

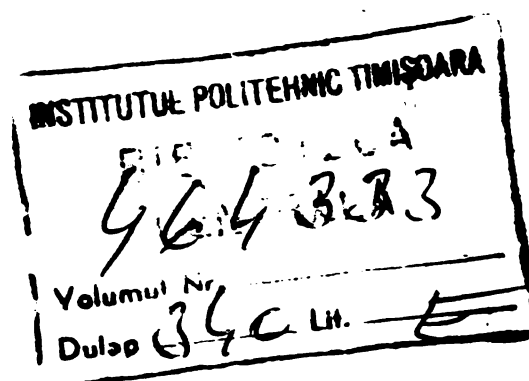
INSTITUTUL POLITEHNIC „TRAIAN VUIA”
TIMISOARA
FACULTATEA DE ELECTROTEHNICA

TEZA DE DOCTORAT

CONTRIBUTII PRIVIND DETERMINAREA
PARAMETRIILOR SI REPARTITIEI CURENTILOR
DE SCURTCIRCUIT MONOFAZAT LA
RETELELE DE MEDIE TENSIUNE CU CABLURI

CONDUCATOR STIINTIFIC
Prof. dr. ing. Constantin Șora

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA



ing. Al. Tănăsescu

1981

C U P R I N S

1. INTRODUCERE	1
2. PARAMETRII LINIEI ELECTRICE SUBTERANE	6
2.1. Unele considerații generale	6
2.2. Rezistența cablurilor	8
2.2.1. Rezistența conductorului unei faze	8
2.2.2. Rezistența învelișului metalic diamagnetic	11
2.2.3. Rezistența căii de întoarcere prin pământ	13
2.3. Reactanțe inductive ale cablurilor	14
2.3.1. Reactanța inductivă a conductorului de fază	16
2.3.2. Reactanțele inductive ale învelișu- rilor metalice diamagnetice	23
3. IMPEDANȚELE DE SECVENȚA ALE CABLURILOR MONOFAZATE ÎN MONTAJ TRIFAZAT	25
3.1. Calculul matricei impedanță echivalentă	25
3.2. Calculul impedanțelor de secvență	30
3.3. Determinarea impedanțelor de secvență ale liniei subterane funcție de rezistențele și reactanțele parțiale	32
4. CALCULUL ȘI REPARTIȚIA CURENTULUI DE SCURTCIRCUIT MONOFAZAT ÎN REȚELE DE CABLURI CU NEUTRUL LEGAT LA PĂMÎNT PRIN REZISTENȚA	40
4.1. Considerații generale	40
4.2. Relații de calcul și scheme echivalente	44
5. REZULTATE EXPERIMENTALE DE LABORATOR	51
5.1. Gruparea parametrilor, scheme de măsurare și relații de calcul	51

5.1.1.	Schema experimentală pentru măsurarea mărimilor A_1 și B_1	53
5.1.2.	Schema experimentală pentru măsurarea mărimii B_2	54
5.1.3.	Schema experimentală pentru măsurarea mărimilor A_3 și B_3	57
5.1.4.	Schema experimentală pentru măsurarea mărimilor A_4 și B_4	59
5.1.5.	Schema experimentală pentru măsurarea mărimilor A_5 și B_5	60
5.1.6.	Impedanța omopolară a cablurilor cu considerarea întoarcerii curentului prin pământ și învelișuri în paralel	62
5.2.	Determinarea pe cale experimentală a parametrilor cablurilor în condiții de laborator	63
5.2.1.	Măsurarea mărimilor A_1 și B_1	64
5.2.2.	Măsurarea mărimii B_2	66
5.2.3.	Măsurarea mărimilor A_4 și B_4	67
5.2.4.	Măsurarea mărimilor A_5 și B_5	69
5.2.5.	Calculul rezistențelor și reactanțelor inductive în baza măsurărilor	70
5.3.	Parametrii cablului calculați în funcție de elementele constructive	72
5.4.	Analiza comparativă a valorilor obținute prin calcul în funcție de elementele constructive și pe cale experimentală	76
6.	DETERMINARI EFECTUATE ÎN SECTORUL EXPERIMENTAL	79
6.1.	Prezentarea sectorului experimental	80
6.2.	Incercări experimentale în rețea în cablu alimentată cu tensiune redusă	84
6.2.1.	Parametrii tronsonului 2 de cablu	85
6.2.2.	Parametrii liniei în cablu 20 kV stația Pitești Vest - PA Banatul	98

6.3. Determinarea experimentală a curenților și repartiției lor în cazul unui scurt-circuit monofazat	104
6.3.1. Incercări experimentale cu o linie alimentată radial de pe bare separate	110
6.3.2. Incercări experimentale cu o linie alimentată radial de pe bare comune cu celelalte plecări radiale	116
7. CONCLUZII SI CONTRIBUTII	119
BIBLIOGRAFIE	124

1. INTRODUCERE

În condițiile creșterii pronunțate a densităților de sarcină, în marile aglomerări urbane, reexaminarea concepției rețelelor de distribuție subterane s-a impus ca un proces absolut necesar. Această problemă trebuie considerată sub dublul aspect, al creșterii capacității de transport al energiei respectiv al minimizării consumului tehnologic.

Adoptarea valorii de 20 kV pentru tensiunea de distribuție, manifestată ca o tendință generală [3, 22, 47], impune reconsiderarea construcției cablurilor, avînd în vedere solicitările sporite ce apar la nivelul izolației, învelișurilor și mantalelor metalice, etc.

În această situație, pentru a se evita supradimensionarea cablurilor, cu implicațiile inerente, s-au căutat soluții pentru reducerea suprasolicitării acestora, soluții aflate în strînsă dependență cu modul de tratare a neutrului rețelei [13, 16, 23, 50, 52, 57, 62, 91]. Cercetările întreprinse pe plan mondial au condus la adoptarea pe scară largă a soluției tratării neutrului prin rezistor, cu limitarea curentului de scurtcircuit monofazat la valoarea de 1000 A.

Principalele avantaje ale acestei soluții sînt :

- învelișurile și ecranele metalice care în regim de scurtcircuit sînt străbătute de curenții de întoarcere, se pot dimensiona pentru 1000 A, timp de 2 secunde, cu avantajul posibilității utilizării cablurilor de construcție curentă ;

- nu se impun condiții deosebite pentru instalațiile de legare la pămînt, scurtcircuitele monofazate fiind eliminate prin protecție ;

./.

- se reduce numărul specific de avarii la cabluri, ca urmare a eliminării posibilității de apariție a unor defecte evolutive;

- protecția prin relee este simplă și eficace, cu timpi reduși de eliminare a defectelor - sub 1 sec. ;

- reducerea costului (cu aproximativ 15%) față de soluțiile cu neutrul izolat sau tratat cu bobină, datorită nivelului de izolație mai scăzut [3, 47] ;

- supratensiunile medii sînt de aproximativ 1,5 - 2,5 U_f în regim tranzitoriu [4] funcție de valoarea curentului de scurt-circuit monofazat adoptat pentru aceste rețele (300 A, respectiv 1000 A) ;

- posibilitatea tratării raționale a neutrului rețelelor dezvoltate, la care componenta rezistivă a curentului de punere la pămînt face inoperantă bobina de stingere.

In țara noastră, din lungimea totală a liniilor electrice subterane de medie tensiune (5-25 kV), care la nivelul anului 1980 era de aproximativ 18.000 km, cca. 40% sînt rețele a căror neutru este tratat prin rezistor, urmînd ca în viitor toate rețelele de medie tensiune să fie trecute la acest sistem de tratare a neutrului. Liniile de medie tensiune (5 - 25 kV) de la noi din țară sînt realizate în proporție de aproximativ 80% din cabluri cu înveliș din plumb și cu benzi feromagnetice de protecție.

Printre întreprinderile de rețele electrice care au manifestat de la început o tendință hotărîtă de trecere la tratarea neutrului prin rezistor se pot enumera IDE București, IRE Deva, IRE Pitești și IRE Timișoara. In aceste întreprinderi acțiunea de trecere la tratarea neutrului prin rezistor a fost precedată de crearea unor sectoare de rețea experimentale care au permis pe de o

parte verificarea unor soluții tehnice referitoare la concepția și construcția rezistorului, precum și posibilității de creare a neutrilor artificial și pe de altă parte au oferit condiții pentru efectuarea unor probe și încercări pe viu.

