

## PROGRAM DE CALCUL PENTRU DETERMINAREA PARAMETRILOR CARACTERISTICI AI LINIILOR ELECTRICE LUNGI DE TRANSPORT AL ENERGIEI ELECTRICE

### 1. Introducere

Performanțele liniilor lungi de transport al energiei electrice pot fi apreciate cu ajutorul unor parametri caracteristici, dintre care pot fi menționați următorii:

$\underline{\gamma}$  - constanta complexă de propagare;

$\lambda$  - lungimea de undă a undelor electromagnetice care se propagă prin linie;

$\underline{Z}_c$  - impedanța caracteristică a liniei;

$P_{nat}$  - puterea naturală.

În cele ce urmează, se vor defini matematic parametrii caracteristici anterior menționați, indicându-se semnificațiile lor fizice și modul de calcul al acestora, în funcție de parametrii specifici ai liniilor de transport al energiei electrice ( $r_0$ ,  $x_0$ ,  $g_0$  și  $b_0$ ).

### 2. Parametrii caracteristici ai liniilor electrice lungi de transport al energiei electrice

#### 2.1. Constanta complexă de propagare

Constanta complexă de propagare caracterizează fenomenul de propagare a undelor electromagnetice de tensiune și curent pe liniile electrice lungi de transport al energiei electrice și se definește prin intermediul următoarei expresii:

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{z}_0 \cdot \underline{y}_0} = \sqrt{(r_0 + jx_0) \cdot (g_0 + jb_0)} \quad (1)$$

Fiind o mărime complexă, constanta complexă de propagare se poate scrie sub următoarea formă:

$$\underline{\gamma} = \alpha + j\beta \quad (2)$$

unde:

$\alpha$  - constanta de atenuare a undelor electromagnetice de curent și tensiune ce se propagă pe linie, în Np/km;

$\beta$  - constanta de fază a undelor electromagnetice care se propagă pe linie, în rad/km.

Prin folosirea metodei algebrice în vederea determinării constantelor  $\alpha$  și  $\beta$ , în funcție de parametrii specifici ai liniilor electrice, se obțin următoarele expresii de calcul:

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{(r_0^2 + x_0^2) \cdot (g_0^2 + b_0^2)} + (r_0 \cdot g_0 - x_0 \cdot b_0)} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{(r_0^2 + x_0^2) \cdot (g_0^2 + b_0^2)} - (r_0 \cdot g_0 - x_0 \cdot b_0)} \quad (4)$$

Prin adoptarea următoarelor notații privind impedanța specifică  $\underline{Z}_o$ , admitanța specifică  $\underline{Y}_o$  și constanta complexă de propagare  $\underline{\gamma}$ :

$$\begin{aligned} \underline{z}_o &= r_o + j b_o = z_o \left| \underline{\Psi} \right. \\ \underline{y}_o &= g_o + j b_o = y_o \left| \underline{\Psi}' \right. ; \\ \underline{\gamma} &= \sqrt{z_o \cdot y_o} = \gamma \left| \frac{\underline{\Psi} + \underline{\Psi}'}{2} \right. \end{aligned}$$

și prin aplicarea metodei trigonometrică, se obțin următoarele expresii pentru determinarea constantelor  $\alpha$  și  $\beta$ :

$$\alpha = \sqrt[4]{(r_o^2 + x_o^2) \cdot (g_o^2 + b_o^2)} \cdot \cos \frac{\Psi + \Psi'}{2} \quad (5)$$

$$\beta = \sqrt[4]{(r_o^2 + x_o^2) \cdot (g_o^2 + b_o^2)} \cdot \sin \frac{\Psi + \Psi'}{2} \quad (6)$$

unde:

$\Psi = \arctg \frac{x_o}{r_o}$  - argumentul impedanței specifice a liniei electrice;

$\Psi' = \arctg \frac{b_o}{g_o}$  - argumentul admitanței specifice liniei electrice.

În Tabelul 1 sunt prezentate valorile orientative ale constantelor  $\alpha$  și  $\beta$  pentru liniile de transport al energiei electrice, în variantele aeriană și, respectiv, în cablu.

