

STUDIUL REPARTITIEI TENSIUNII INALTE PE LANTURI DE IZOLATOARE CU AJUTORUL UNUI MODEL FIZIC DE JOASA TENSIUNE

1. NOTIUNI TEORETICE:

Principalul criteriu distinctiv al aparatelor electrice de inalta tensiune fata de cele de joasa tensiune, il constituie dimensionarea izolatiei. Pentru aparatele de inalta tensiune si mai ales la cele de 110kv si peste 110kv dimensionarea fiabila a izolatiei in contextul unui aspect economic acceptabil, ridica probleme deosebite. Printre datele cuprinse in aceasta problematica se pot enumera:

- tensiunile (nivelele) de tinere
- valorile permitivitatilor pentru elementele electroizolante inseriate
- repartitia tensiunii pe elementele electroizolante inseriate, corelata cu fenomenele de descarcari electrice partiale s.a..

Pentru aparatele de joasa tensiune se impune respectarea anumitor distante (intervale) minime intre punctele aflate sub tensiune, asigurandu-se astfel nivelul (tensiunea) de tinere.

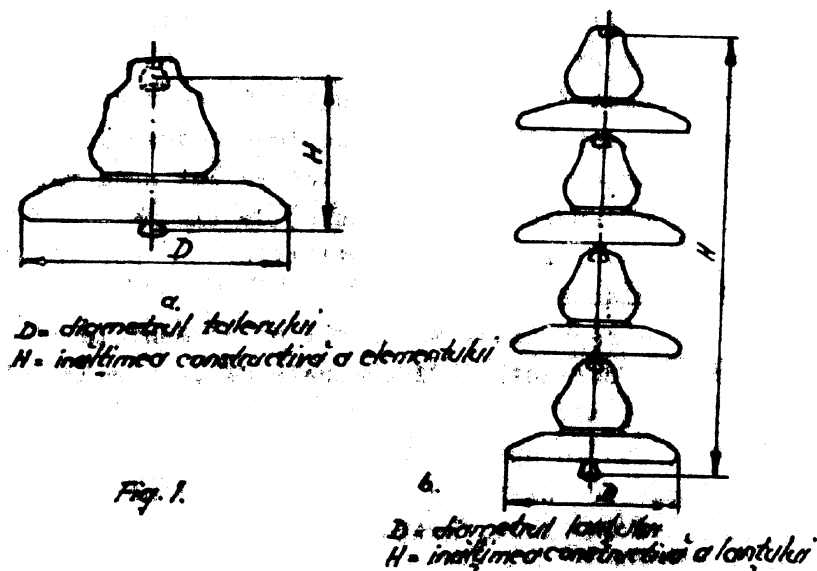
Aceasta diferentiere apare ca urmare a faptului ca la inalta tensiune, fiecare element electroizolant trebuie considerat ca o capacitate electrica. Astfel, studiul repartitiei tensiunii inalte pe elemente electroizolante va deveni un studiu de repartitie a tensiunii pe niste capacitati ce modeleaza ansamblele de piese electroizolante.

In acest context si lanturile de izolatoare, utilizate in transportul energiei electrice de inalta tensiune, se pot modela folosind capacitati.

Un mod de a transporta energia electrica de la sursa la consumator este acela prin intermediul liniilor electrice aeriene (LEA), care reprezinta de fapt sisteme de conductori de lungime foarte mare, sute si mii de km, ce traverseaza regiuni cu relief foarte variat, fiind suspendate de stilpi metalici sau din beton prin intermediul unor ansamble electroizolante si care datorita formei si modului de asamblare au primit denumirea de lanturi de izolatoare.

Acestea sint alcatuite din ansamblarea nerigida (grad minim de libertate) a elementelor electroizolante.

In fig.1 se prezinta un element al lantului (a) si lantul de izolatoare (b).



Dupa modul de asezare pe stalpi, lanturile se clasifica in:

-lanturi de sustinere, care se monteaza vertical pe stilpii de sustinere si preiau asupra lor greutatea conductorului si sarcinile suplimentare datorate chiciuri si vintului;

-lanturi de intindere, ce se monteaza in pozitie aproape orizontala pe stilpii de intindere, preluind asupra lor tractiunea in conductor.

Rezistenta mecanica a unui lant (solicitari pina la 10-20) este egala cu rezistenta elementelor de izolator ce il compun.