La noi în țară în lucrările [4, 46] au fost abordate unele probleme referitoare la rețelele de medie tensiune tratate prin rezistor, cum sînt : stabilirea valorii maxime a supratensiunilor, dimensionarea optimă a rezistorului, alegerea corespunzătoare a valorii rezistorului și a soluțiilor constructive de realizare a acestuia.

Dintre multiplele aspecte pe care le ridică aplicarea modului de tratare a neutrilor rețelelor de medie tensiune prin rezistor, autorul a abordat în cadrul tezei de doctorat problema determinării curentului de scurtcircuit monofazat și a repartiției acestuia în rețelele de cabluri subterane cu manta de plumb. Această problemă, mai puțin tratată în literatură, a fost pentru prima dată abordată în mod sistematic, în țara noastră, în cadrul prezentei teze.

Cunoașterea repartiției curentului de scurtcircuit monofazat prezintă o importanță deosebită pentru dimensionarea corectă a prizelor de pămînt și verificarea la stabilitate termică a învelișurilor cablurilor. Un accent deosebit s-a pus pe partea experimentală, fiind efectuate numeroase încercări experimentale atît în laborator cît și într-un sector experimental de rețea conceput și realizat în acest scop.

În studiu s-a adoptat un sistem de parametri adecvați cazului considerat, s-au calculat impedanțele de secvență și pe baza schemei stabilite s-a calculat curentul de scurtcircuit monofazat și s-a determinat repartiția acestuia în următoarele variante :

a. introducerea curenților în paralel prin învelișurile metalice ale cablurilor și prin pămînt ;

b. introducerea curenților numai prin învelișurile metalice ale cablurilor;

e. Încercarea curenților la un nivel mărit.

Prin tematica și metodele de studiu folosite, teza de doctorat se încadrează în teoria circuitelor electrice liniare. Trebuie subliniat faptul că studiul întreprins în teză s-a limitat la cazul scurtcircuitelor monofazate în regim permanent. Se poate menționa în acest context faptul că, pe de o parte, scurtcircuitul monofazat reprezintă cca. 90 % din totalul scurtcircuitelor [76, 77, 78] iar pe de altă parte, durata regimului tranzitoriu fiind de 10 ms [4] implicațiile lui asupra instalațiilor din rețea, sînt în general reduse.

În teză s-au considerat cablurile trifazate de 20 kV, cu învelișuri metalice separate pe faze și benzi feromagnetice de protecție comune (fig.1.1), folosite în construcția liniilor subterane la noi în țară.

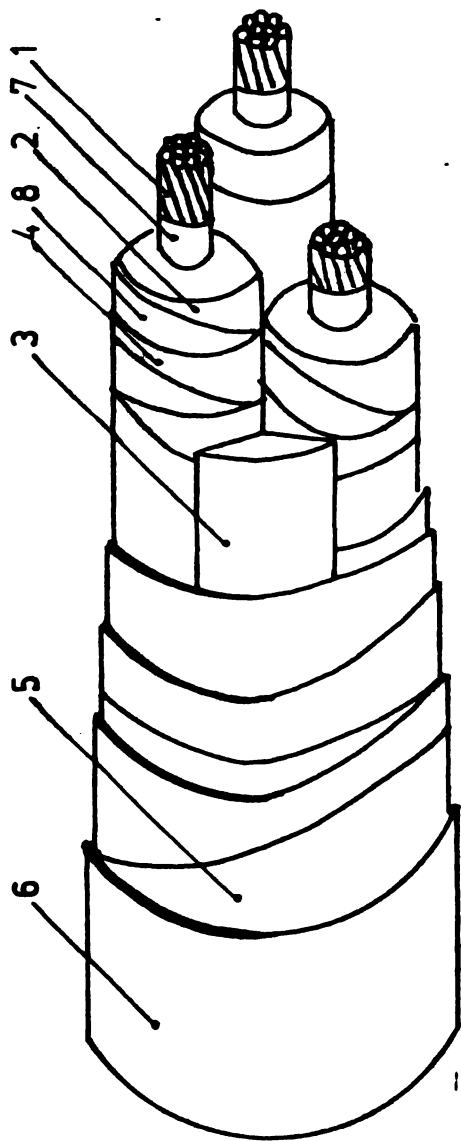
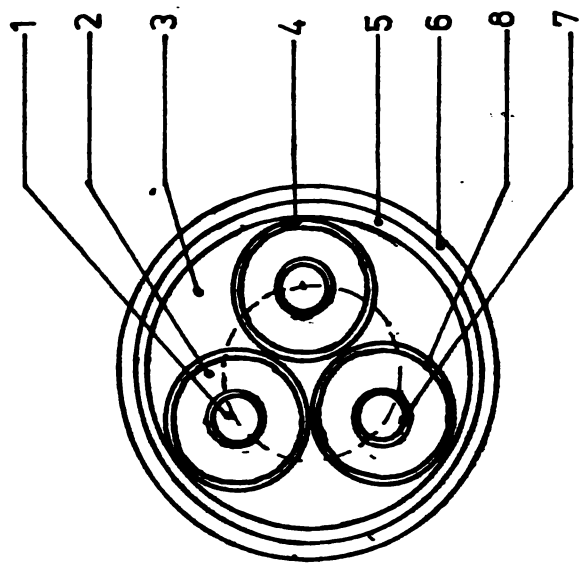
Teza conține 7 capitole. După un capitol introductiv (1), în capitolul 2 se analizează parametrii principali ai liniilor electrice subterane, prezentîndu-se succint rezistențele și reactanțele ce intervin în analiză. Capitolul 3 tratează problema impedanțelor de secvență ale cablurilor monofazate în regim trifazat, iar în capitolul 4 sînt prezentate scheme și metode de calcul a curentului de scurtcircuit precum și repartiția acestuia. În capitolele 5 și 6 sînt prezentate încercările experimentale efectuate în laborator și în sectorul experimental de rețea. Al 7-lea capitol este rezervat concluziilor și aprecierilor de ansamblu asupra rezultatelor obținute.

În legătură cu abordarea și rezolvarea problemelor propuse au fost aduse contribuții originale atît în ceea ce privește partea teoretică de calcul cît mai ales la partea experimentală, verificarea rezultatelor obținute prin calcul fiind un obiectiv major

al tezei. Toate încercările de utilaj cât și măsurătorile efectuate atât în sectorul experimental realizat la Pitești cât și în alte sectoare experimentale din țară au fost efectuate sub îndrumarea autorului prezentei teze. Rezultatele obținute în teză s-au concretizat prin elaborarea la nivel național a unei metodologii de determinare a repartiției curenților de scurtcircuit, care împreună cu realizarea unor proiecte tip a condus la generalizarea în țară a modului de tratare a neutrilor prin rezistor.

Tematica tezei de doctorat s-a încadrat, de mai mulți ani în preocupările de bază ale secției cercetare proiectare rețele electrice din cadrul Centralei Industriale de Rețele Electrice, unde își desfășoară activitatea autorul lucrării, problema tratării neutrilor rețelei de medie tensiune constituind obiectul a numeroase lucrări de cercetare elaborate de către această secție.

Autorul ține să mulțumească conducătorului științific prof.dr.ing.C.Sora pentru conducerea competentă și constantă, de înaltă ținută științifică, de care s-a bucurat în perioada stagiului de doctorat, cadrelor didactice de la I.P.Timișoara, colegilor din cadrul secției de cercetare proiectare (CIRE) pentru sugestiile utile apărute în cadrul discuțiilor purtate, precum și celor a căror colaborare a fost esențială în realizarea sectorului experimental și efectuarea încercărilor în rețea: secția de utilaj-construcții și reparații electrice -- IRE Sibiu pentru realizarea utilajelor, IRE Deva și Laboratorului de mare putere a GUAME Craiova pentru încercările de utilaje precum și IRE Pitești în cadrul căreia s-a realizat sectorul experimental precum și Laboratorului de protecție și automatizări - Deva din cadrul Secției cercetare proiectare a Centralei Industriale de Rețele Electrice.



