze ale liniei sunt date de următoarele relații:

$$\begin{aligned} \underline{\Phi}_R &= \frac{\mu_0 l}{2\pi} \underline{I}_R \left(\ln \frac{\sqrt{D_{SR} D_{TR}}}{r_e} + j\sqrt{3} \ln \sqrt{\frac{D_{SR}}{D_{TR}}} \right) \\ \underline{\Phi}_S &= \frac{\mu_0 l}{2\pi} \underline{I}_S \left(\ln \frac{\sqrt{D_{RS} D_{TS}}}{r_e} + j\sqrt{3} \ln \sqrt{\frac{D_{TS}}{D_{RS}}} \right) \\ \underline{\Phi}_T &= \frac{\mu_0 l}{2\pi} \underline{I}_T \left(\ln \frac{\sqrt{D_{RT} D_{ST}}}{r_e} + j\sqrt{3} \ln \sqrt{\frac{D_{TR}}{D_{TS}}} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

Conform relației generale (8), rezultă că inductivitățile specifice pe km de linie, atașate celor trei faze ale liniei, sunt de forma:

$$\begin{aligned} \underline{l}_{R_0} &= \frac{\underline{\Phi}_R}{l \underline{I}_R} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{\sqrt{D_{SR} D_{TR}}}{r_e} + j\sqrt{3} \ln \sqrt{\frac{D_{SR}}{D_{TR}}} \right) \\ \underline{l}_{S_0} &= \frac{\underline{\Phi}_S}{l \underline{I}_S} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{\sqrt{D_{RS} D_{TS}}}{r_e} + j\sqrt{3} \ln \sqrt{\frac{D_{TS}}{D_{RS}}} \right) \\ \underline{l}_{T_0} &= \frac{\underline{\Phi}_T}{l \underline{I}_T} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{\sqrt{D_{RT} D_{ST}}}{r_e} + j\sqrt{3} \ln \sqrt{\frac{D_{TR}}{D_{TS}}} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

Ținând seama că distanțele dintre faze au valori apropiate, rezultă că $\ln \sqrt{D_{RS}/D_{TR}} \approx 0$, $\ln \sqrt{D_{ST}/D_{SR}} \approx 0$ și $\ln \sqrt{D_{TR}/D_{TS}} \approx 0$. În aceste condiții, în calculele practice se neglijează termenii

imaginari din relația (19), iar inductivitățile specifice atașate fazelor liniei sunt date de următoarele relații:

$$\begin{aligned}
 l_{R_0} &= \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{D_{SR} D_{TR}}}{r_e} \\
 l_{S_0} &= \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{D_{RS} D_{TS}}}{r_e} \\
 l_{T_0} &= \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{D_{RT} D_{ST}}}{r_e}
 \end{aligned} \tag{20}$$

Din analiza relațiilor (20), rezultă că inductivitățile specifice atașate fazelor unei linii trifazate simplu circuit sunt diferite în cazul când dispunerea conductoarelor de fază pe coronamentul stâlpilor nu este simetrică. Aceasta conduce la o nesimetrie de impedanțe, respectiv la o nesimetrie a tensiunilor.

Pentru a evita acest inconvenient, se practică transpunerea conductoarelor pe linie, adică un conductor de fază ocupă, pe rând, cele trei poziții posibile, de-a lungul liniei, conform celor reprezentate în Figura 6. Distanța pe care un conductor de fază ocupă cele trei poziții se numește ciclu de transpunere, iar distanța dintre două puncte de transpunere se numește pas de transpunere.

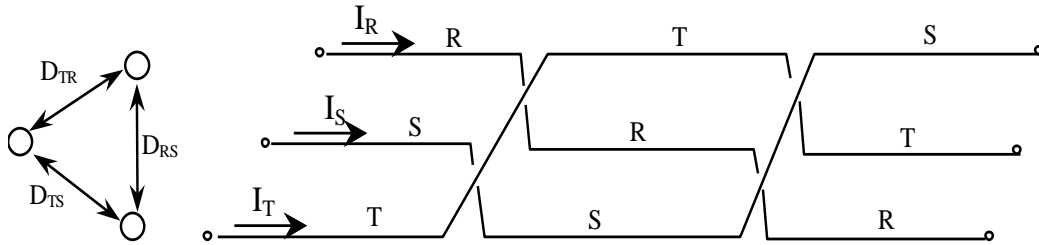


Figura 6 Transpunerea conductoarelor unei linii trifazate simplu circuit

Numărul ciclurilor de transpunere pe o linie depinde de dispoziția conductoarelor, de lungimea și tensiunea liniei. Ținând seama, însă, că stâlpii de transpunere au prețuri ridicate și, în același timp, constituie cauza multor defecte, există în prezent tendința de a se lungi ciclurile de transpunere: liniile de 110÷220 kV se construiesc cu 1÷3 cicluri, iar pentru liniile de 400 kV se recomandă o lungime a ciclului de 250 km.

La liniile pe parcursul cărora s-a efectuat transpunerea conductoarelor, inductivitățile pe cele trei faze devin egale și se pot exprima printr-o valoare medie, egală cu media aritmetică a celor trei inductivități determinate cu relațiile (20):

$$l_0 = \frac{l_{R_0} + l_{S_0} + l_{T_0}}{3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt[3]{D_{RS} D_{RT} D_{ST}}}{r_e}$$

sau

$$l_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_m}{r_e} \quad [\text{H/m}] \tag{21}$$

în care $D_m = \sqrt[3]{D_{RS} D_{RT} D_{ST}}$ reprezintă media geometrică a distanțelor dintre faze.

În cazul liniilor din materiale neferomagnetice ($\mu = \mu_0$), inductivitatea specifică pe fază și km de linie este de forma:

$$l_0 = 0,46 \cdot \lg \frac{D_m}{r_e} \text{ [mH/km]} \quad (22)$$

Pentru frecvența de 50 Hz, reactanța inductivă specifică atașată unei faze se determină cu următoarea relație:

$$x_0 = \omega l_0 = 0,1445 \cdot \lg \frac{D_m}{r_e} \text{ [\Omega/km]} \quad (23)$$

sau utilizând raza reală a conductoarelor:

$$x_0 = 0,1445 \cdot \lg \frac{D_m}{r} + 0,0157 \text{ [\Omega/km]} \quad (24)$$

2.2.2 Reactanța LEA trifazate cu dublu circuit

În cazul LEA trifazate cu dublu circuit, de tipul celei prezentate în Figura 7, pentru determinarea inductivității și reactanței specifice se procedează în mod asemănător ca și în cazul LEA cu simplu circuit, ținând seama, în plus, de influențele reciproce dintre cele două circuite ale liniei.