**Valorile orientative ale constantelor de atenuare și de fază pentru liniile electrice aeriene și în cablu**

**Tabelul 1**

Linii aeriene	Linii în cablu
$\alpha = \frac{r_o}{560 \dots 840} Np / km$ ( $U \geq 220 kV$ ) ( $U \leq 220 kV$ )	$\alpha = \frac{r_o}{60 \dots 130} Np / km$ ( $\text{cabluri trifazate}$ ) ( $\text{cabluri monofazate}$ )
$\beta = 1,05 \cdot 10^{-3} rad / km$	$\beta = (2,08 \dots 2) 10^{-3} rad / km$

## 2.2. Lungimea de undă a undelor electromagnetice ce se propagă pe linie

Relația existentă între viteza de propagare a undelor electromagnetice ( $v$ ) pe linie și lungimea de undă a acestora ( $\lambda$ ) este de forma:

$$v = \lambda \cdot f = \frac{\lambda}{T} \quad (7)$$

Având în vedere expresia vitezei de propagare ( $v$ ) funcție de constanta de fază ( $\beta$ ) și pulsația undelor ( $\omega$ ), se obține următoarea expresie de calcul pentru lungimea de undă a undelor electromagnetice care se propagă prin linie:

$$\lambda = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{\omega}{f} = \frac{1}{\beta} \cdot \omega T \quad (8)$$

Pentru frecvența de 50 Hz, lungimea de undă  $\lambda$ , ce caracterizează propagarea undelor electromagnetice prin linia lungă de transport fără pierderi longitudinale și transversale ( $r_0=0$ ,  $g_0=0$ ), este dată de următoarea relație:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\sqrt{x_0 \cdot b_0}} = \frac{6 \cdot 10^6}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}} \quad (9)$$

unde:

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

$\epsilon_0 = 1/4\pi \cdot 9 \cdot 10^9$  F/m – permitivitatea vidului;

$\mu$ ,  $\mu_r$  – permeabilitatea magnetică și, respectiv, permeabilitatea magnetică relativă a materialului din care este executat conductorul;

$\epsilon$ ,  $\epsilon_r$  – permitivitatea și respectiv permitivitatea relativă a dielectricului.

În cazul liniilor electrice aeriene, pentru care  $\epsilon_r = \mu_r = 1$ , lungimea de undă are valoarea  $\lambda = \lambda_0 = 6000$  km. Pentru liniile în cablu,  $\lambda = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_r}$ , iar la cablurile cu izolație de PVC, permitivitatea electrică relativă variază între limitele  $\epsilon_r = 2.25 \div 3.75$  și lungimea de undă are valori cuprinse între 3100 și 4000 km.

În cazul liniilor electrice cu pierderi, se poate defini o lungime de undă echivalentă, folosind următoarea expresie matematică de calcul:

$$\lambda = \lambda_0 \sqrt{\sin \Psi \cdot \sin \Psi'} \quad (10)$$

### 2.3. Impedanța caracteristică

Acest parametru caracteristic al liniilor electrice lungi de transport al energiei electrice se definește cu ajutorul relației următoare:

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{\underline{z}_0}{\underline{y}_0}} = \sqrt{\frac{r_0 + jb_0}{g_0 + jb_0}} = Z_c + jZ_c' \quad (11)$$

Folosind notațiile  $\underline{z}_0 = r_0 + jb_0 = z_0 | \underline{\Psi}$  și  $\underline{y}_0 = g_0 + jb_0 = y_0 | \underline{\Psi}'$  și prin aplicarea metodei trigonometrice în vederea determinării părții reale  $Z_c$  și, respectiv, a părții imaginare  $Z_c'$  ale impedanței caracteristice, se obțin următoarele expresii de calcul în funcție de parametrii electrice specifici ai liniilor:

$$Z_c = \sqrt{\frac{r_0^2 + x_0^2}{g_0^2 + b_0^2}} \cdot \cos \frac{\Psi - \Psi'}{2} \quad (12)$$

$$Z_c' = \sqrt[4]{\frac{r_0^2 + x_0^2}{g_0^2 + b_0^2}} \cdot \sin \frac{\Psi - \Psi'}{2} \quad (13)$$

Deoarece semidiferența argumentelor  $\frac{\Psi - \Psi'}{2}$  are valori mici, care tind către 0, partea imaginară  $Z_c'$  a impedanței caracteristice este neglijabilă, predominantă fiind partea reală  $Z_c$ .