- 1 Conductor din aluminiu.
- 2 Izolație de hîrtie.
- 3 Umplutura.
- 4 Invelis din plumb.
- 5 Armatură din bandă
- 6 Inveliș exterior de protecție
- 7 Hîrtie conductoare (ecran semiconductor)
- 8 Hîrtie metalizată (ecran)

CABLU TRIFAZAT 12 / 20 CU INVELISURI
METALICE PE FAZA SI BENZI DE PROTECTIE
MECANICA.

Fig.1.1.

2. PARAMETRUL LINEI ELECTRICE SUBTERANE

2.1. Unele considerații generale

Determinarea parametrilor unei linii electrice subterane presupune cunoașterea caracteristicilor constructive ale cablurilor, a dispunerii în teren, cât și a condițiilor de legare la pământ.

În scopul determinării parametrilor ce intervin se consideră un element longitudinal trifazat. Se neglijează elementele transversale, iar lungimea elementului de linie este suficient de mică pentru a putea considera parametri concentrați.

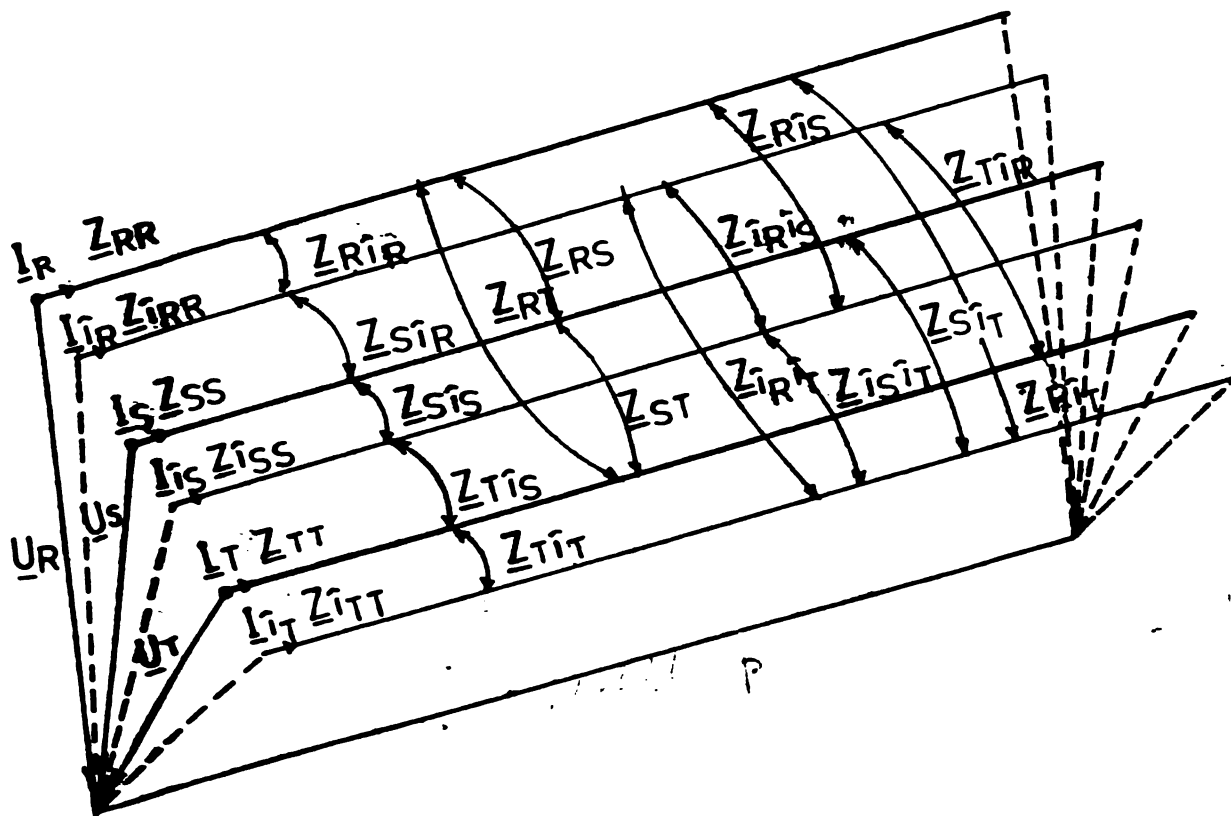


Fig.2.1.

Conductoarele împreună cu învelișurile determină 6 circuite cu închidere prin pământ, fiecare incluzînd pe lîngă impedanța proprie și impedanțele mutuale ale celorlalte circuite.

./.

Ecuațiile circuitelor considerate sînt:

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_R &= \underline{Z}_{RR}\underline{I}_R + \underline{Z}_{RS}\underline{I}_S + \underline{Z}_{RT}\underline{I}_T + \underline{Z}_{Rf_R}\underline{I}_{f_R} + \underline{Z}_{Rf_S}\underline{I}_{f_S} + \underline{Z}_{Rf_T}\underline{I}_{f_T} \\
 \underline{U}_S &= \underline{Z}_{SR}\underline{I}_R + \underline{Z}_{SS}\underline{I}_S + \underline{Z}_{ST}\underline{I}_T + \underline{Z}_{Sf_R}\underline{I}_{f_R} + \underline{Z}_{Sf_S}\underline{I}_{f_S} + \underline{Z}_{Sf_T}\underline{I}_{f_T} \\
 \underline{U}_T &= \underline{Z}_{TR}\underline{I}_R + \underline{Z}_{TS}\underline{I}_S + \underline{Z}_{TT}\underline{I}_T + \underline{Z}_{Tf_R}\underline{I}_{f_R} + \underline{Z}_{Tf_S}\underline{I}_{f_S} + \underline{Z}_{Tf_T}\underline{I}_{f_T} \\
 0 &= \underline{Z}_{f_RR}\underline{I}_R + \underline{Z}_{f_RS}\underline{I}_S + \underline{Z}_{f_RT}\underline{I}_T + \underline{Z}_{f_RR}\underline{I}_{f_R} + \underline{Z}_{f_RS}\underline{I}_{f_S} + \underline{Z}_{f_RT}\underline{I}_{f_T} \\
 0 &= \underline{Z}_{f_SR}\underline{I}_R + \underline{Z}_{f_SS}\underline{I}_S + \underline{Z}_{f_ST}\underline{I}_T + \underline{Z}_{f_Sf_R}\underline{I}_{f_R} + \underline{Z}_{f_SS}\underline{I}_{f_S} + \underline{Z}_{f_Sf_T}\underline{I}_{f_T} \\
 0 &= \underline{Z}_{f_TR}\underline{I}_R + \underline{Z}_{f_TS}\underline{I}_S + \underline{Z}_{f_TT}\underline{I}_T + \underline{Z}_{f_Tf_R}\underline{I}_{f_R} + \underline{Z}_{f_Tf_S}\underline{I}_{f_S} + \underline{Z}_{f_Tf_T}\underline{I}_{f_T}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

în care :

- $\underline{U}_R, \underline{U}_S, \underline{U}_T$ sînt tensiunile pe faze ;
- $\underline{I}_R, \underline{I}_S, \underline{I}_T$ sînt curenții prin conductoare ;
- $\underline{I}_{f_R}, \underline{I}_{f_S}, \underline{I}_{f_T}$ sînt curenții prin învelișurile metalice ;
- $\underline{Z}_{RR}, \underline{Z}_{SS}, \underline{Z}_{TT}$ impedanțele proprii ale conductoarelor de fază ;
- $\underline{Z}_{f_{RR}}, \underline{Z}_{f_{SS}}, \underline{Z}_{f_{TT}}$ impedanțele proprii ale învelișurilor metalice ;
- $\underline{Z}_{RS}, \underline{Z}_{RT}, \underline{Z}_{ST}$ impedanțele mutuale între conductoarele de fază ;
- $\underline{Z}_{Rf_R}, \underline{Z}_{Sf_S}, \underline{Z}_{Tf_T}$ impedanțele mutuale între conductoare și învelișurile proprii ;
- $\underline{Z}_{Rf_S}, \underline{Z}_{Rf_T}, \underline{Z}_{Sf_R}, \underline{Z}_{Sf_T}, \underline{Z}_{Tf_S}, \underline{Z}_{Tf_R}$ impedanțele mutuale între un conductor de fază și învelișul unei faze vecine ;
- $\underline{Z}_{f_Rf_S}, \underline{Z}_{f_Rf_T}, \underline{Z}_{f_Sf_T}$ impedanțele mutuale între învelișuri.