Daca solicitarea mecanica depaseste valoarea rezistentei mecanice admisibile a unui lant, atunci se utilizeaza lanturi multiple (doua sau mai multe lanturi legate paralel).

Numarul de elemente al lantului de izolatoare depinde de tensiunea de exploatare si de nivelul de izolatie impus. Astfel, pentru clasa de izolatie de 35kv, lanturile sunt alcatuite din 3 elemente; pentru 60kv -din 4 elemente; pentru 110kv -din 6 elemente; pentru 220kv -din 12-13 elemente; peste 400kv -din 22 elemente.

Ca material, elementele lantului se pot realiza din:

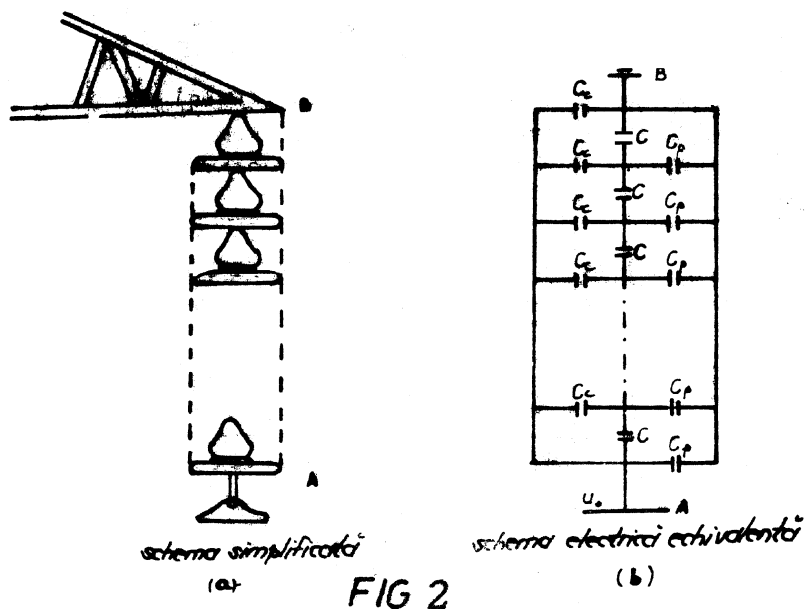
-portelan electrotehnic;

-sticla.

-cauciuc siliconic.

Armaturile prin care un element se assembleaza cu altele sunt metalice si prezenta lor este indispensabila din punct de vedere tehnologic.

Din punct de vedere functional insa, prezenta acestora nu este utila, introducand capacitati parazite, care conduc la o repartitie neuniforma a tensiunii pe elementele lantului.



In fig.2 sint prezentate:

- schita simplificata a unui lant de izolatoare;
- schita electrica echivalenta a lantului de izolatoare.

c - capacitatile longitudinale ale lantului, de valori egale (acelasi material si aceeasi forma constructiva a elementelor);

c_p - capacitati transversale ale elementelor lantului fata de pamint;

c_c - capacitati transversale, parazite, ale elementelor fata de conductor.

Studiul repartitiei tensiunii inalte pe elementele electroizolante ale izolatoarelor electrice se face in conditiile simplificatoare ca procesele care afecteaza izolatia electrica se produc intr-o durata de timp

foarte scurta, in care tensiunea aplicata nu variaza, iar curentul care parcurge elementele electroizolante este foarte mic:

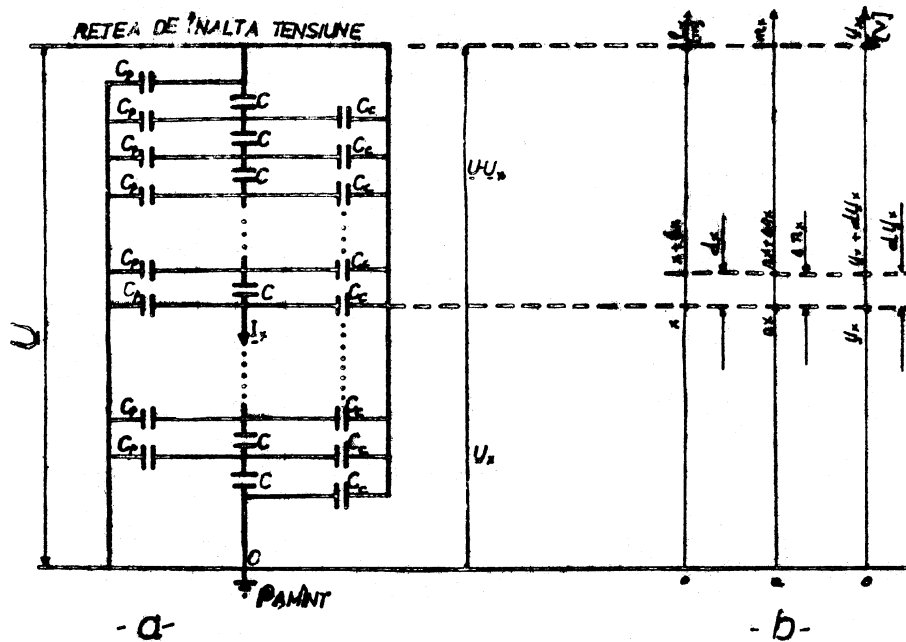


Fig. 3

$$\frac{dU}{dt} \approx \frac{di}{dt} \approx 0$$

Analiza teoretica a repartitiei tensiuni in lungul lantului de izolatoare se face pornind de la schema electrica echivalenta a acestuia, prezentata in figura 3.

In cadrul prezentului studiu, toate capacitatile se considera constante, situatie care in realitate se verifica doar pentru c si c_p .

C_e isi modifica valoarea, crescand cu scaderea distantei de conductorul de faza.

Aplicand ecuatiile telegrafistilor de ordinul I, pentru schema din figura 3, se poate scrie:

$$\frac{dU_x}{dx} = \frac{I_x}{j\omega c'}$$

$$\frac{dI_x}{dx} = U_x j\omega c' p + (U_x - U) j\omega c' e$$

unde c' , c'_p , c'_e - reprezinta capacitatile specifice lineice.

$$c' = c h$$

$$c'_p = c_p / h$$

$$c'_e = c_e / h$$

h = distanta (pasul) intre doua capacitati succesive din lant, care are lungimea "L" si un numar de

"n" pasi, astfel ca se poate scrie:

$$\Delta X = h = \frac{L}{n}$$

Derivand in raport cu x prima ecuatie a sistemului si inlocuind apoi in ecuatia a 2-a, se obtine ecuatia diferentiala de ordinul 2:

$$\frac{d^2 U_x}{dx^2} = \frac{c'_p + c_e}{c'} U_x + \frac{c'_e \cdot U}{c'} = 0$$

cu solutia:

$$U_x = A_1 e^{ax} + A_2 e^{-ax} + B \quad \text{unde:} \quad a = \sqrt{\frac{c'p + c'e}{c'}}$$

Constantele de integrare A_1, A_2, B se obtin din conditiile la limita:

$$x=0 \quad U_x=0$$

$$x=l \quad U_x=U$$

In urma inlocuirii si efectuării calculelor, se obtine:

$$U_x = \frac{U}{c'p + c'e} \left[c'e + \frac{shax}{shal} c'p + \frac{sha(l-x)}{shal} c'e \right]$$

Repartitia tensiunii U de-a lungul lantului electroizolant se studiaza pe curba:

$\frac{\Delta U_x}{U}$ = in functie de x sau n_x , unde $\frac{\Delta U_x}{U}$ reprezinta variatia caderii de tensiune de-a lungul lantului electroizolant, exprimata in unitati relative.

Pentru determinarea minimului functiei $\frac{\Delta U_x}{U}$ se calculeaza $\frac{d^2 U_x}{dx^2} = 0$, rezultand valoarea $x=x_1$, pentru care $\frac{dU_x}{dx} = \text{minim}$, sau in conditiile unitatilor relative si diferentelor treptelor finite, este totuna cu $\frac{\Delta U_x}{U} = \text{minim}$:

$$x_1 = \frac{1}{2a} \ln \left[\frac{\frac{c'e}{c'p + c'e}}{\frac{c'p + c'e \cdot e^{-al}}{2(c'p + c'e)shal}} \right]$$

Analiza relatiilor care prezinta variatiile lui U_x si x_1 arata ca tensiunea nu se distribuie uniform (liniar) pe lungimea lantului electroizolant.