În Tabelul 2 este prezentat ordinul de mărime al impedanței caracteristice, atât pentru liniile electrice aeriene, cât și pentru cele în cablu.

**Valorile orientative ale impedanței caracteristice pentru liniile electrice aeriene și în cablu**

**Tabelul 2**

<b>Linii aeriene</b>	<b>Linii în cablu</b>
$ \underline{Z}_c  = 280 \dots 400 \ \Omega$ ( $U \geq 220 \text{ kV}$ ) ( $U < 220 \text{ kV}$ )	$ \underline{Z}_c  = 30 \dots 65 \ \Omega$ ( <i>cabluri trifazate</i> ) ( <i>cabluri monofazate</i> )

Semnificația fizică a impedanței caracteristice asociate unei linii electrice rezultă din analiza fenomenului de propagare prin linie a undelor de tensiune și de curent, atunci când linia este închisă pe un consumator a cărui impedanță este egală cu impedanța caracteristică a liniei. În acest caz, prin linie se vor propaga numai undele incidente de curent și de tensiune, undele reflectate fiind suprimate, fapt ce determină creșterea randamentului liniei prin ameliorarea condițiilor de propagare a undelor electromagnetice prin aceasta.

**2.4. Puterea naturală**

Prin definiție, puterea aparentă complexă cerută de un consumator, a cărui impedanță este egală cu impedanța caracteristică a liniei, se numește *putere naturală caracteristică* și, pentru o singură fază a circuitului, se evaluează cu următoarea relație:

$$\underline{S}_{2c,0} = \underline{U}_2 \cdot \underline{I}_2^* = \underline{U}_2 \cdot \frac{\underline{U}_2^*}{\underline{Z}_c^*} \quad (14)$$

Dacă la consumator se absoarbe o putere aparentă egală cu puterea aparentă caracteristică, atunci, printr-o secțiune oarecare a liniei, la distanța  $x$  de capătul liniei, puterea aparentă complexă vehiculată este de forma:

$$\underline{S}_{c,0}(x) = \underline{S}_{2c,0} \cdot e^{2\alpha x} \quad (15)$$

Impedanța caracteristică a liniei având un caracter preponderent activ, termenul dominant al puterii aparente complexe este puterea activă caracteristică:

$$P_{2c,0} = \frac{U_2^2}{Z_c} \cdot \cos \xi \quad (16)$$

unde  $\xi$  reprezintă argumentul impedanței caracteristice complexe,  $\underline{Z}_c$ .

Printr-un raționament similar cu cel ce a stat la baza expresiei puterii aparente complexe printr-o secțiune oarecare a liniei, se poate construi o relație de calcul asemănătoare și pentru puterea activă caracteristică, de forma:

$$P_{c,0}(x) = P_{2c,0} \cdot e^{2\alpha x} \quad (17)$$

Deoarece, în cazul liniilor electrice lungi de transport al energiei electrice, constanta de atenuare este foarte mică, puterea activă  $P_{c,0}(x)$  variază puțin în lungul liniei, valoarea sa fiind, în orice punct intermediar de pe linie, foarte aproape de cea a puterii active caracteristice absorbită de consumator.

În cazul liniilor *fără pierderi* longitudinale și transversale, constanta de atenuare este nulă ( $\alpha = 0$ ) și, prin urmare, impedanța caracteristică are un caracter rezistiv ( $\xi = 0$ ), astfel încât puterea activă  $P_{c,0}(x)$  își conservă valoarea de-a lungul liniei, devenind o constantă caracteristică ce poartă denumirea de *putere naturală*, evaluată cu următoarea relație:

$$P_{nat,0} = \frac{U_2^2}{Z_c} \quad (18)$$

Deoarece, la transferul puterii naturale, tensiunea rămâne constantă pe tot parcursul liniei, dacă se admite că această tensiune este egală cu tensiunea nominală a liniei, puterea naturală pe o fază este dată de relația:

$$P_{nat,0} = \frac{U_{n,0}^2}{Z_c} \quad (19)$$

iar puterii naturale trifazate îi corespunde următoarea expresie de calcul:

$$P_{nat} = 3 \cdot P_{nat,0} = \frac{U_n^2}{Z_c} \quad (20)$$

unde:

$U_{n,0}$  – tensiunea nominală a liniei, valoare de fază;

$U_n$  – tensiunea nominală a liniei între faze;

$Z_c$  – modulul impedanței caracteristice a liniei.