Prin impedanța proprie a conductorului de fază și a învelișului metalic se înțelege de fapt impedanța buclei conductor - pământ, respectiv înveliș-pământ. O precizare analoagă este valabilă și pentru impedanțele mutuale.

2.2. Rezistența cablurilor

În acest paragraf se analizează rezistența cablurilor de 20 kV trifazate cu învelișuri metalice separate pe faze și benzi feromagnetice de protecție comune, în regim permanent sinusoidal.

Determinarea rezistenței acestor cabluri se face ținând seama de caracteristicile materialelor folosite și de construcția lor.

Analiza teoretică precum și încercările efectuate în sectorul experimental, au scos în evidență, pentru liniile electrice subterane, următoarele căi de circulație a curentului de scurtcircuit monofazat : conductoarele de fază, învelișurile metalice diamagnetice și pământul. Benzile feromagnetice de protecție, de regulă, nu constituie căi de circulație pentru curentul de scurtcircuit monofazat.

2.2.1. Rezistența conductorului unei faze

Pentru calculele care se fac în regim permanent de scurtcircuit monofazat se ține cont de rezistența conductorului de fază, în contextul luării în considerare a efectelor specifice curentului alternativ (efect pelicular, efect de proximitate, etc). Dacă se notează cu R_{cc} rezistența conductorului de fază în curent continuu și cu R_c rezistența corespunzătoare în curent alternativ, se poate scrie relația [5, 11, 86] :

$$R_c = R_{cc} (1 + \sum K_{ci}) = R_{cc} (1 + K_c) \quad (2.2)$$

în care $K_c = \sum K_{ci}$ exprimă creșterea rezistenței în curent alternativ față de cea în curent continuu, ca urmare a factorilor menționați.

La calculul rezistenței în curent continuu se ține seama de variația rezistivității în funcție de temperatură și de lungimea mărită cu (2-6) % a firelor față de lungimea conductorului, ca urmare a resucirii acestora [5, 45, 88] .

Incercările experimentale efectuate la cablurile de 20 kV cu izolație din hîrtie, mantale de plumb și benzi feromagnetice de protecție, au scos în evidență influența pierderilor în benzile metalice feromagnetice de protecție. În cazul amplasării cablurilor în galerii, estacade, poduri, apar pierderi suplimentare ca urmare și a efectului de proximitate.

În lucrare se folosesc următoarele notații pentru rezistențele suplimentare ale conductorului de fază, corespunzătoare pierderilor de mai sus: ΔR_{cb} - rezistența suplimentară corespunzătoare pierderilor în benzile feromagnetice de protecție; ΔR_{cp} - rezistența suplimentară ca urmare a efectului pelicular; ΔR_{cv} - rezistența suplimentară ca urmare a efectului de proximitate.

Cu aceste precizări se poate scrie :

$$R_c = R_{cc} + \Delta R_{cb} + \Delta R_{cp} + \Delta R_{cv} \quad (2.3)$$

sau:

$$R_c = R_{cc} (1 + K_{cb} + K_{cp} + K_{cv}) \quad (2.4)$$

în care:

$$K_{cb} = \frac{\Delta R_{cb}}{R_{cc}} \quad ; \quad K_{cp} = \frac{\Delta R_{cp}}{R_{cc}} \quad ; \quad K_{cv} = \frac{\Delta R_{cv}}{R_{cc}}$$

Rezistența suplimentară ca urmare a pierderilor în benzile feromagnetice se manifestă numai în cazul prezenței curenților omopolari, deci se va lua în considerare numai la determinarea impedanței omopolare. Separînd acest termen, în cele ce urmează expresia rezistenței conductorului se va considera sub forma :

$$R_c = R'_c + K \Delta R_{cb} \quad (2.5)$$

unde $R'_c = R_{cc} + \Delta R_{cp} + \Delta R_{cv}$ iar prin factorul K se ține seama corespunzător de întoarcerea curenților omopolari, prin pămînt, prin învelișuri sau prin pămînt și învelișuri în paralel (v.par.4.2).

Pentru determinarea pierderilor suplimentare în benzile feromagnetice, ale unui cablu trifazat, se echivalează sistemul constructiv format din trei conductoare parcurse fiecare de curentul omopolar I cu un conductor echivalent dispus concentric și parcurs de curentul omopolar $3I$. Cu scrierea relațiilor, din domeniul încălzirii prin inducție [88] pentru sistemul constructiv al benzilor se determină puterea absorbită de curenții induși și respectiv cedată de conductor. Considerată ca o pierdere suplimentară a conductorului de fază rezistența suplimentară are expresia :

$$\Delta R_{cb} = \frac{3}{\sqrt{2} \pi \delta^2 \sigma} \left[\frac{\operatorname{sh} y + \sin y}{\operatorname{ch} y - \cos y} \left(\frac{1}{\alpha_2} - \frac{1}{\alpha_1} \right) - \frac{4}{\sqrt{\alpha_2 \alpha_1}} \frac{\operatorname{sh} \frac{y}{2} \cos \frac{y}{2} + \operatorname{ch} \frac{y}{2} \sin \frac{y}{2}}{\operatorname{ch} y - \cos y} \right] \quad (2.6)$$

în care : $y = \sqrt{2} (\alpha_2 - \alpha_1)$; $\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$ - adâncimea de pătrundere

$$\alpha_1 = \sqrt{2} \frac{r_1}{\delta}$$

$$\alpha_2 = \sqrt{2} \frac{r_2}{\delta}$$

σ — conductivitatea materialului feromagnetic ;

μ — permeabilitatea magnetică ;

r_1, r_2 — razele, exterioară și interioară, ale benzilor

Rezistența suplimentară ca urmare a efectului pelicular se determină cu expresia [5, 88] :

$$\Delta R_{cp} = \left[\frac{a}{\sqrt{2} \delta} F_1(\alpha a) - 1 \right] R_{cc} \quad (2.7)$$

în care :

a - raza conductorului

$$F_1(\alpha a) = \frac{\operatorname{ber}(\alpha a) \operatorname{bei}'(\alpha a) - \operatorname{bei}(\alpha a) \operatorname{ber}'(\alpha a)}{[\operatorname{ber}'(\alpha a)]^2 + [\operatorname{bei}'(\alpha a)]^2} ; \alpha a = \frac{\sqrt{2} a}{\delta} \quad (2.8)$$

Calculându-se, pentru conductoare de aluminiu multifilare, rezistența suplimentară ca urmare a efectului particular s-au obținut valorile din tabelul nr. 2.1.

Tabelul nr.2.1

Secțiunea conductorului (mm ²)	Diame- trul conduc- toru- lui (mm)	Adânci- mea de pătrun- dere δ (mm)	$\frac{a}{\delta}$	R ₀ (Ωkm ⁻¹)	R (Ωkm ⁻¹)	ΔR _{cp} (Ωkm ⁻¹)	R _{cp} (%)
16	5,10	11,97	0,213	1,766	1,766	0	0
25	6,42	11,97	0,268	1,130	1,130	0	0
35	7,56	11,97	0,316	0,807	0,807	0	0
50	8,90	11,97	0,372	0,565	0,565	0	0
70	10,70	11,97	0,447	0,404	0,404	0	0
95	12,60	11,97	0,526	0,297	0,297	0	0
120	14,21	11,97	0,594	0,236	0,236	0	0
150	15,17	11,97	0,634	0,188	0,188	0	0
185	17,64	11,97	0,737	0,153	0,1538	0,0008	0,52
240	20,25	11,97	0,846	0,118	0,1192	0,0012	1,02
300	22,68	11,97	0,947	0,094	0,0953	0,0013	1,40
400	25,65	11,97	1,072	0,0707	0,0725	0,0018	2,545
500	28,80	11,97	1,204	0,0565	0,0592	0,0027	4,78

Rezistența suplimentară ca urmare a efectului de proximitate cu un conductor circular paralel se determină cu relația [88] :

$$\Delta R_{cv} = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{\mu f}{10\sigma}} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{a}{h}\right)^2}} - 1 \right) l \quad (2.9)$$

în care:

2h - distanța între axele conductoarelor ;

l - lungimea conductoarelor.