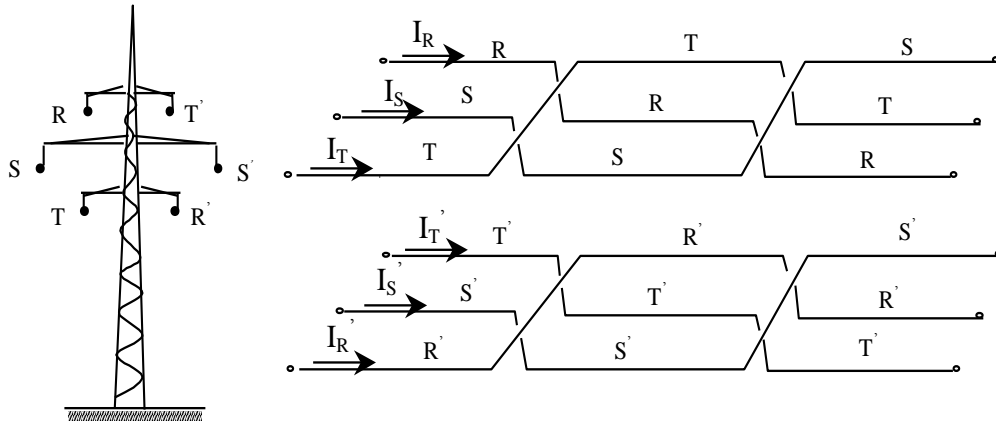


Figura 7 *Transpunerea conductoarelor unei linii trifazate dublu circuit*

Dacă de-a lungul liniei dublu circuit analizate procesul de transpunere se realizează atât la fazele unui circuit, cât și a circuitelor între ele, conform celor reprezentate în Figura 7 și parcurgând aceleași etape ca și în cazul liniilor cu simplu circuit, rezultă pentru inductivitatea și reactanța specifice următoarele relații de calcul:

$$l_0 = 0,46 \cdot \lg \frac{D_m}{r_e} \frac{D_{m1}}{D_{m2}} \text{ [mH/km]} \quad (25)$$

$$x_0 = 0,1445 \cdot \lg \frac{D_m}{r_e} \frac{D_{m1}}{D_{m2}} \text{ [\Omega/km]} \quad (26)$$

sau utilizând raza reală a conductoarelor:

$$x_0 = 0,1445 \cdot \lg \frac{D_m}{r} \frac{D_{m1}}{D_{m2}} + 0,0157 \text{ [\Omega/km]} \quad (27)$$

în care:

$$D_m = \sqrt[3]{D_{RS} D_{ST} D_{TR}} - \text{ media geometrică a distanțelor dintre fazele unui circuit;}$$

$D_{m_1} = \sqrt[3]{D_{RS} \cdot D_{ST} \cdot D_{TR}}$ - media geometrică a distanțelor dintre fazele neomoloage ale celor două circuite;

$D_{m_2} = \sqrt[3]{D_{RR'} \cdot D_{SS'} \cdot D_{TT'}}$ - media geometrică a distanțelor dintre fazele omoloage ale celor două circuite.

2.2.3 Influența construcției fazei asupra valorii reactanței liniilor electrice

Relațiile de calcul obținute în paragrafele precedente au fost deduse în ipoteza că LEA sunt realizate cu conductoare masive și monofilare. În construcția LEA se folosesc, de regulă, conductoare funie, iar în cazul tensiunilor foarte înalte, conductoare fasciculare sau conductoare tubulare.

Reactanța conductoarelor funie, de tipul celor reprezentate în Figura 8, este puțin mai mare decât cea a conductoarelor masive, ca urmare a influenței răsucirii firelor și a creșterii, în mică măsură, a inductivității interne. Aceasta se poate determina cu o relație avînd următoarea formă:

$$x_0 = 0,1445 \cdot \lg \frac{D_m}{r_m} \quad [\Omega/\text{km}] \quad (28)$$

în care r_m este raza medie a conductorului funie.

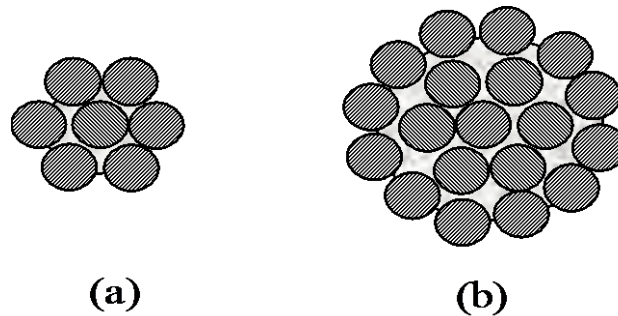


Figura 8 Conductoare funie dintr-un singur metal

Pentru conductoarele de construcție funie, alcătuite din fire de același diametru (cupru, aluminiu), în Tabelul 2 sunt prezentate valorile razei medii în funcție de secțiunea totală a funiei s și de numărul de fire ale acesteia.

Valorile razei medii în funcție de secțiunea totală a funiei și de numărul de fire

Tabelul 2

Număr fire	1	7	19	37	61	91	127
r_m / \sqrt{s}	0,439	0,464	0,490	0,498	0,502	0,504	0,505

Pentru creșterea capacității de transport a liniilor și pentru evitarea apariției fenomenului corona, LEA de înaltă și foarte înaltă tensiune se construiesc cu mai multe conductoare pe fază (conductoare fasciculare – Figura 9). În acest caz, în relațiile de calcul ale inductivității și reactanței trebuie să se țină seama de numărul de conductoare pe fază și de raza medie echivalentă a conductoarelor unei faze:

$$l_0 = \left(4,6 \cdot \lg \frac{D_m}{r_m} + \frac{0,5}{n} \right) 10^{-4} \quad [\text{H}/\text{km}] \quad (29)$$

$$x_0 = 0,1445 \cdot \lg \frac{D_m}{r_m} + \frac{0,0157}{n} \quad [\Omega/\text{km}] \quad (30)$$

unde:

$r_m = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot \rho_m^{n-1}}$ - raza medie echivalentă a fasciculului de conductoare pe o fază;

r - raza unui conductor din fascicul;

n - numărul de conductoare pe fază;

$\rho_m = \frac{d}{2 \sin \frac{\pi}{n}}$ - raza cercului de așezare a conductoarelor în fascicul.

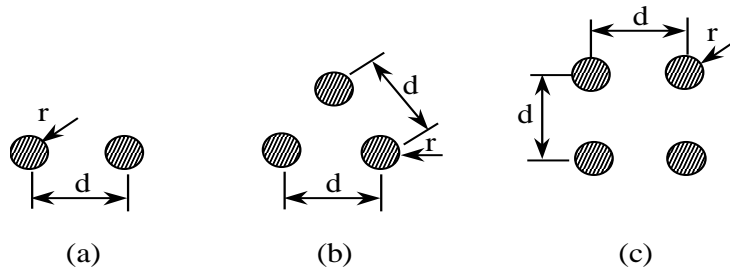


Figura 9 Conductoare fasciculare

Conductoarele tubulare se folosesc la construcția LEA de înaltă și foarte înaltă tensiune în vederea eliminării fenomenului corona, iar pentru determinarea reactanței specifice se poate folosi relația (28), în care raza medie a conductorului tubular se determină astfel:

$$r'_m = \varphi r_1$$

unde:

r_1 - raza exterioară a conductorului tubular;

r_2 - raza interioară a conductorului tubular;

φ - coeficient a cărui valoare este funcție de raportul r_2/r_1 , conform celor reprezentate în Figura 10.

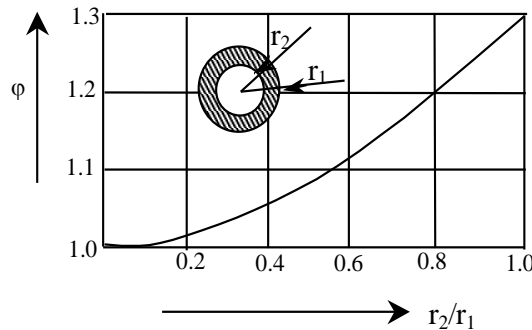


Figura 10 Variația razei medii a conductoarelor tubulare în funcție de raportul r_2/r_1

2.2.4 Reactanța inductivă a liniilor electrice în cablu

Fenomenele de inducție între elementele unei linii electrice în cablu depind, în mare măsură, de dispoziția relativă a conductoarelor, iar relațiile de calcul pentru stabilirea inductivității sunt, în general, complicate.