Puterea naturală este un parametru deosebit de important, cu ajutorul căruia se poate aprecia capacitatea de transport a liniilor electrice lungi. În Tabelul 3 sunt prezentate valorile puterilor naturale corespunzătoare liniilor electrice aeriene și în cablu, la diverse valori ale tensiunii nominale de funcționare.

### *Puterile naturale ale liniilor lungi de transport al energiei electrice*

**Tabelul 3**

<b>Tensiunea nominală [kV]</b>		<b>110</b>	<b>220</b>	<b>400</b>	<b>750</b>
Puterea naturală trifazată [MW]	Linii aeriene	30	120	400÷500	1800
	Linii în cablu	300	1200÷1400	2000÷2500	4000÷5000

## 3. Descrierea programului de calcul *PARCAR*

Programul de calcul *PARCAR* permite determinarea parametrilor caracteristici ai liniilor lungi de transport al energiei electrice, în funcție de parametrii specifici ai acestor linii, folosind expresiile de calcul prezentate în paragrafele anterioare lucrării. Cu ajutorul acestui program, pot fi calculate valorile parametrilor caracteristici ai liniilor electrice – *constanta complexă de propagare*, *impedanța caracteristică*, *puterea naturală* – pentru diverse soluții constructive ale liniilor lungi de transport al energiei electrice. De asemenea, în cadrul acestui program, s-a prevăzut și posibilitatea calculului parametrilor caracteristici pentru liniile lungi de transport al energiei electrice cu dublu circuit, care funcționează cu un defazaj  $\theta$  între tensiunile corespunzătoare celor două circuite ale liniei.

În Figura 1 este prezentată schema bloc a programului de calcul *PARCAR*, program al cărui mecanism are o structură pronunțat conversațională, fiind ușor de utilizat.