În cazul în care conductorul este paralel cu o placă metalică, rezistența suplimentară ca urmare a efectului de proximitate se determină cu relația [88] :

$$\Delta R_{cv} = \frac{1}{h} \sqrt{\frac{\mu f}{10\sigma}} \cdot l \quad (2.10)$$

2.2.2. Rezistența învelișului metalic diamagnetic

Învelișul diamagnetic al unui cablu, cu rol principal de element constructiv care asigură un câmp electric radial, este realizat în mai multe variante, dintre care două sînt folosite în mod curent. La una din variante materialul folosit este plumbul sub formă de înveliș cilindric continuu, iar la cealaltă cuprul sub formă de benzi, respectiv fire spiralate.

Din punct de vedere electric învelișul metalic diamagnetic poate avea rol de element conductor. Notînd cu $R_{\hat{ic}}$ rezistența învelișului unei faze în curent continuu și cu $R_{\hat{i}}$ rezistența acestuia în curent alternativ, se poate scrie relația :

$$R_{\hat{i}} = R_{\hat{ic}}(1 + k_{\hat{i}}) \quad (2.11)$$

în care $k_{\hat{i}}$ exprimă creșterea rezistenței în curent alternativ.

Pentru calculul rezistenței învelișurilor din benzi sau fire de cupru în curent continuu se folosește relația [24, 61] :

$$R_{\hat{ic}} = \frac{\rho \cdot l}{n s \cos \beta} \quad (2.12)$$

în care :

- ρ - rezistivitatea cuprului ;
- β - unghiul elicei benzilor sau spirelor ;
- n - numărul de benzi sau spire ;
- s - secțiunea benzilor sau spirelor ;
- l - lungimea cablului.

Se folosesc următoarele notații pentru rezistențele suplimentare ale învelișului metalic diamagnetic : $\Delta R_{\hat{ip}}$ - rezistența suplimentară ca urmare a efectului pelicular ; $\Delta R_{\hat{iv}}$ - rezistența suplimentară ca urmare a efectului de proximitate.

Rezistența suplimentară datorată pierderilor în benzile feromagnetice fiind inclusă în rezistența conductorului în condițiile pct.2.2.1, nu se introduce și în rezistența învelișului.

Cu aceste precizări se poate scrie :

$$R_{\hat{i}} = R_{\hat{ic}} + \Delta R_{\hat{ip}} + \Delta R_{\hat{iv}} \quad (2.13)$$

sau :

$$R_{\hat{i}} = R_{\hat{ic}}(1 + K_{\hat{ip}} + K_{\hat{iv}}) \quad (2.14)$$

în care :

$$K_{\hat{ip}} = \frac{\Delta R_{\hat{ip}}}{R_{\hat{ic}}} ; \quad K_{\hat{iv}} = \frac{\Delta R_{\hat{iv}}}{R_{\hat{ic}}} \quad (2.15)$$

Datorită grosimilor relativ mici a învelișurilor metalice diamagnetice (1 ~ 2 mm) efectul pelicular nu se face resimțit și deci în calculele care se prezintă în lucrare în continuare se poate neglija rezistența suplimentară corespunzătoare acestui efect.

În ceea ce privește rezistența suplimentară ca urmare a efectului de proximitate sînt valabile precizările de la punctul 2.2.1.

În condițiile specifice cablurilor pozate în pămînt, de regulă efectul de proximitate se poate neglija [45] și deci relația (2.13) devine :

$$R'_i \cong R_{ic} \quad (2.16)$$

2.2.3. Rezistența căii de întoarcere prin pămînt

Problema determinării parametrilor căii de întoarcere prin pămînt a constituit obiectul a numeroase studii. Printre autorii care au analizat această problemă sînt: R. Rüdénberg, O. Mayr, F. Pollaczek, J.R. Carson s.a. Una din relațiile de calcul a rezistenței căii de întoarcere prin pămînt [56, 91] este :

$$R'_p = 10^{-4} \cdot \pi^2 f \quad [\Omega / \text{km}] \quad (2.17)$$

De reamînă, la aceasta se adună rezistența prizelor de pămînt R''_p , rezistența căii de întoarcere fiind :

$$R_p = R'_p + R''_p \quad (2.18)$$

Corespunzător celor precizate în [25, 56, 91, 92] privind determinarea rezistenței căii de întoarcere prin pămînt, rezultă o creștere a acesteia cu frecvența și lungimea.

2.3. Reactanțele induse în cablurile

În cazul unei linii de cablu se pot identifica următoarele tipuri de reactanțe proprii și două tipuri de reactanțe reciproce: reactanța proprie a conductorului, respectiv a învelișului și reactanța mutuală între conductoare (sau învelișuri), respectiv între conductoare și învelișuri.

Calculul acestora se efectuează considerând pământul ca un conductor fictiv de întoarcere a curentului [5], conform fig. 2.2.

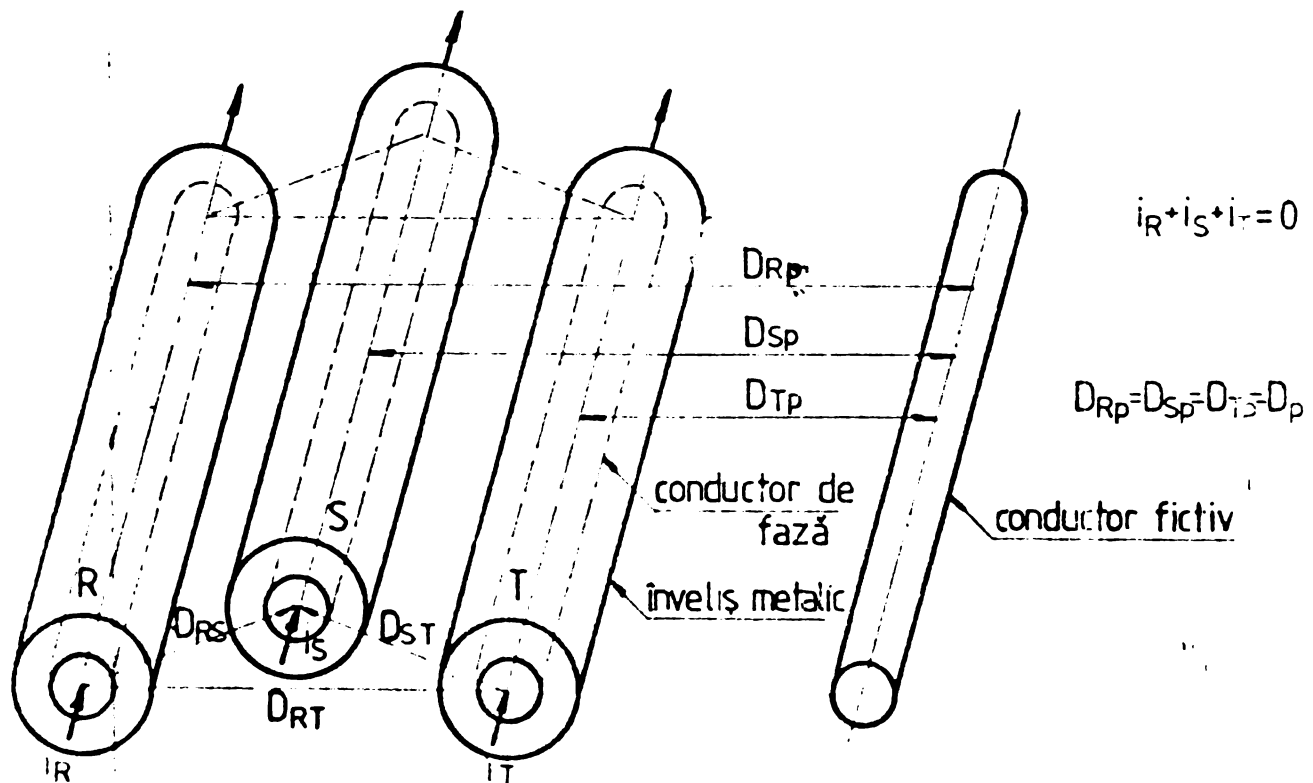


fig. 2.2.