Laborator Transportul și distribuția energiei electrice - B. Neagu

În cazul unei dispoziții simetrice a conductoarelor active de fază și anume linii realizate folosind cabluri cu două și trei conductoare sau cabluri monopolare dispuse în triunghi sau în linie, la distanțe egale între faze, iar de-a lungul liniei este efectuată transpunerea conductoarelor, se pot utiliza relații de calcul simplificate care permit determinarea unor valori medii pentru inductivitatea proprie aparentă.

Pentru un conductor cilindric, masiv, din materiale neferomagnetice, inductivitatea proprie aparentă poate fi determinată cu următoarea relație:

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{a}{r} + \frac{1}{4} \right) \quad [\text{mH}] \quad (31)$$

unde:

- μ_0 – permeabilitatea magnetică a vidului ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m);
- a – distanța axială dintre conductoare, în mm;
- r – raza conductorului, în mm;
- l – lungimea conductorului, în km.

Prin înlocuirea în relația (31) a valorii permeabilității magnetice a vidului μ_0 și trecând în logaritmi naturali, rezultă, pentru inductivitatea proprie aparentă specifică, o relație de forma:

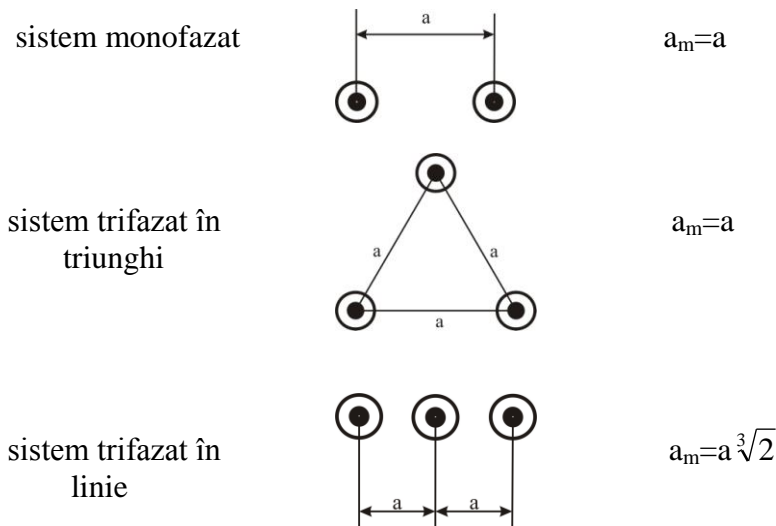
$$L_0 = \left(4,61 \lg \frac{2a}{d} + 0,5 \right) \cdot 10^{-4} \quad [\text{H/km}] \quad (32)$$

în care d reprezintă diametrul conductorului.

În cazul circuitelor simetrice conținând conductoare masive realizate din materiale neferomagnetice, valoarea medie a inductivității proprii aparente este aceeași pentru toate fazele și se calculează cu următoarea relație:

$$L_0 = \left(4,61 \lg \frac{2a_m}{d} + 0,5 \right) \cdot 10^{-4} \quad [\text{H/km}] \quad (33)$$

în care a_m reprezintă media geometrică a distanțelor dintre centrele conductoarelor, care se determină după cum urmează:



Inductivitatea proprie aparentă este mai mare cu circa 10% în cazul cablurilor care prezintă o armătură metalică în jurul ansamblului conductoarelor.

În cazul cablurilor monopolare prevăzute cu manta metalică (cupru, aluminiu, plumb), variația în timp a curentului I care parcurge conductorul de fază induce tensiuni electromotoare E , respectiv curenți de valori mari, în mantalele metalice ale cablurilor.

La cablurile monopolare cu manta din materiale plastice sau în cazul cablurilor multipolare ecranate sau prevăzute cu manta metalică care învelește toate fazele, aceste fenomene de inducție sunt ne semnificative pentru regimurile normale de funcționare.

Pentru cablurile monopolare ecranate, inductanța mutuală între conductorul de fază și ecran (mantaua metalică) este sensibil egală cu inductanța proprie a ecranului. În cazul unei dispoziții simetrice a conductoarelor, această inductanță mutuală specifică poate fi determinată cu o relație de forma:

$$M_0 = 4,6 \lg \frac{2a_m}{d_m} \cdot 10^{-4} \quad [\text{H/km}] \quad (34)$$

unde:

a_m – media geometrică a distanțelor dintre centrele conductoarelor, în mm;

d_m – diametrul mediu al ecranului, în mm.

Atunci când o linie electrică în cablu, de lungime l în km, realizată din cabluri monopolare ecranate, iar ecranele (mantalele metalice) sunt legate între ele, este parcursă, în regim normal de funcționare, de curentul I , pot exista două situații distincte și anume:

➤ Dacă ecranele sau mantalele metalice sunt legate la pământ, la o singură extremitate a liniei, atunci se obține o creștere a potențialului ecranului în raport cu pământul de valoare $E \cdot l = \omega \cdot M_0 \cdot I \cdot l$, în V și o diferență de potențial între ecrane având următoarele valori:

- $2 \cdot E \cdot l = 2 \cdot \omega \cdot M_0 \cdot I \cdot l$ [V], în regim monofazat;
- $\sqrt{3} \cdot E \cdot l = \sqrt{3} \cdot \omega \cdot M_0 \cdot I \cdot l$ [V], în regim trifazat.

➤ Dacă ecranele sau mantalele metalice sunt legate la pământ la ambele extremități ale liniei, atunci acestea sunt parcurse de un curent indus I_E , conform relației:

$$I_E = \frac{E}{\sqrt{R_{E_0}^2 + (\omega \cdot M_0)^2}} = \frac{I}{\sqrt{1 + \frac{R_{E_0}^2}{(\omega \cdot M_0)^2}}} \quad [\text{A}] \quad (35)$$

în care:

ω – pulsația curentului, în rad/s;

R_{E_0} – rezistența specifică a circuitului ecranelor (mantalelor metalice), la temperatura de serviciu, în Ω/km , ținând seama și de rezistența prizelor de pământ.

$$R_{E_0} = \rho \frac{1000}{S_E} \quad [\Omega/\text{km}] \quad (36)$$

unde:

S_E – secțiunea ecranului sau mantalei metalice, în mm^2 ;

ρ – rezistivitatea materialului din care este executat ecranul sau mantaua, în $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$.

În acest caz, curentul indus I_E circulă prin ecran (mantaua metalică) și crează un flux magnetic care este de sens opus celui produs de curentul I care circulă prin conductor, conducând, în felul acesta, la o diminuare cu $M_0 / \left[I + \frac{R_{E_0}^2}{(\omega \cdot M_0)^2} \right]$ a inductanței proprii aparente a conductorului.

Totodată, datorită apariției pierderilor de putere activă prin efect termic în ecran (mantaua metalică), având forma:

$$\Delta P_{E_0} = R_{E_0} \cdot I_E^2 = \frac{R_{E_0} \cdot I^2}{1 + \frac{R_{E_0}^2}{(\omega \cdot M_0)^2}} \quad [\text{W/km}] \quad (37)$$

are loc o creștere fictivă cu $\frac{R_{E_0}}{1 + \frac{R_{E_0}^2}{(\omega \cdot M_0)^2}}$ a rezistenței aparente a conductorului.