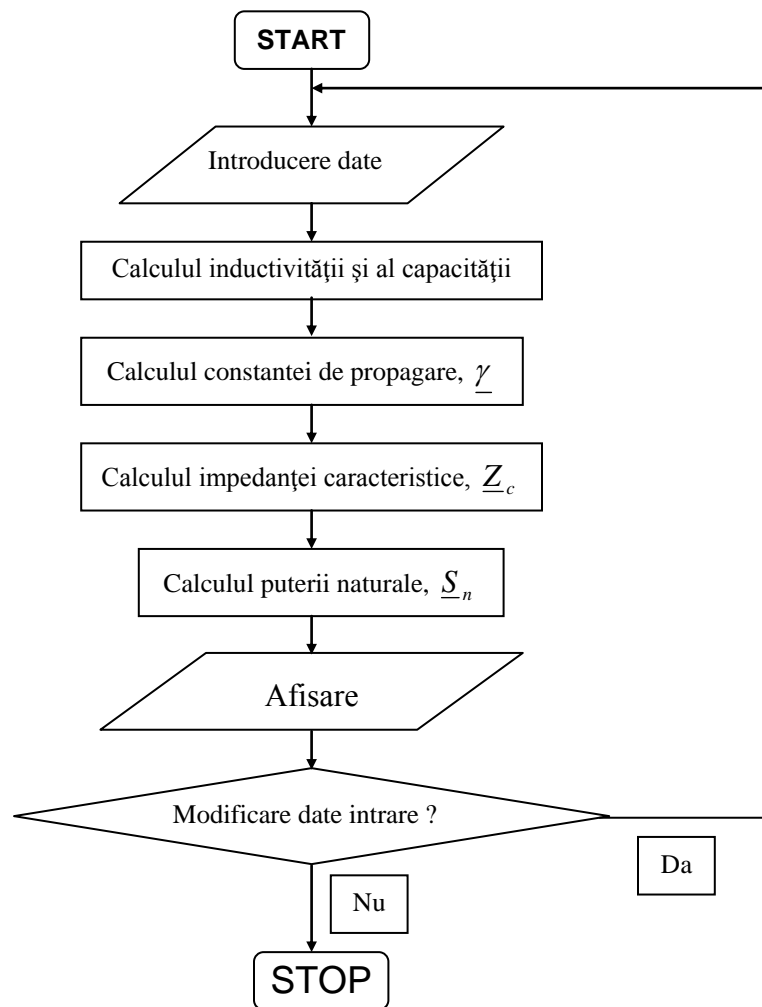


Figura 1. Schema bloc a programului de calcul *PARCAR*

Datele de intrare necesare operării cu ajutorul programului *PARCAR* 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 2, se precizează numărul de circuite ale liniei electrice aeriene ce urmează a fi analizată. În următoarea fereastră (Figura 3), se cer coordonatele, sub formă de abscisă și ordonată, ale punctelor de suspendare a conductoarelor fiecărei faze pe coronamentul stâlpilor utilizați la construcția liniei.

<b>CALCULUL PARAMETRILOR UNEI LINII CU ? CIRCUITE</b>	
<b>CONTINUARE</b>	<b>CORECȚIE</b>

**Figura 2.** Fereastră care conține numărul de circuite ale liniei electrice analizate

<b>COORDONATE CORONAMENT</b>		
FAZA	X(m)	Y(m)
1	---	---
2	---	---
3	---	---
<b>CONTINUARE</b>		<b>CORECȚIE</b>

**Figura 3.** Fereastră care conține coordonatele punctelor de suspendare a conductoarelor de fază ale liniei

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

**Figura 4.** Fereastră care conține caracteristicile conductorului sau conductoarelor care echipează o fază a liniei electrice analizate

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 4. De menționat faptul că în situația în care se utilizează fază scindată (conductoare fasciculare), este necesar să fie precizate distanța dintre conductoarele care echipează aceeași fază a liniei (diametrul de scindare), precum și numărul de conductoare ale fascicolului de pe o fază a liniei.

În următoarele două module, reprezentate în Figura 5a și b, pentru liniile cu două circuite, se solicită informații privind defazajele dintre cele două circuite ale liniei.

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

a)

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

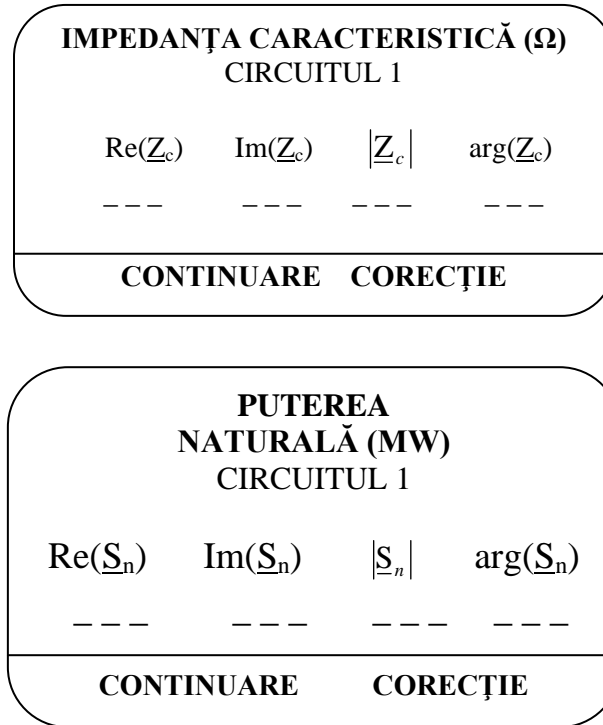
b)

**Figura 5. Fereastră care conține defazajele dintre circuitele liniei electrice analizate**

După introducerea tuturor datelor de intrare și execuția programului de calcul *PARCAR*, rezultatele sunt afișate individual, în ferestre, pentru fiecare parametru caracteristic al liniei analizate, atât sub formă complexă – parte reală și parte imaginară – cât și sub formă de modul și argument. Ferestrele în care sunt afișate individual valorile parametrilor caracteristici sunt prezentate în continuare.