Daca se introduc in relatiile de mai sus valori numerice uzuale (ca ordine de marime) pentru un lent de izolatoare cu $n=10$ elemente de la izolator de 110 kv.

$$c=50 - 70\text{pF}$$

$$cp=4 - 5\text{pF}$$

$$ce=0,5 - 1\text{pF}$$

se obtine curba de repartitie in figura 4 cu minimul de solicitare dielectrica la 1/3 fata de pamant si cu slicitarea maxima la primele rile (palarii) de sus (sub linia de inalta tensiune)) ale izolatorului.

Daca se lucreaza cu elemente concentrate repartitia potentialului in lungul lantului exprimata in procente din tensiunea aplicata este data de relatia:

$$U_k = \frac{100}{(cp + ce)shal} cp \left\{ shak + ce \left[shan - sh(n-k)a \right] \right\} \quad (\%)$$

iar tensiunea care revine unui izolator, exprimata tot in procente din tensiunea aplicata se determina din relatia:

$$DU_k = \frac{100}{(cp = ce)shan} \left\{ cp \left[shak - sh(k-1)a \right] - ce \left[sh(n-k) - sh(n-k+1)a \right] \right\} \quad (\%)$$

unde $a = \frac{ce + cp}{c}$; n =nr. de elemente din lant;

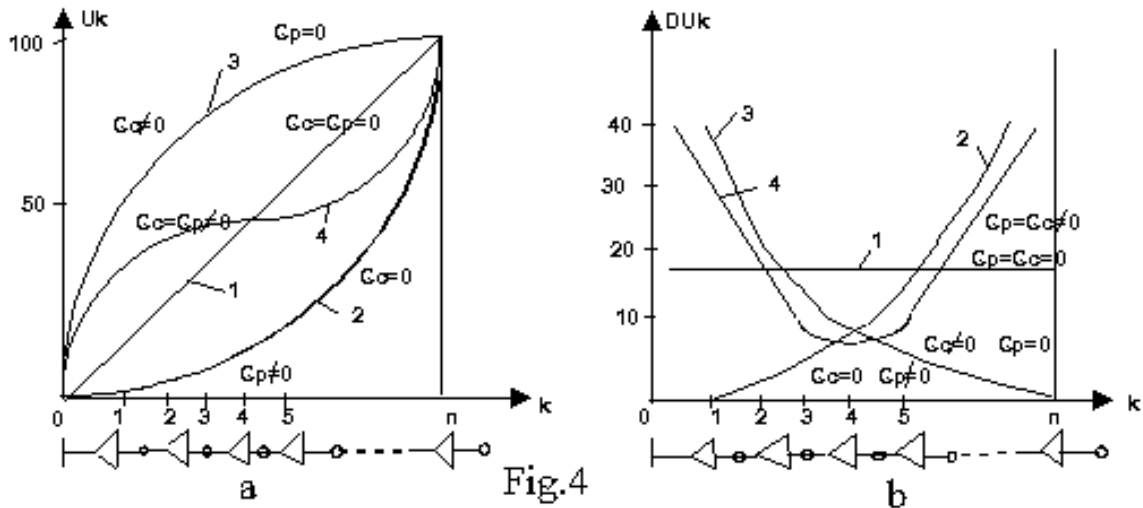
k =numarul de ordine al elementelor numaratoare facandu-se de la capatul legat la masa.
 Numarul de ordine al izolatorului caruia ii revine tensiunea minima se poate determina cu relatia:

$$K_{min} = -\frac{1}{2a} \cdot \ln \frac{Cc1^{am} + cp}{Cc1^{-am} + cp}$$

pentru a obtine o repartitie uniforma a tensiunii $U_k=U/n$ trebuie sa se realizeze egalitatea sarcinilor capacitatilor parazite cp si ce adica $U_k C_p > U_k / c_{ck}$ rezulta $c_{ck} = cp \cdot \frac{k}{n-k}$.

Prin aceasta izolatie se explica rolul armaturilor de protectie folosite la lanturile de izolatoare pentru imbunatatirea repartitiei tensiunii. Armatura de protectie montata la partea de suspendare a conductorului maresc capacitatea C_e in special a elementelor mai apropiate de conductor si in acest mod se micsoreaza caderea de tensiune. Influenta armaturii de protectie legata pe izolatorul legat la masa este insa neglijabila.