Ținând seama de considerentele anterioare, rezultă că reactanța proprie atașată unui conductor de fază, la frecvența de 50Hz, se poate determina după cum urmează:

- Dacă curenții induși în ecrane (mantale) sunt neglijabili:

$$X_0 = \omega \cdot L_0 = 0,14451g \frac{2a_m}{d} + 0,0157 \quad [\Omega/\text{km}] \quad (38)$$

- Dacă curenții induși în ecrane (mantale) nu sunt neglijabili (de exemplu cablurile monopolare cu manta metalică):

$$X_0 = \omega \cdot L_0 - \frac{\omega \cdot M_0}{\frac{R_{E_0}}{1 + (\omega \cdot M_0)^2}} = \omega \left(L_0 - \frac{M_0}{1 + \frac{R_{E_0}^2}{(\omega \cdot M_0)^2}} \right) \quad [\Omega/\text{km}] \quad (39)$$

Relațiile de calcul prezentate anterior permit determinarea unor valori medii pentru inductanța proprie aparentă, respectiv reactanța inductivă și în cazul cablurilor de construcție trifazată. Însă, conductoarele acestor cabluri pot să nu aibă formă circulară, iar dispoziția lor poate să fie asimetrică, ca de exemplu la cablurile de joasă tensiune realizate cu patru conductoare și, din aceste motive, stabilirea unor valori exacte ale acestor parametri se realizează fie pe bază de măsurători, fie prin utilizarea tabelor și diagramelor furnizate de firmele constructoare de cabluri, pentru fiecare secțiune a conductoarelor și tip constructiv de cablu. Pentru exemplificare, în Figura 11 sunt prezentate diagramele care permit determinarea reactanței inductive specifice pentru diferite tipuri constructive de cabluri de medie și joasă tensiune.

În lipsa acestor date, pentru cablurile de construcție normală, se pot utiliza în calculele practice următoarele valori medii ale reactanțelor specifice:

- $x_0 = 0,08 \div 0,10 \Omega/\text{km}$ – pentru cabluri trifazate cu tensiuni de 6÷15 kV;
- $x_0 = 0,10 \div 0,12 \Omega/\text{km}$ – pentru cabluri trifazate cu tensiuni de 20÷35 kV.

2.3. Conductanța liniilor electrice

Conductanța este parametrul transversal al liniilor electrice corespunzător pierderilor de putere activă transversale:

$$g_0 = \frac{\Delta P_0}{U_n^2} \quad [\text{S/km}] \qquad G = \frac{\Delta P}{U_n^2} \quad [\text{S}] \qquad (40)$$

în care:

g_0 – conductanța specifică a liniei, în S/km;

G – conductanța liniei, în S;

ΔP_0 – pierderile active transversale pe un km de linie, în kW/km;

ΔP – pierderile active transversale ale liniei, în kW.

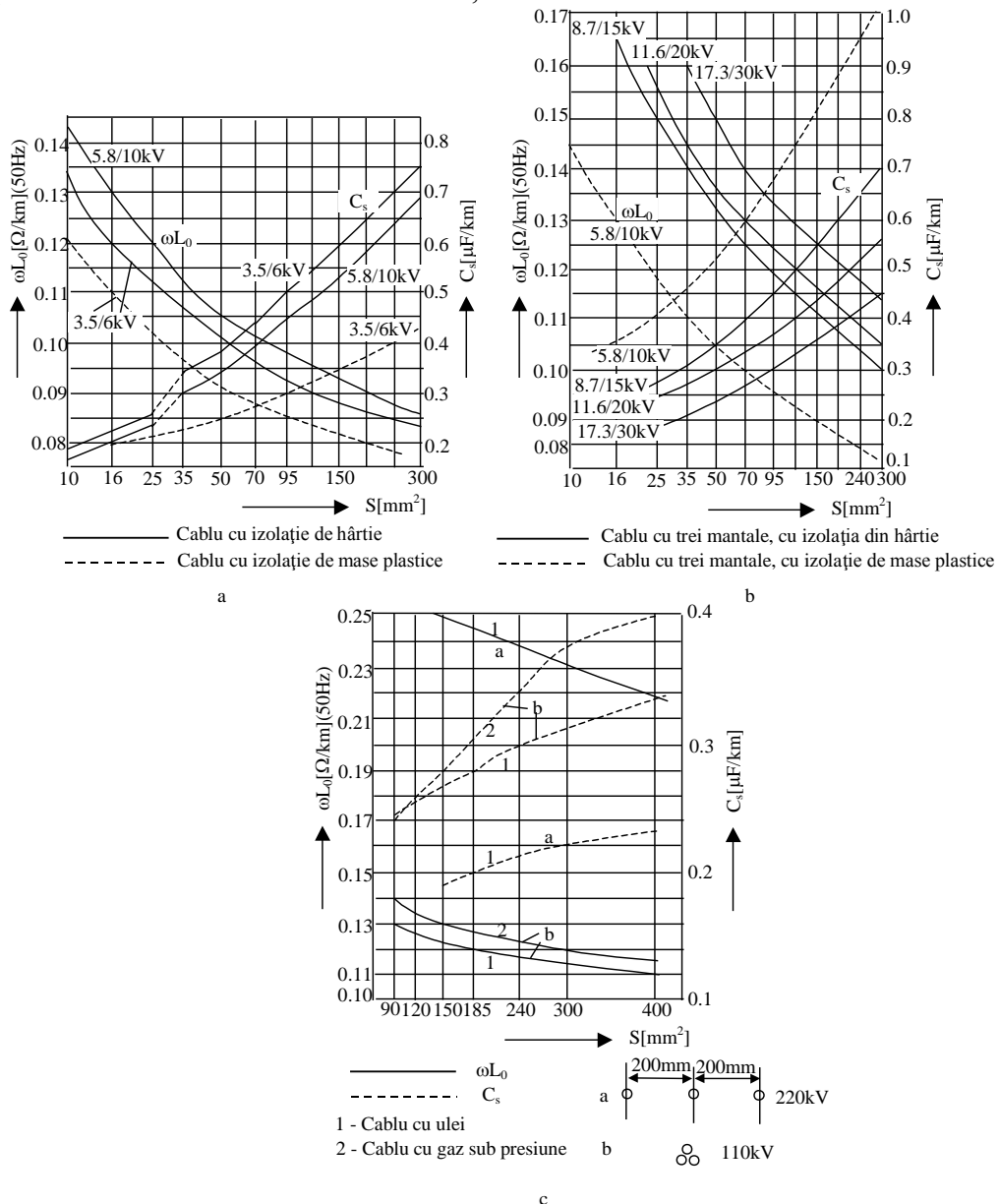


Figura 11 *Diagrame pentru calculul reactanței inductive specifice și a capacității de serviciu pentru diferite tipuri constructive de cabluri de medie și joasă tensiune*

2.3.1. Conductanța LEA

În cazul LEA, pierderile de putere activă transversale apar, pe de-o parte, datorită scurgerilor de curent prin izolație spre pământ, iar pe de altă parte, datorită fenomenului *corona*.

Scurgerile de curent spre pământ sunt cauzate de imperfecțiunea izolației conductoarelor în punctele de fixare a acestora pe stâlpi. Aceste pierderi transversale datorate imperfecțiunii izolației sunt mici, conducând la conductanțe specifice care variază între $2 \cdot 10^{-10} \div 2 \cdot 10^{-9}$ [S/km] și, din acest motiv, se pot neglija în calculele practice.

Fenomenul *corona* reprezintă o descărcare autonomă incompletă, care se produce la suprafața conductoarelor, sub forma unei coroane luminoase, fiind amorsată atunci când intensitatea câmpului electric la suprafața acestora depășește o valoare critică E_{cr} . Apariția fenomenului corona pe conductoarele LEA de înaltă și foarte înaltă tensiune conduce la creșterea pierderilor de putere activă transversale și este însoțită de o serie de efecte care influențează negativ funcționarea liniilor electrice.

Din acest motiv, sunt luate măsuri încă din faza de proiectare pentru a se evita apariția fenomenului corona pe conductoarele LEA. În acest scop, măsura adoptată în țara noastră constă în creșterea razei conductoarelor prin folosirea mai multor conductoare ce echipează o fază a liniei și anume conductoare fasciculare.