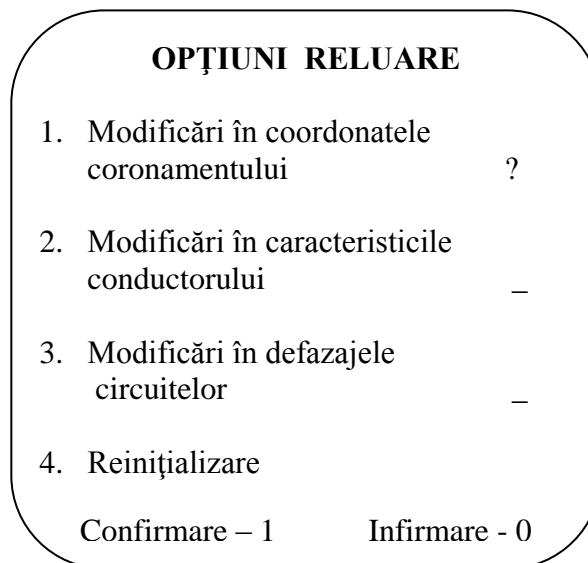
<b>CONSTANTA COMPLEXĂ DE PROPAGARE CIRCUITUL 1</b>	
Constanta de atenuare --- (Np/km)	
Constanta de fază --- (rad/km)	
<b>CONTINUARE</b>	<b>CORECȚIE</b>





**Figura 6. Afișarea individuală a rezultatelor obținute privind parametrii caracteristici ai liniilor lungi de transport al energiei electrice, folosind programul PARCAR**

Dacă se dorește modificarea anumitor date de intrare, programul de calcul *PARCAR* permite aceasta, prin intermediul unui modul de tipul celui reprezentat în Figura 7.



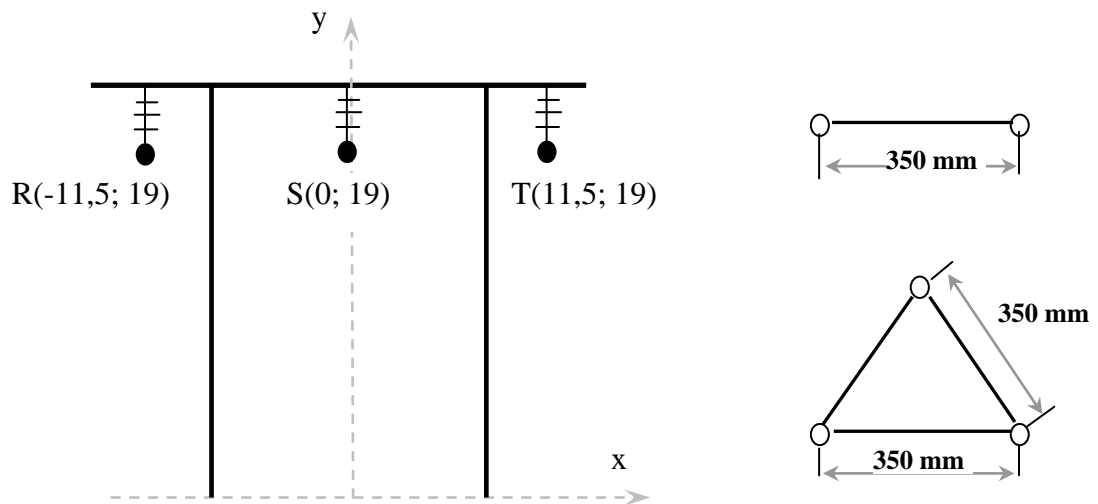
**Figura 7. Fereastră pentru modificarea unor date de intrare**

În funcție de opțiunile din fereastra reprezentată în Figura 7, programului de calcul i se cere să revină la unul din modulele anterioare, cu scopul introducerii de alte date în câmpurile vizate de