Considerarea pământului drept cale de întoarcere este convenabilă atât datorită faptului că el prezintă caracteristici diferite față de conductoare (conținutul de fier și învelișurile) și datorită faptului că sunt stabilite formulele pentru calculul impedanței unei bucle conductor-pământ și impedanței reciproce între două bucle conductor-pământ.

Conductorul fictiv se consideră paralel cu conductoarele fazelor și depărtat de acestea, astfel încât distanțele D_{R_p} , D_{S_p} , D_{T_p} să poată fi considerate egale, devenind D_p . De asemenea, câmpul magnetic creat de curentul din conductoarele de fază la distanța D_p este practic nul. Pentru determinarea distanței D_p , în literatura de specialitate [5, 56, 91] se folosesc diferite relații, în prezenta lucrare utilizându-se relația dedusă de J.R.Carson [91] :

$$D_p = 658,368 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (\text{m}) \quad (2.19)$$

în care :

ρ - rezistivitatea solului ($\Omega \text{ m}$)

f - frecvența rețelei (Hz)

Pentru frecvența de 50 Hz și rezistivitatea solului avînd valorile 50 ; 100 ; 500 $\Omega \text{ m}$ rezultă pentru D_p valorile 658,3 ; 930,9 ; 2081,9 m ; valori similare cu cele indicate în literatura de specialitate.

Calculul reactanțelor proprii și mutuale se efectuează pe baza relațiilor existente în literatura de specialitate [5].

Pentru creerea posibilității de transferare a acestor reactanțe în căile de parcurgere a curentului de scurtcircuit monofazat (conductor, înveliș, pămînt) se introduce o metodă de divizare a reactanțelor proprii și mutuale în reactanțe parțiale. Aceasta presupune considerarea unei suprafețe cilindrice de separație, coaxială cu cablul, a cărei rază de 30 cm s-a adoptat luînd în considerare: cuprinderea în interiorul cilindrului a tipurilor constructive uzuale de cabluri; situarea cilindrului în zona de trecere a intensității câmpului magnetic la variație lentă;

creerea condițiilor de determinare în laborator a reactanțelor parțiale dependente de construcția cablului.

Expresiile reactanțelor parțiale cât și a reactanțelor inductive proprii și mutuale, în funcție de primele, sînt prezentate în continuare în acest subcapitol.

În relațiile de calcul s-au folosit deasemeni noțiunile de rază medie geometrică (RMG) și distanță medie geometrică (DMG). Expresia razei medii geometrice este dată de relația [5]:

$$RMG = re^{-\frac{\mu_r}{4}} \quad (2.20)$$

La conductoarele masive, neferomagnetice ($\mu_r \cong 1$), de secțiune circulară $RMG = 0,778 r$.

Distanța medie geometrică, mărime care intervine în cazul reactanțelor mutuale, în cazul a două secțiuni circulare este egală cu distanța între centrele secțiunilor [5, 32, 35, 45, 61]. La aceeași egalitate se ajunge și pentru distanțele între un conductor de fază și învelișul fazei învecinate cât și pentru învelișuri între ele [35, 61]. Pentru cazul liniilor realizate în cablu trifazat, cu dispunerea simetrică a fazelor, distanța medie geometrică este :

$$DMG = \sqrt[3]{D_{RS} \cdot D_{RT} \cdot D_{ST}} = D_{RS} = D_{RT} = D_{ST} \quad (2.21)$$

2.3.1. Reactanța inductivă a conductorului de fază

În sistemul format din trei conductoare de fază, învelișurile metalice aferente și conductorul fictiv de întoarcere a curenților se disting următoarele reactanțe inductive aferente unuia din conductoarele de fază : reactanța proprie, reactanțe mutuale și reactanța de fază a conductorului [5]

464333
340 E

Reactanța proprie a unui conductor de fază de lungime l cu cale de întoarcere prin pământ este dată de relația [5] :

$$X_{RR} = \frac{\omega \mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{D_p}{r} + \frac{\omega \mu l}{8\pi} \quad (2.22)$$

Folosind noțiunea de rază medie geometrică pentru conductor, RMG_{1c} și separînd fluxul magnetic total în cele două componente interior și exterior cilindrului concentric de rază $R = 30$ cm, se poate scrie [45] :

$$X_{RR} = \frac{\omega \mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{D_p}{30} + \frac{\omega \mu l}{2\pi} \ln \frac{30}{RMG_{1c}} = \frac{\omega \mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{D_p}{30} + \ln \frac{30}{RMG_{1c}} \right) \quad (2.23)$$

sau folosind noțiunea de reactanțe parțiale :

$$X_{RR} = X_a + X_p \quad (2.24)$$

în care, componentele X_a și X_p pentru $l = 1$ km, $f = 50$ Hz și $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m, au expresiile :

$$X_a = \frac{1000 \omega \mu_0}{2\pi} \ln \frac{30}{RMG_{1c}} = 0,1445 \lg \frac{30}{RMG_{1c}} \quad (\Omega \text{ km}^{-1}) \quad (2.25)$$

$$X_p = \frac{1000 \omega \mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_p}{30} = 0,1445 \lg \frac{D_p}{30} \quad (\Omega \text{ km}^{-1})$$

În relația (2.24) X_a reprezintă reactanța corespunzătoare fluxului magnetic din interiorul cilindrului cu raza de 30 cm, iar X_p reactanța corespunzătoare din exteriorul aceluiaș cilindru pînă la conductorul fictiv de întoarcere a curentului prin pământ.

./.

Din analiza relațiilor (2.24) și (2.25) se observă că reactanța proprie a unui conductor de fază, pentru o anumită frecvență, este funcție numai de raza medie geometrică și distanța pînă la calea de întoarcere a curenților. Într-un sistem trifazat, conductoarele au aceeași rază medie geometrică, ceea ce conduce la :

$$X_{RR} = X_{SS} = X_{TT} = X_R \quad (2.26)$$

Reactanța de fază a conductorului fazei R de lungime l într-un sistem trifazat, în prezența celor trei curenți de fază pentru care este valabilă condiția $i_R + i_S + i_T = 0$, este dată de relația [5, 45] :

$$X_R^R = \frac{\omega \mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{DMG_{3c}}{RMG_{1c}} \quad (2.27)$$

în care DMG_{3c} este distanța medie geometrică a celor trei conductoare de fază.

Separînd și în acest caz fluxul magnetic în cele două componente, relația (2.27) poate fi scrisă :

$$X_R^R = \frac{\omega \mu_0 l}{2\pi} \left[\ln \frac{DMG_{3c}}{30} + \ln \frac{30}{RMG_{1c}} \right] \quad (2.28)$$

sau folosind noțiunea de reactanțe parțiale :

$$X_R^R = X_s + X_a \quad (2.29)$$

în care X_a este dată de relația (2.29), iar X_s are expresia :

$$X_s = \frac{1000 \omega \mu_0}{2\pi} \ln \frac{DMG_{3c}}{30} \quad (\Omega \text{ km}^{-1}) \quad (2.30)$$

pentru $l = 1 \text{ km}$, $f = 50 \text{ Hz}$ și $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$

Se observă că reactanța de fază a unui conductor este funcție numai de distanța medie geometrică a conductoarelor

cablului și de rază medie geometrică a acestora. Pentru un cablu cu conductoarele de fază de aceeași secțiune, se poate scrie :

$$X_{R}^R = X_{S}^R = X_{T}^R = X_{R}^R \quad (2.31)$$

În relația (2.29), X_S reprezintă reactanța aferentă fluxului cuprins între cilindrul cu rază $R = 30$ cm și distanța medie geometrică a cablului.