Având în vedere că pierderile active transversale datorate imperfecțiunii izolației sunt neglijabile, iar prin proiectare se adoptă măsuri pentru evitarea apariției fenomenului corona, în calculele practice conductanța LEA se consideră nulă ($g_0 = 0$; $G = 0$).

2.3.2 Conductanța liniilor electrice în cablu

În cablurile folosite la realizarea LEC apar pierderi de putere activă transversale datorate imperfecțiunii izolației, fenomenelor de ionizare care au loc în dielectricul cablurilor și ciclului de histerezis dielectric. Aceste pierderi sunt caracterizate de tangenta unghiului de pierderi ($tg\delta$), care reprezintă raportul dintre componenta activă și cea reactivă a curentului de încercare a cablului și ale cărei valori, pentru cabluri de înaltă tensiune, sunt cuprinse între limitele $0,002 \div 0,008$.

Pentru cabluri cu tensiuni nominale până la 20 kV, pierderile de putere transversale sunt mici și din acest motiv se neglijează la calculul liniilor. În cazul unor cabluri cu tensiuni de 110 kV sau 220 kV, pierderile de putere în dielectric au valori mai mari (Tabelul 3) și pot fi evaluate cu o relație de forma:

$$\Delta P_0 = \frac{0,000106 f U_0^2 n^2 \varepsilon_r \cos \theta}{K_G} 10^{-3} \text{ [kW/km]} \quad (41)$$

în care:

f – frecvența curentului, în Hz;

U_0 – valoarea efectivă a tensiunii pe fază, în kV;

n – numărul de conductoare ($n = 1$ pentru cabluri monofazate sau pentru cabluri trifazate ecranate);

ε_r – permitivitatea relativă a dielectricului;

$\cos \theta$ – factorul de putere al izolației (pentru unghiurile de pierderi δ de valori mici, întâlnite curent în practică, rezultă $\cos \theta \approx \sin \delta \approx tg \delta$);

K_G – factor geometric exprimat în funcție de capacitatea de serviciu a cablului C , prin relația:

$$K_G = \frac{0,0169 n \varepsilon_r}{C}$$

Valorile orientative ale tangentei unghiului de pierderi și ale pierderilor de putere în dielectric, pentru cabluri monofazate cu izolație de hârtie impregantă și răcire cu ulei

Tabelul 2.6

Tensiunea nominală	tg δ	Pierderi specifice în dielectric ΔP ₀
110	0,005	2
220	0,004	5

2.4. Susceptanța liniilor electrice

O linie electrică trifazată formează un sistem de condensatoare ce au drept armături conductoarele metalice ale liniei și pământul. Conductoarele unei astfel de linii prezintă capacități parțiale față de pământ (C_p) și capacități mutuale între faze (C_m), conform celor reprezentate în Figura 12.

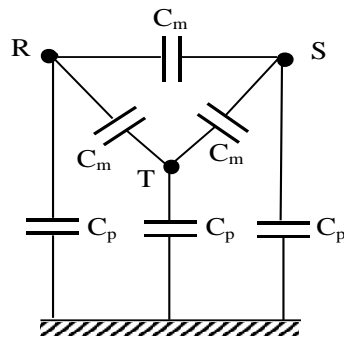


Figura 12. Linie electrică trifazată cu capacități față de pământ și între faze

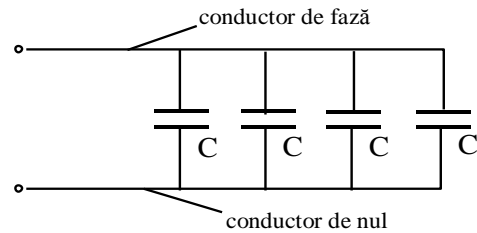


Figura 13. Schema electrică echivalentă monofazată

La întocmirea schemelor echivalente monofazate, pentru calculul regimurilor de funcționare simetrice, capacitatea atașată unei faze reprezintă suma capacităților parțiale pe care faza respectivă le prezintă în raport cu conductoarele celorlalte faze și cu pământul, conform celor reprezentate în Figura 13. Această capacitate poartă denumirea de capacitate de serviciu sau de lucru și poate fi interpretată ca fiind raportul dintre întreaga cantitate de electricitate ce determină liniile de câmp ce pleacă de la un conductor dat spre celelalte conductoare și spre pământ, și potențialul acestui conductor.

2.4.1. Susceptanța liniilor electrice aeriene

În cazul LEA trifazate simplu circuit, pe parcursul cărora s-a efectuat transpunerea conductoarelor, considerând dielectricul aer $\epsilon = \epsilon_0 = 1/4\pi \cdot 9 \cdot 10^9$ F/m, capacitatea de serviciu specifică pe un km de linie se determină cu o relație de forma:

$$c_0 = \frac{0,0242}{\lg \frac{D_m}{r}} \quad [\mu\text{F}/\text{km}] \quad (42)$$

Pentru frecvența de 50Hz, susceptanța capacitivă specifică atașată unei faze se determină cu:

$$b_0 = \omega \cdot c_0 = \frac{7,58}{\lg \frac{D_m}{r}} \cdot 10^{-6} \quad [\text{S}/\text{km}] \quad (43)$$

unde: r – raza conductorului;

$$D_m = \sqrt[3]{D_{RS} \cdot D_{ST} \cdot D_{TR}} \text{ - media geometrică a distanțelor dintre fazele circuitului de linie.}$$

În cazul LEA trifazate dublu circuit, pe parcursul cărora s-a efectuat transpunerea conductoarelor, pentru determinarea capacității de serviciu și a susceptanței capacitive, se utilizează următoarele relații practice de calcul:

$$c_0 = \frac{0,0242}{\lg \frac{D_m}{r} \cdot \frac{D_{m_1}}{D_{m_2}}} \quad [\mu\text{F/km}] \quad (44)$$

$$b_0 = \frac{7,58}{\lg \frac{D_m}{r} \cdot \frac{D_{m_1}}{D_{m_2}}} \cdot 10^{-6} \quad [\text{S/km}] \quad (45)$$

în care: D_m – media geometrică a distanțelor dintre fazele unui circuit al liniei;

D_{m_1} - media geometrică a distanțelor dintre fazele neomoloage ale celor două circuite ale liniei;

D_{m_2} - media geometrică a distanțelor dintre fazele omoloage ale celor două circuite ale liniei.

La LEA trifazate simplu sau dublu circuit realizate cu conductoare fasciculare, pentru determinarea capacității de serviciu și a susceptanței capacitive, se folosesc relațiile (42 ÷ 45), în care raza conductorului r este înlocuită cu raza medie echivalentă r_m a fasciculului de conductoare ce echiipează o fază a liniei.

2.4.2. Susceptanța liniilor electrice în cablu

Un cablu prezintă un sistem complex de capacități, denumite parțiale, între diferitele conductoare metalice, precum și între fiecare conductor și elementul luat ca potențial de referință, care poate fi mantaua metalică sau mediul exterior.

Din acest motiv, capacitatea aparentă de serviciu a unui cablu depinde de tipul constructiv al cablului, de prezența ecranelor, de materialul din care este executată armătura și rezultă din combinarea capacităților parțiale.

Pentru cabluri monofazate (Figura 14a) sau trifazate cu câmp radial, capacitatea de serviciu se calculează în același mod ca pentru un condensator format din doi cilindri, de lungime l , cu ajutorul următoarei relații:

$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{R}{r}} \quad (46)$$

unde: ϵ – permitivitatea dielectrică (constanta dielectrică) corespunzătoare învelișului izolant al cablului, în F/m;

r – raza conductorului și a statului semiconductor, în mm;

R – raza la exteriorul învelișului izolant, în mm.