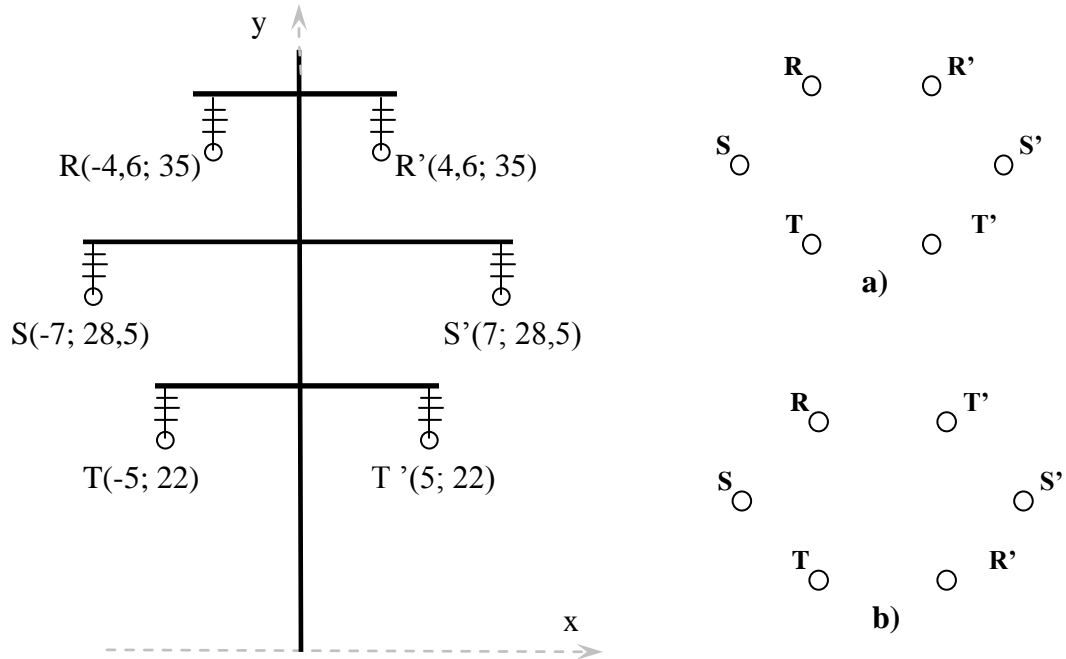
modificări, ulterior executându-se un nou calcul al parametrilor caracteristici, urmat de afișarea noilor valori ale acestora.

## 4. Modul de desfășurare a lucrării

- Studenții sau utilizatorii trebuie să certifice înțelegerea semnificațiilor fizice ale parametrilor caracteristici ai liniilor lungi de transport al energiei electrice (constanta complexă de propagare, impedanța caracteristică, lungimea de undă, puterea naturală), relațiile lor de calcul în funcție de parametrii specifici ai liniilor electrice, precum și modul de utilizare a programului de calcul *PARCAR*.
- Folosind programul de calcul *PARCAR*, se cere să se calculeze parametrii caracteristici pentru o linie lungă de transport al energiei electrice cu tensiunea nominală de 400 kV, simplu circuit. În ceea ce privește echiparea conductoarelor de fază ale liniei, se vor considera două variante distincte și anume: două conductoare pe fază ( $2 \times 450 \text{ mm}^2$ ), respectiv trei conductoare pe fază ( $3 \times 450 \text{ mm}^2$ ), dispuse la o distanță de 350 mm unul față de celălalt. Conductoarele sunt realizate din oțel-aluminiu, de construcție normală. Coronamentele stâlpilor portalii folosiți la realizarea liniei de transport al energiei electrice, precum și coordonatele punctelor de suspendare a conductoarelor de fază sunt indicate în următoarea figură.



- Să se determine parametrii caracteristici folosind programul *PARCAR*, pentru o linie lungă de transport al energiei electrice cu tensiunea nominală de 220 kV, dublu circuit, în două ipoteze de dispunere a fazelor celor două circuite ale liniei de transport. Linia electrică se consideră echipată cu un singur conductor pe fază, din oțel-aluminiu, de construcție normală, cu secțiunea de  $450 \text{ mm}^2$ . Coronamentele stâlpilor folosiți la realizarea liniei de transport al energiei electrice, precum și coordonatele punctelor de suspendare a conductoarelor de fază ale celor două circuite sunt prezentate în următoarea figură. De asemenea, în aceeași figură, se precizează modul de dispunere a conductoarelor de fază ale celor două circuite ale liniei, pentru variantele de calcul propuse spre analiză.



- În urma efectuării calculului parametrilor caracteristici cu ajutorul programului *PARCAR*, pentru diverse variante constructive ale liniilor de transport al energiei electrice de înaltă și foarte înaltă tensiune (220 kV, 400 kV), se cere interpretarea rezultatelor obținute.