Repartitia tensiunii pe un lant de izolatoare se poate determina si prin modelarea acesteia facand masuratorile pe model, daca nu ar exista capacitatile cp si ce tensiunea s-ar repartiza uniform pe elementele lantului deoarece capacitatile proprii fiind egale, prin ele ar trece acelasi curent care ar produce aceeasi cadere de tensiune pe fiecare element al lantului. Curbele 1 din figura A:



a) $f(k) = \frac{U_k}{U_0} \cdot 100$

b) $f(k) = \frac{DU_k}{U_0} \cdot 100$

Repartitia potentialului (a) respectiv caderii de tensiune (b) in lungul unui lant de izolatoare.

Daca se presupune $cc=0$ atunci pentru $cp=0$ duce la o repartitie a potentialului conform curbelor din fig.4 cu cea mai mare cadere de tensiune pe elementul cel mai apropiat de conductor.

Daca $cp=0$ si $cc \neq 0$ se obtin curbele 3 din fig.4 adica solicitarea maxima ar fi repartizata pe elementul cel mai indepartat de conductor.

Pentru $cp=cc$, caderea de tensiune maxima corespunde elementelor extreme ale lantului, iar valoarea minima la mijlocul acestuia (curbele din fig.4).

Practic $cp > cc$, repartitia tensiunii fiind influentata predominant de valoarea capacitatilor parazite fata de pamant, astfel ca cea mai mare cadere de tensiune va avea loc pe elementul de langa conductor, iar cea mai mica pe elementul situat intre mijlocul lantului si capatul pus la pamant.

2. CHESTIUNI DE STUDIAT

2.1. Determinarea experimentală și analitică a repartiției potențialelor în lungul lantului exprimat în procente, pentru cazurile (2.1.1.) $c_p=0$; $c_e=0$ (2.1.2.) $c_p \neq 0$; $c_e=0$ (2.1.3.) $c_p=0$ $c_e \neq 0$ (2.1.4.) $c_p=c_e$.

2.2. Determinarea experimentală și analitică a repartiției caderilor de tensiune în lungul lantului exprimată în procente pentru cazurile:

2.2.1. $c_p=0$; $c_e=0$

2.2.2. $c_p \neq 0$; $c_e=0$

2.2.3. $c_p=0$; $c_e \neq 0$

2.2.4. $c_p=c_e$

2.3. Determinarea experimentală și analitică a gradului de neuniformitate al repartiției potențialelor și caderilor de tensiune în lungul lantului, utilizând relațiile:

$$\eta_1 = \frac{U_{k \max}}{U_{k \min}}; \quad \eta_2 = \frac{\Delta U_{k \max}}{\Delta U_{k \min}}$$

pentru cazurile:

2.4.1. $c_p=0$; $c_e=0$

2.4.2. $c_p \neq 0$; $c_e=0$

2.4.3. $c_p=0$; $c_e \neq 0$

2.4.4. $c_p=c_e$.

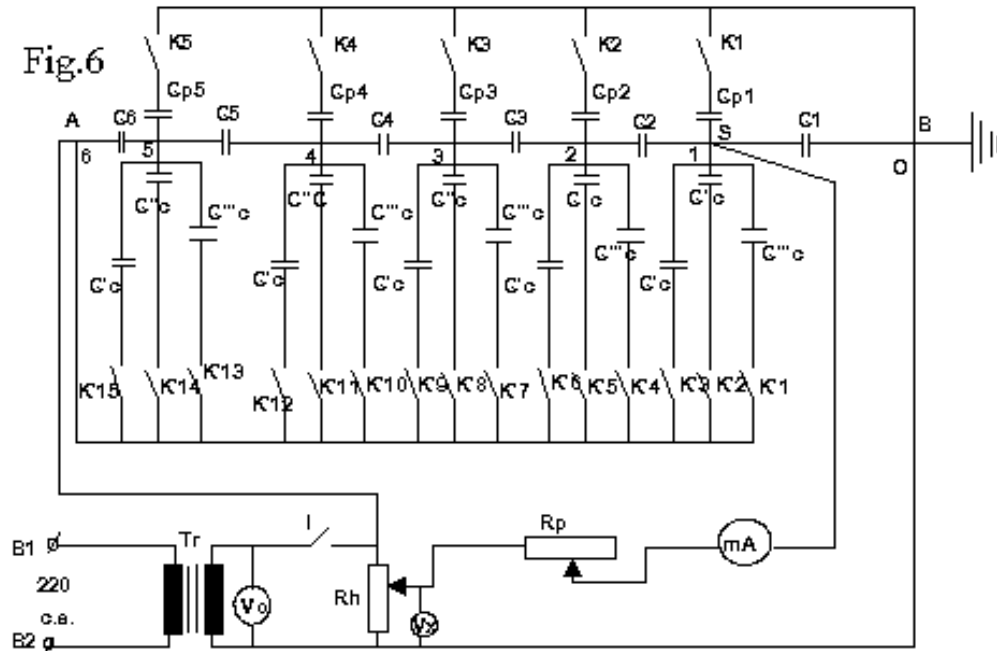
3. SCHEMA DE LUCRU SI APARATELE UTILIZATE:

Lucrarea se efectuează cu ajutorul unui echipament didactic alimentat la 220 V, care conține: modelul fizic al lantului de izolare; sursa de tensiune și aparatele de măsurat și reglaj, toate prezentate în schema din figura 6 în care:



fig.5

- k_1-k_5 ; $k_1'-k_1'5$ = întreruptoare basculante 250V/2,5A
- Tr = transformator monofazat 220/100V; 50 Hz
- V_0 , V_x = voltmetru feromagnetic 120 div.; c1 1,5
- mA = miliampmetru 60 div cu 3 dom. de sensibilitate 3,30; 300 mA c1 1,5
- Rh = reostat cu cursor montat ca divizor de tensiune
- Rp = rezistența de protecție pentru mA; 5Kohmi/2,5W
- S = borna sonda pentru măsurarea potențialelor



- B₁, B₂ = borne (cordon) de alimentare 220 V, 50 Hz

$$C_{pk} = 1\mu\text{F}/250\text{V}; k=1\div 5$$

$$C_k = 2\mu\text{F}/250\text{V}; k=1\div 6$$

$$C_{ck}^{111} = 0,2\mu\text{F}/250\text{V}; k=1\div 5$$

$$C_{ck}^{11} = 1\mu\text{F}/250\text{V}; k=1\div 5$$

$$C_{c1}^1 = 0,2\mu\text{F}/250\text{V};$$

$$C_{c2}^1 = 0,5\mu\text{F}/250\text{V};$$

$$C_{c3}^1 = 1\mu\text{F}/250\text{V};$$

$$C_{c4}^1 = 2\mu\text{F}/250\text{V};$$

$$C_{c5}^1 = 4\mu\text{F}/250\text{V}.$$

Modelul fizic al lantului reprezinta o retea de condensatoare ce incearca sa reproduca schema electrica echivalenta. Acesta este alimentat la tensiune redusa si permite modificarea capacitatilor componente punandu-se in evidenta rolul capacitatilor parazite (cp si ce) si al ecranelor asupra repartitiei potentialelor si caderilor de tensiune in lungul lanturilor de izolatoare.

Pentru microrarea influentei conductelor de legatura asupra masuratorilor si in general pentru diminuarea erorilor de masurare (capacitatile reale sunt foarte mici comparabile cu capacitatile parazite) in realizarea modelului s-au utilizat capacitati mult mai mari: $C_{model}/C_{real} = 10^5 - 10^6$ cu pastrarea raportului intre capacitatile analoage, model - lant.

Aceasta solutie constructiva nu modifica repartitia tensiunilor (potentiale si caderi de tensiune) multiplicarea capacitatilor cu acelasi coeficient, neschimband valabilitatea relatiilor ce dau valorile lui U_k si ΔU_k .

De asemenea pentru microrarea erorilor de masurare, determinarea repartitiei pe model se face print-o de compensatie si nu una directa.

4. MODUL DE LUCRU

4.1.1. Se verifica pozitia "deschis" a intreruptorului I, pozitia de maxim a rezistentei Rp, pozitiile "deschis" ale intreruptoarelor K₁-K₅; K'₁-K'₁₅ pozitia "in afara" a sondei S si se alimenteaza

echipamentul la 220 V, 50 Hz prin intermediul bornelor B_1 , B_2 , urmărind deviația voltmetrului V_0 , care trebuie să indice $98=104V$.