Prin considerarea $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r = (1/4\pi 9 \cdot 10^9) \cdot \epsilon_r$ [F/m] și transformarea logaritmului natural în logaritm zecimal, capacitatea de serviciu specifică pe kilometru se poate evalua cu o relație de forma:

$$C_0 = \frac{0,0242 \cdot \epsilon_r}{\lg \frac{R}{r}} \quad [\mu\text{F/km}] \quad (47)$$

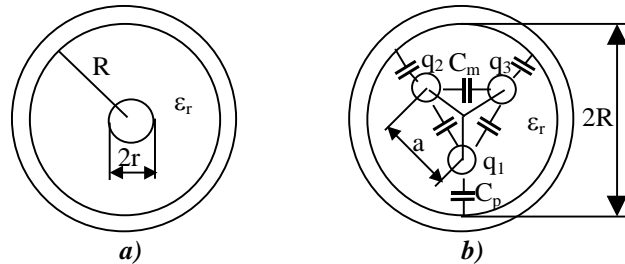


Figura 14. Schemele simplificate ale unui cablu
 a) monofazat cu câmp radial; b) trifazat fără câmp radial

În cazul cablurilor trifazate fără câmp radial (Figura 14b), capacitatea de serviciu se determină folosind ecuațiile Maxwell și metoda imaginilor electrice. În acest scop, se înlocuiește suprafața de potențial constant a învelișului de plumb sau de aluminiu, care înconjoară cele trei conductoare de fază, cu un sistem de sarcini q_1', q_2', q_3' care reprezintă imaginile sarcinilor q_1, q_2, q_3 în raport cu suprafața conductorului, astfel încât, în câmpul electric rezultat al sarcinilor q_i și al imaginilor q_i' , această suprafață să rămână echipotențială. Procesul de calcul este laborios și necesită adoptarea unor ipoteze simplificatoare. Conform metodologiei descrise, capacitatea de serviciu specifică, pentru cabluri trifazate fără câmp radial, se determină cu relația:

$$C_0 = \frac{0,0484 \cdot \epsilon_r}{\lg \frac{a^2(3R^2 - a^2)^3}{r^2(27R^2 - a^6)}} \quad [\mu\text{F}/\text{km}] \quad (48)$$

în care:

- r – raza conductorului și a stratului semiconductor, în mm;
- a – distanța dintre centrele conductoarelor, în mm;
- R – raza interioară a mantalei de protecție de plumb sau de aluminiu a conductoarelor, în mm;
- ϵ_r – permitivitatea dielectrică relativă corespunzătoare învelișului izolant al cablului.

În Tabelul 4 sunt prezentate valorile permitivității relative ϵ_r pentru diferite materiale izolante folosite la cabluri de medie și înaltă tensiune.

Valorile permitivității relative ϵ_r pentru cabluri de medie și joasă tensiune

Tabelul 4

Tipul cablului	ϵ_r
<ul style="list-style-type: none"> • Cabluri cu izolație de hârtie impregnată: <ul style="list-style-type: none"> - de tip solid cu impregnare totală, preimpregnat sau impregnat cu masă migratoare 	4,0
- cu ulei fluid la joasă presiune	3,3
- cu ulei fluid la înaltă presiune	3,5
- în tuburi sub presiune de ulei	3,7
- cu presiune externă de gaz	3,5
- cu presiune internă de gaz	3,1
<ul style="list-style-type: none"> • Cabluri cu izolația din alte materiale: <ul style="list-style-type: none"> - cauciuc butilic 	4,5
- policlorură de vinil	5,8
- polietilenă	2,3
- polietilenă reticulată	2,5

De menționat faptul că permitivitatea relativă variază în limite largi, în funcție de natura materialelor izolante, temperatură și frecvență. La cablurile cu izolația din policlorură de vinil, variațiile acestei constante sunt mai mari, pe când la cablurile cu izolație de hârtie impregnată sau din polietilenă, variațiile sunt mai mici, la valorile de temperatură pe care le ating cablurile în regimurile normale de funcționare.

În practică, capacitatea aparentă reală poate fi diferită sensibil de valoarea calculată cu ajutorul relațiilor indicate anterior, din cauza formei conductoarelor (de exemplu, conductoare în formă de sector), precum și a permitivității relative neuniforme a dielectricului conductoarelor (izolație, bandaje, mantale etc.).

Din această cauză, stabilirea unor valori precise pentru capacitățile aparente se poate realiza fie prin măsurători directe, fie cu ajutorul tabelelor și a diagramelor furnizate de firmele constructoare de cabluri, pentru fiecare secțiune a conductoarelor și tip constructiv de cablu, conform diagramelor reprezentate în Figura 11.

În curent alternativ, pentru frecvența de 50Hz, în funcție de tipul constructiv al cablului, susceptanța capacitivă specifică $B_0 = \omega \cdot C_0 = 2\pi \cdot f \cdot C_0$, în S/km, se determină folosind următoarele relații:

- *Cabluri monofazate sau trifazate cu câmp radial*

$$B_0 = \frac{7,58 \cdot \varepsilon_r}{\lg \frac{R}{r}} \cdot 10^{-6} \text{ [S/km]} \quad (49)$$

- *Cabluri trifazate fără câmp radial*

$$B_0 = \frac{15,16 \cdot \varepsilon_r}{\lg \frac{a^2(3R^2 - a^2)^3}{r^2(27R^2 - a^6)}} \cdot 10^{-6} \text{ [S/km]} \quad (50)$$

3. Descrierea programului de calcul *PAREL*

Programul de calcul *PAREL* permite determinarea parametrilor specifici ai liniilor electrice aeriene pentru diverse soluții constructive ale liniilor electrice, folosind relațiile de calcul prezentate în paragrafele anterioare lucrării.

Parametrii specifici ai liniilor – rezistența r_0 , inductivitatea l_0 , capacitatea c_0 , reactanța x_0 și susceptanța b_0 – se calculează, în cadrul programului, pentru fiecare fază în parte, atunci când pe parcursul liniei nu s-a efectuat transpunerea conductoarelor, iar în cazul liniilor pe parcursul cărora s-a efectuat transpunerea conductoarelor, programul calculează o valoare medie pentru fiecare parametru menționat anterior.

De asemenea, în cadrul acestui program, s-a prevăzut și posibilitatea calculului parametrilor specifici pentru liniile cu dublu circuit care funcționează cu un defazaj θ între tensiunile corespunzătoare celor două circuite ale liniei, conform diagramei fazoriale reprezentate în Figura 15.

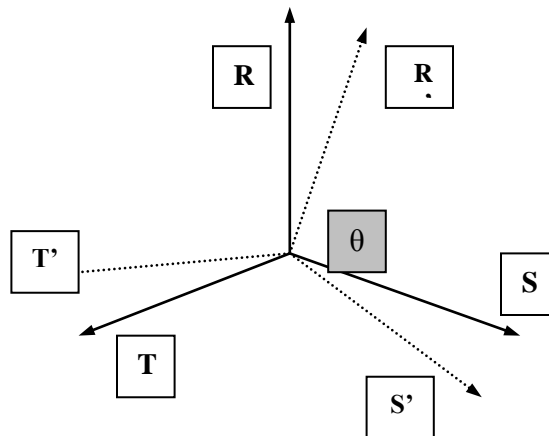


Figura 15. Diagrama fazorială a tensiunilor pentru LEA dublu circuit, cu defazaj θ între cele două circuite ale liniei

În Figura 16 este prezentată schema bloc a programului de calcul *PAREL*, schemă ce are la bază o structură pronunțat conversațională.