Din analiza figurii 2.2, pentru conductorul de fază R se disting două reactanțe mutuale :

- reactanțele mutuale între conductorul de fază și fiecare din celelalte două conductoare de fază, pe care le notăm cu X_{RS} și X_{RT} ;

- reactanțele mutuale între conductorul de fază și învelișul metalic propriu, respectiv învelișurile metalice ale celorlalte două faze, pe care le notăm cu X_{RiR} , X_{RiS} și X_{RiT} .

Intr-un sistem trifazat cu dispunerea simetrică a conductoarelor, pentru reactanțele mutuale între conductoarele de fază este valabilă relația :

$$X_{RS} = X_{RT} = X_{R} - X_{R}^R \quad (2.32)$$

Din relațiile (2.23), (2.24), (2.25), (2.26), (2.27), (2.28), (2.29), (2.30) și (2.32) rezultă :

$$X_{RS} = \frac{\omega \mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{D_p}{DMG_{3c}} \quad (2.33)$$

respectiv

$$X_{RS} = X_p - X_s \quad (2.34)$$

Pentru $l = 1$ km, $f = 50$ Hz și $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m

relația (2.33) devine :

./.

$$X_{RS} = 0,1445 \lg \frac{D_p}{D_{MG3c}} \quad (\Omega \text{ km}^{-1}) \quad (2.35)$$

Intr-un sistem trifazat reactanța mutuală între un conductor și învelișul diamagnetic aferent poate fi calculată astfel :

$$X_{R\hat{r}_R} = \frac{\omega \mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{D_p}{r_m} = \frac{\omega \mu_0 l}{2\pi} \left[\ln \frac{D_p}{30} + \ln \frac{30}{r_m} \right] \quad (\Omega \text{ km}^{-1}) \quad (2.36)$$

în care r_m este raza medie a învelișului, dată de relația $r_m = \frac{r_e + r_i}{2}$,

r_e și r_i fiind razele, exterioară și interioară ale acestuia.

Folosind noțiunea de reactanțe parțiale, relația (2.36) se mai poate scrie

$$X_{R\hat{r}_R} = X_p + X_{\hat{r}_a} \quad (2.37)$$

în care X_p este dată de (2.25), iar $X_{\hat{r}_a}$ de relația :

$$X_{\hat{r}_a} = \frac{1000 \omega \mu_0}{2\pi} \ln \frac{30 \cdot 2}{r_e + r_i} = 0,1445 \lg \frac{30 \cdot 2}{r_e + r_i} \quad (\Omega \text{ km}^{-1}) \quad (2.38)$$

pentru $l = 1 \text{ km}$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$, $f = 50 \text{ Hz}$.

Pe considerente de simetrie se poate accepta că :

$$X_{R\hat{r}_R} = X_{S\hat{r}_S} = X_{T\hat{r}_T} = X_{R\hat{r}_i} \quad (2.39)$$

Reactanțele mutuale între un conductor de fază și învelișurile diamagnetice ale celorlalte două faze într-un sistem trifazat cu dispunere simetrică, au aceleași valori cu reactanțele mutuale între conductoarele de fază, învelișul fiind un conductor concentric cu conductorul de fază. În condițiile precizate la pct.2.3 referitoare la distanțe medii geometrice [35, 61] rezultă :

$$X_{R\hat{r}_S} = X_{R\hat{r}_T} = X_{S\hat{r}_R} = X_{S\hat{r}_T} = X_{T\hat{r}_R} = X_{T\hat{r}_S} = X_{RS} \quad (2.40)$$

Prin urmare pentru calculul lor se vor utiliza relațiile (2.33), (2.34), (2.35).

./.

Luarea în considerare a efectului pelicular, a efectului de proximitate, etc, impune introducerea unor reactanțe inductive suplimentare ale conductorului de fază care se determină după cum urmează :

- Reactanța suplimentară a conductorului de fază, $K \Delta X_{cb}$, ca urmare a pierderilor în benzile feromagnetice, se manifestă numai în cazul prezenței curenților omopolari, deci se va lua în considerare numai la determinarea impedanței omopolare.

Pe baza unor considerații analoge celor prezentate în legătură cu rezistența suplimentară, corespunzătoare aceluiași pierderi, expresia lui ΔX_{cb} este :

$$\Delta X_{cb} = \frac{3}{\sqrt{2} \pi \delta^2 \sigma} \left[\frac{\operatorname{sh} y + \sin y}{\operatorname{ch} y - \cos y} \left(\frac{1}{\alpha_2} + \frac{1}{\alpha_1} \right) + \frac{4}{\sqrt{\alpha_1 \alpha_2}} \frac{\operatorname{ch} \frac{y}{2} \sin \frac{y}{2} - \operatorname{sh} \frac{y}{2} \cos \frac{y}{2}}{\operatorname{ch} y - \cos y} \right] \quad (2.41)$$

în care semnificația mărimilor s-a precizat în paragraful 2.2.1.

- Reactanța suplimentară a conductorului de fază ca urmare a prezenței efectului pelicular se determină cu relația [88] :

$$\Delta X_{cp} = \frac{R \delta \cdot 10^3}{\sqrt{2} \pi a} F_2(\alpha_a) - (X_a + X_p) \quad (2.42)$$

în care $R \delta = \frac{l}{\sigma \delta}$, $F_2(\alpha_a) = \frac{\operatorname{ber}(\alpha_a) \operatorname{ber}'(\alpha_a) + \operatorname{bei}(\alpha_a) \operatorname{bei}'(\alpha_a)}{[\operatorname{ber}'(\alpha_a)]^2 + [\operatorname{bei}'(\alpha_a)]^2}$

iar celelalte mărimi sînt precizate la paragraful 2.2.1.

În tabelul 2.2. sînt prezentate sintetic relațiile de calcul pentru reactanțe în funcție de reactanțele parțiale și suplimentare ale cablurilor cu și fără benzi feromagnetice de protecție, într-un sistem trifazat simetric.

Tabelul 2.2

Reactanța	Cabluri fără benzi feromagnetice de protecție	Cabluri cu benzi feromagnetice de protecție
1	2	3
$X_R = X_S = X_T = X_R$	$X_a + X_p + \Delta X_{cp}$	$X_a + X_p + \Delta X_{cp} + K\Delta X_{cb}$
$X_R^R = X_S^R = X_T^R = X_R^R$	$X_a + X_s + \Delta X_{cp}$	$X_a + X_s + \Delta X_{cp} + K\Delta X_{cb}$
$X_{RS} = X_{RT} = X_{ST} = X_{RS}$	$X_p - X_s$	$X_p - X_s$
$X_{R\hat{I}_R} = X_{S\hat{I}_S} = X_{T\hat{I}_T} = X_{R\hat{I}}$	$X_{\hat{I}a} + X_p$	$X_{\hat{I}a} + X_p$
$X_{R\hat{I}_S} = X_{R\hat{I}_T} = X_{S\hat{I}_R} =$ $X_{S\hat{I}_T} = X_{T\hat{I}_R} = X_{T\hat{I}_S} =$ $= X_{R\hat{I}_S}$	$X_p - X_s$	$X_p - X_s$

Din analiza tabelului 2.2. se observă că intervin 5 reactanțe diferite (col.1) determinate în 2 variante în funcție de construcția cablurilor. Aceste reactanțe se pot calcula, dacă se cunosc 4 reactanțe parțiale, X_a , $X_{\hat{I}a}$, X_s și X_p și 2 reactanțe suplimentare, ΔX_{cp} și ΔX_{cb} .

Reactanțele parțiale X_a , $X_{\hat{I}a}$ și cele suplimentare ΔX_{cp} și ΔX_{cb} sînt dependente numai de constantele geometrice ale cablului fiind niște mărimi caracteristice fiecărui tip de cablu. Este posibil deci ca aceste mărimi să fie conținute în tabelele ce cuprind caracteristicile cablului, date de fabricant.