Se comută mA pe domeniul maxim (300mA) și se închide întrerupătorul I.

Se introduce sonda S pe rând în punctele $K=1 - 6$ (punctele dintr-o capacități longitudinale C_k), pentru fiecare punct operându-se astfel:

- dacă mA deviază se reglează R_h și R_p în sensul caderii deviației acestuia până la 0 dacă de la început s-a obținut deviația 0 la mA, sau în urma reglajului R_h și R_p s-a ajuns la deviația 0 sau o deviație minimă, se repune R_p la valoarea maximă și se comută domeniul de reglaj al mA pe treapta inferioară reglând din nou pe R_h și R_p în sensul scaderii deviației la aparatul cu rol de indicator de nul ($m17$) până la indicația 0 sau minimă.
- dacă și pe această treaptă de la început miliampermetrul indică zero sau în urma reglajului s-a ajuns la o deviație minimă, se repune R_p pe valoare maximă și se trece comutatorul de reglaj al miliampermetrului pe poziția: (3mA), reglând pe R_h și R_p în sensul scaderii deviației până la obținerea valorii reale la mA. Pentru această situație se notează valoarea tensiunii indicată de V_x , reprezentând potențialul punctului față de masă.

Pentru determinarea experimentală a potențialelor punctelor următoare ($K_2 - K_4$), se procedează în mod asemănător având însă grijă ca odată cu scoaterea sondei, pentru a se introduce în punctele dorite, să se repună R_p și comutatorul de reglaj al domeniului de sensibilitate al miliampermetrului pe valori maxime.

4.1.2. Se repetă operațiile de la punctul 4.1.1. cu introducerea capacităților cp prin comutarea întrerupătoarelor $K_1 - K_5$.

4.1.3. Se repetă operațiile de la punctul 4.1.1. cu introducerea pe rând a capacităților $c'e$, cc'' și cc''' prin comutarea corespunzătoare a întrerupătoarelor $K_1' - K_{15}'$.

4.1.4. Se repetă operațiile de la punctul 4.1.1. cu introducerea capacităților cp și ce ($cp=ce$) prin închiderea întrerupătoarelor $K_1 - K_5$, K_2' , K_5' , K_8' , K_{14}' .

Pentru determinările analitice de la punctele 2.1.1. - 2.1.4. se utilizează relația de calcul a lui U_{k1} .

4.2.1. Din valorile potențialelor determinate experimental la punctul 4.1.1., se determină caderile de tensiune prin efectuarea diferentialelor de potențial dintre punctele $K - (K-1)$; $DU_{k,k-1} - U_k - U_{k-1}$.

4.2.2.; 4.2.3. și 4.2.4. se procedează asemănător pct. 4.2.1. dar pentru potențialele determinate la pct. 4.1.2.; 4.1.3. și respectiv 4.1.4.

Obs. Determinările analitice de la punctele 2.2.1. - 2.2.4. se fac utilizând relația care da pe $DU_k(\%)$, adăugându-se aceleași precizări ca la Obs.1.

4.3.1. - 4.3.4. În cadrul determinărilor experimentale de la punctele 4.1.1. - 4.1.4. și respectiv 4.2.1. - 4.2.4. se urmărește elementul caruia îi revine potențialul minim și respectiv caderea de tensiune minimă.

Se determină și analitic, utilizând relația ce da pe K_{min} , rangul elementului, caruia îi revine tensiunea minimă.

4.4.1. - 4.4.4. Pentru determinările experimentale și analitice de la punctele 4.1.1. - 4.1.4. și respectiv 4.2.1. - 4.2.4. se determină gradul de neuniformitate al repartiției potențialelor și caderilor de tensiune pe modelul unui lanț de izolatoare, conform indicațiilor de la punctul 2.4.

Cu toate determinările experimentale și analitice obținute se completează un tabel de forma:

Nr. curent	Nr. de elemente al lantului	Rangul elementelor din lant	Configur. modelulu-i (poz. intrerupt)	U _k [%]		ΔU _k [%]		K _{min}	η [%]	Observatii
				Exp.	Teoretic	Exp.	Teoretic			
1										
2										
.										
.										
.										

Cu datele din tabelul de mai sus se vor trasa caracteristicile $U_k=f(k)$ si $\Delta U_k=f(k)$.