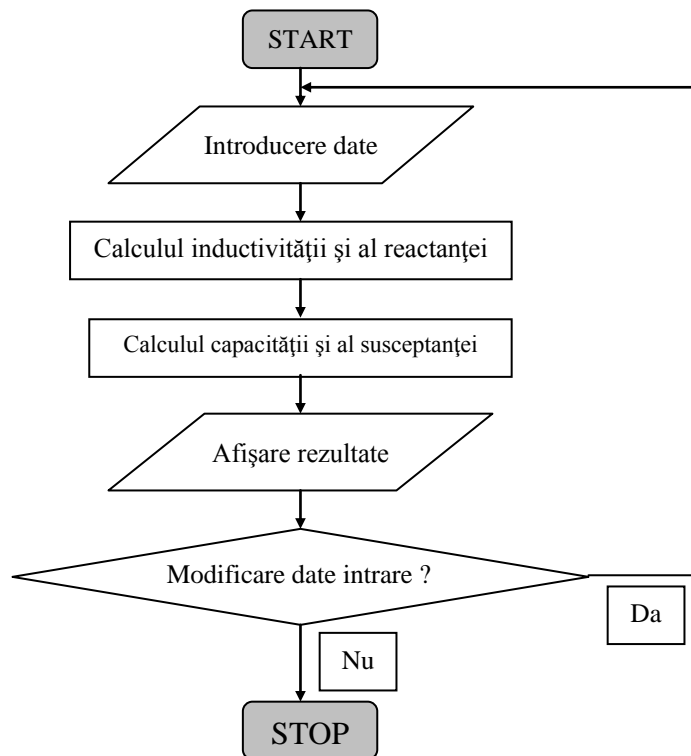


Figura 16. Schema bloc a programului *PAREL*

Datele de intrare necesare operării cu ajutorul programului *PAREL* se introduc sub formă modulară, în ferestre, de tipul celor prezentate în continuare. În urma completării datelor de intrare solicitate într-o anumită fereastră, programul prevede două opțiuni:

- *CONTINUARE* – atunci când datele introduse în fereastră sunt corecte.
- *CORECȚIE* – atunci când datele introduse în fereastră sunt parțial sau total eronate, programul permițând efectuarea corecțiilor necesare.

Într-o primă fereastră, reprezentată în Figura 17, se precizează numărul de circuite ale liniei electrice aeriene ce urmează a fi analizată. În următoarea fereastră (Figura 18), se cer coordonatele fiecărei faze ale liniei analizate, sub formă de abscisă și ordonată.

CALCULUL PARAMETRILOR UNEI LINII CU ? CIRCUITE	
CONTINUARE	CORECȚIE

Figura 17. *Fereastră care conține numărul de circuite ale liniei electrice aeriene analizate*

COORDONATE CORONAMENT		
FAZA	X(m)	Y(m)
1	---	---
2	---	---
3	---	---
CONTINUARE	CORECȚIE	

Figura 18. *Fereastră care conține coordonatele punctelor de suspendare a conductoarelor de fază ale liniei*

Caracteristicile conductorului sau conductoarelor care echipează o fază a liniei electrice analizate și anume secțiunea, tipul de conductor utilizat (normal sau întărit), tipul constructiv al fazei (fază unică sau scindată) sunt prezentate în fereastra din Figura 19. De menționat faptul că în situația în care se utilizează fază scindată (conductoare fasciculare), este necesar să fie precizată distanța dintre conductoarele care echipează aceeași fază a liniei (diametrul de scindare), precum și numărul de conductoare ale fasciculului de pe o fază a liniei.

CARACTERISTICI CONDUCTOR CIRCUITUL 1		
Folosim faza scindată	?	<D/N>
Nr. conductoare pe fază		---
Diametrul de scindare (mm)		---
Conductor: normal		(n)
întărit		(i)
SECȚIUNE (mm ²)	→	16
Avans secțiune:	← sau →	
Rezistența (Ω/km)		---
Diametrul echivalent (mm)		---
CONTINUARE		CORECTIE

Figura 19. Fereastră care conține caracteristicile conductorului sau conductoarelor care echipează o fază a liniei electrice analizate

În următoarele două module, reprezentate în Figura 20 a și b, pentru liniile cu două circuite, se solicită informații privind defazajele dintre cele două circuite ale liniei.

DEFAZAJE CIRCUITE	
Există defazaj între circuite ? <D/N>	
CONTINUARE	CORECȚIE

a)

DEFAZAJE CIRCUITE		
Nu mai există defazaje <A>		
CRC	CRC	Defazaj (grd)
?	---	---
CONTINUARE		CORECȚIE

b)

Figura 20. Fereastră care conține defazajele dintre circuitele liniei electrice analizate

După introducerea tuturor datelor de intrare și execuția programului de calcul *PAREL*, se afișează, tot sub formă modulară, în ferestre, parametrii specifici ai liniei electrice analizate, atât sub

formă complexă – parte reală și parte imaginară – cât și sub formă de modul, pentru fiecare circuit al liniei electrice. Atunci când pe parcursul liniei s-a efectuat transpunerea conductoarelor, se calculează și se afișează și valoarea medie a acestor parametri specifici. Afișarea parametrilor specifici calculați se realizează individual, pe rând, în module sau ferestre, a căror configurație este prezentată în cele ce urmează.

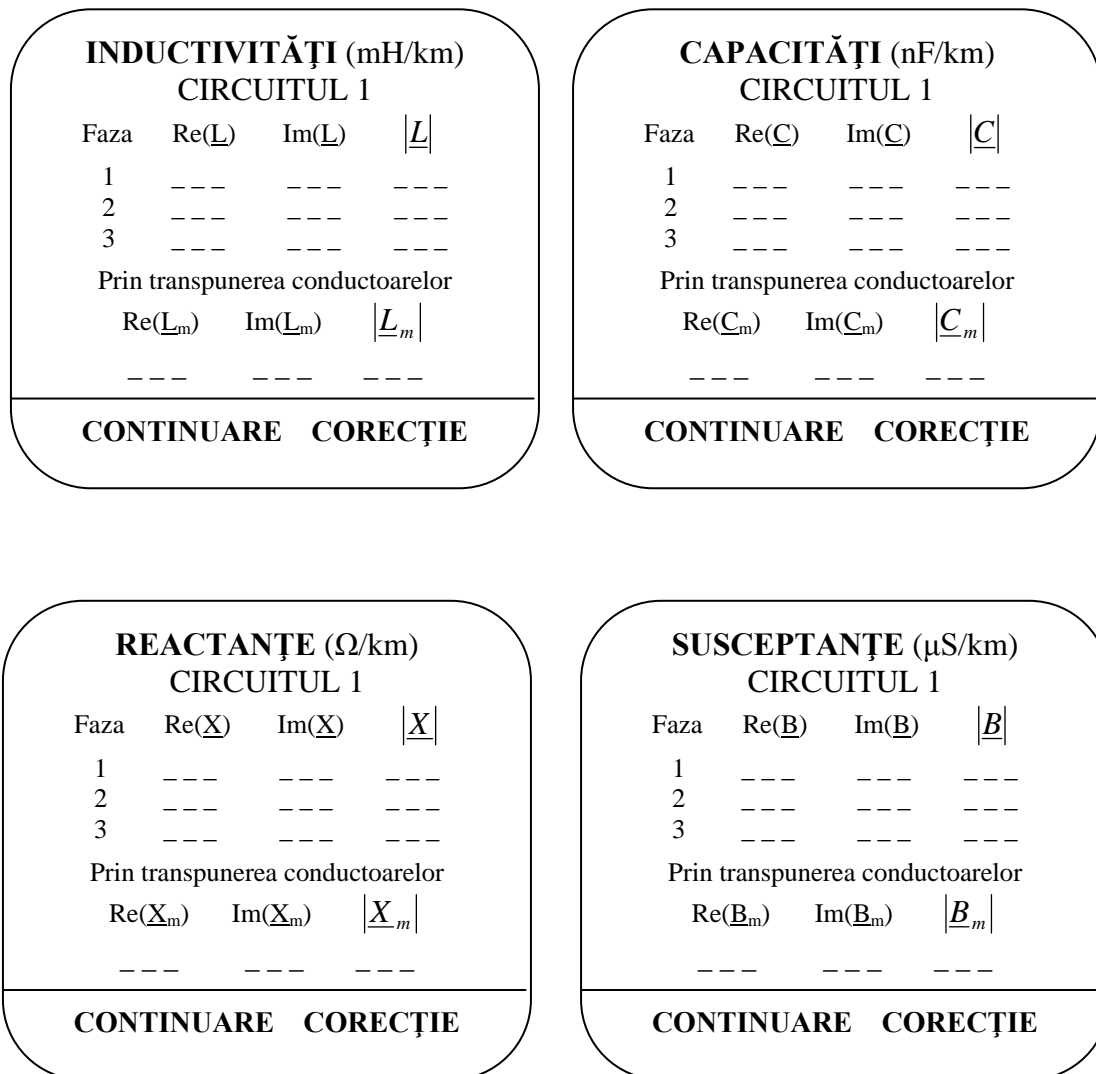


Figura 21. Afișarea, sub formă tabelară, a rezultatelor obținute privind parametrii specifici ai liniilor electrice aeriene, folosind programul PAREL

Dacă se dorește modificarea anumitor date de intrare, programul de calcul *PAREL* permite această, prin intermediul unui nou modul de tipul celui reprezentat în Figura 22.

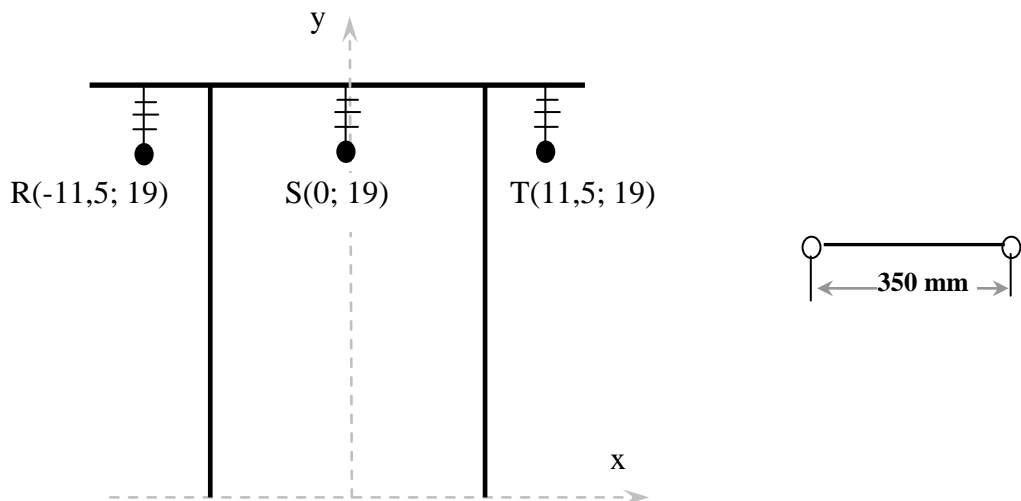
OPȚIUNI RELUARE		
1. Modificări în coordonatele coronamentului		?
2. Modificări în caracteristicile conductorului		—
3. Modificări în defazajele circuitelor		—
4. Reinițializare		—
Confirmare – 1		Infirmare - 0

Figura 22. Fereastră pentru modificarea unor date de intrare

În funcție de opțiunile din fereastra reprezentată în Figura 22, programului de calcul i se cere să revină la unul din modelele anterioare, cu scopul introducerii de alte date de intrare în câmpurile vizate de modificare, ulterior efectuându-se un nou calcul al parametrilor specifici ai liniei analizate, urmat de afișarea noilor valori ale acestora.

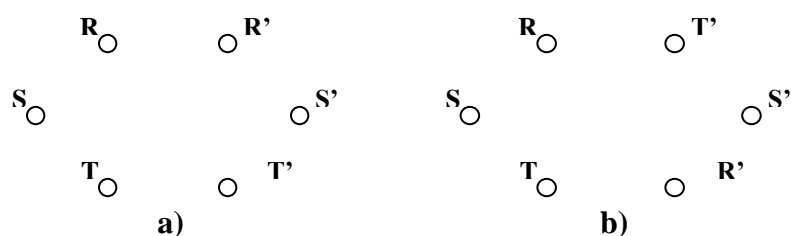
4. Modul de desfășurare a lucrării

- Studenții sau utilizatorii trebuie să dovedească înțelegerea și însușirea relațiilor practice de calcul privind parametrii specifici ai liniilor electrice aeriene, precum și a modului de utilizare a programului de calcul *PAREL*.
- Folosind programul de calcul *PAREL*, se cere să se calculeze parametrii electrici specifici pentru o linie electrică aeriană cu tensiunea nominală de 400 kV, simplu circuit, echipată cu două conductoare pe fază, fiecare având secțiunea de 450 mm^2 , realizate din oțel-aluminiu, de construcție normală și dispuse la o distanță de 350 mm unul față de celălalt. Coronamentele stâlpilor portali folosiți la realizarea liniei, precum și coordonatele punctelor de suspendare a conductoarelor sunt indicate în următoarea figură.



- Prin utilizarea aceluiași program de calcul *PAREL*, se cere calcularea parametrilor specifici pentru două linii electrice aeriene de 110 kV, respectiv 220 kV, cu dublu circuit. Calculul parametrilor specifici se va realiza în două ipoteze de dispunere a fazelor celor două circuite ale liniilor – cu și fără defazaj între cele două circuite – conform celor reprezentate în figura următoare.

Caracteristicile conductoarelor folosite, precum și coronamentul stâlpilor utilizați la realizarea liniilor respective vor fi selectate, de către utilizator, din datele cuprinse în anexa care însoțește lucrarea.



- În final, în urma efectuării calculului parametrilor specifici cu ajutorul programului de calcul *PAREL*, pentru diverse variante constructive ale liniilor electrice aeriene, se cere interpretarea rezultatelor obținute.

Anexă

Pe baza informațiilor cuprinse în normativele și standardele în vigoare din țara noastră, precum și din literatura de specialitate, în cadrul acestei anexe sunt prezentate date referitoare la: caracteristicile electrice și mecanice ale conductoarelor monometalice multifilare din aluminiu și aliaje de aluminiu, precum și caracteristicile conductoarelor de oțel; caracteristicile electrice și mecanice ale conductoarelor bimetalice multifilare din aluminiu – oțel, precum și a celor din aluminiu – aliaje de aluminiu; rezistențele și reactanțele liniilor electrice aeriene cu conductoare de aluminiu și aluminiu-oțel normale/întărite; susceptanța capacitivă a liniilor electrice aeriene cu conductoare din aluminiu – oțel; inductivitatea și reactanța inductivă specifică a cablurilor cu izolație de hârtie cu manta cu patru conductoare, respectiv cabluri în manta cu trei conductoare de joasă, medie și înaltă tensiune; variația rezistenței specifice în curent continuu a conductoarelor de cupru și aluminiu în funcție de temperatura conductorului; variante constructive de stâlpi utilizați în țara noastră la realizarea liniilor electrice trifazate cu tensiunea nominală de 20 kV, 110 kV, 220 kV și 400 kV.