Reactanța X_s este o mărime, dependentă numai de distanțele între conductoare, respectiv de distanța medie geometrică, iar valorile acesteia se pot cuprinde în tabele.

Reactanța parțială X_p este dependentă numai de natura solului în care este pozat cablul, tabele cu valorile lui X_p pentru

diferite valori ale lui φ fiind ușor de întocmit.

Prin urmare calculul reactanțelor din tabelul 2.2. se reduce la operații simple efectuate cu mărimi extrase din diferite tabele

2.3.2. Reactanțele inductive ale învelișurilor metalice diamagnetice

Învelișurile metalice diamagnetice ale cablurilor analizate pot constitui căi de curent în anumite condiții de funcționare. Considerată ca elemente conductoare, învelișurile metalice diamagnetice formează circuite similare cu cele ale conductoarelor de fază.

În cazul învelișurilor metalice diamagnetice ale cablurilor pozate în pământ, efectul pelicular și de proximitate nu se fac practic simțite.

În lucrare se folosesc următoarele notații pentru reactanțele învelișurilor metalice diamagnetice :

$$X_{\hat{i}RR} = X_{\hat{i}SS} = X_{\hat{i}TT} = X_{\hat{i}} \quad , \text{ reactanța proprie a unui înveliș ;}$$

$$X_{\hat{i}SS}^R = X_{\hat{i}SS}^R = X_{\hat{i}TT}^R = X_{\hat{i}}^R \quad , \text{ reactanța de fază a unui înveliș ;}$$

$$X_{\hat{i}R\hat{i}S} = X_{\hat{i}R\hat{i}T} = X_{\hat{i}S\hat{i}T} = X_{\hat{i}RS} \quad , \text{ reactanța mutuală dintre două învelișuri.}$$

Reactanța proprie a unui înveliș de lungime l este dată de relația (2.23), cu observația că în loc de RMG_{1e} avem $r_m = \frac{r_e + r_i}{2}$, r_e și r_i fiind razele, exterioară și interioară ale acestuia. Deci

$$X_{\hat{i}} = \frac{\omega \mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{D_p}{30} \cdot \frac{30}{r_m} = \frac{\omega \mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{D_p}{30} + \ln \frac{2 \cdot 30}{r_e + r_i} \right) \quad (2.43)$$

sau folosind noțiunea de reactanțe parțiale :

$$X_{\hat{i}} = X_p + X_{\hat{i}a} \quad (2.44)$$

în care : X_p este dată de relația (2.25), iar

$$X_{\hat{i}a} = \frac{1000 \omega \mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{2 \cdot 30}{r_e + r_i} = 0,1445 \lg \frac{2 \cdot 30}{r_e + r_i} \quad (\Omega \text{ km}^{-1}) \quad (2.45)$$

pentru $l = 1 \text{ km}$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$; $f = 50 \text{ Hz}$.

Reactanța de fază a unui înveliș este dată de relația (2.26) cu aceeași observație că RMG_{1c} devine $r_m = \frac{r_e + r_i}{2}$. Deci:

$$X_{\hat{i}}^R = \frac{\omega \mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{DMG_{3c}}{30} + \ln \frac{30}{r_m} \right) \quad (2.46)$$

sau folosind noțiunea de reactanțe principale :

$$X_{\hat{i}}^R = X_s + X_{\hat{i}a} \quad (2.47)$$

în care X_s este dată de relația (2.30), iar $X_{\hat{i}a}$ de relația (2.45)

Reactanța mutuală dintre două învelișuri ale unui cablu trifazat de construcție simetrică, la care distanța medie geometrică este aceeași și egală cu distanța dintre conductoarele de fază [32], este dată de relația [5, 45] :

$$X_{\hat{i}RS} = X_{\hat{i}RR} - X_{\hat{i}RR}^R = X_{\hat{i}} - X_{\hat{i}}^R = X_p - X_s \quad (2.48)$$

În tabelul 2.3. sînt prezentate sintetic relațiile de calcul pentru reactanțele învelișurilor diamagnetice în funcție de reactanțele parțiale și suplimentare, într-un sistem trifazat simetric

Tabelul 2.3.

Reactanța	Cabluri fără benzi feromagnetice de protecție	Cabluri cu benzi feromagnetice de protecție
1	2	3
$X_{\hat{i}RR} = X_{\hat{i}SS} = X_{\hat{i}TT} = X_{\hat{i}}$	$X_{\hat{i}a} + X_p$	$X_{\hat{i}a} + X_p$
$X_{\hat{i}RR}^R = X_{\hat{i}SS}^R = X_{\hat{i}TT}^R = X_{\hat{i}}^R$	$X_{\hat{i}a} + X_s$	$X_{\hat{i}a} + X_s$
$X_{\hat{i}R\hat{i}S} = X_{\hat{i}R\hat{i}T} = X_{\hat{i}S\hat{i}T} = X_{\hat{i}RS}$	$X_p - X_s$	$X_p - X_s$

Din analiza tabelului 2.3 se observă că intervin 3 reactanțe diferite (col.1) determinate în 2 variante în funcție de construcția cablurilor.

Se observă că în calculul acestor mărimi intervin reactanțele parțiale $X_{\hat{a}}$, X_s și X_p ale căror valori au fost stabilite la calculul reactanțelor conductoarelor cablului (vezi tabelul 2.2) Se evidențiază încă odată avantajul metodei introducerii reactanțelor parțiale și a tabelării acestora, ușurându-se astfel considerabil calculul reactanțelor.

3. IMPEDANTELE DE SECVENTA ALE CABLURILOR MONOFAZATE IN MONTAJ TRIFAZAT

3.1. Calculul matricii impedanță echivalentă

Pentru determinarea impedanțelor de secvență ecuațiile

(2.1) se scriu matricial :

$$[\underline{U}] = [\underline{Z}] \cdot [\underline{I}] \quad (3.1)$$

în care intervin matricile :

$$[\underline{U}]_t = \begin{bmatrix} U_R & U_S & U_T & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$[\underline{Z}] = \begin{bmatrix} Z_{RR} & Z_{RS} & Z_{RT} & Z_{R\hat{R}} & Z_{R\hat{S}} & Z_{R\hat{T}} \\ Z_{SR} & Z_{SS} & Z_{ST} & Z_{S\hat{R}} & Z_{S\hat{S}} & Z_{S\hat{T}} \\ Z_{TR} & Z_{TS} & Z_{TT} & Z_{T\hat{R}} & Z_{T\hat{S}} & Z_{T\hat{T}} \\ Z_{\hat{R}R} & Z_{\hat{R}S} & Z_{\hat{R}T} & Z_{\hat{R}R} & Z_{\hat{R}S} & Z_{\hat{R}T} \\ Z_{\hat{S}R} & Z_{\hat{S}S} & Z_{\hat{S}T} & Z_{\hat{S}R} & Z_{\hat{S}S} & Z_{\hat{S}T} \\ Z_{\hat{T}R} & Z_{\hat{T}S} & Z_{\hat{T}T} & Z_{\hat{T}R} & Z_{\hat{T}S} & Z_{\hat{T}T} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$[\underline{I}] = \begin{bmatrix} I_R & I_S & I_T & I_{\hat{R}} & I_{\hat{S}} & I_{\hat{T}} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Considerîndu-se linia subterană trifazată realizată din cabluri monopolare identice și dispuse simetric, rezultă egalitățile:

$$\begin{aligned}
 \underline{Z}_{RR} = \underline{Z}_{SS} = \underline{Z}_{TT} = \underline{Z}_R & \quad ; \quad \underline{Z}_{\hat{i}RR} = \underline{Z}_{\hat{i}SS} = \underline{Z}_{\hat{i}TT} = \underline{Z}_{\hat{i}} & ; \\
 \underline{Z}_{RS} = \underline{Z}_{RT} = \underline{Z}_{ST} = \underline{Z}_{RS} & \quad ; \quad \underline{Z}_{R\hat{i}S} = \underline{Z}_{S\hat{i}T} = \underline{Z}_{R\hat{i}T} = & (3.5) \\
 \underline{Z}_{R\hat{i}R} = \underline{Z}_{S\hat{i}S} = \underline{Z}_{T\hat{i}T} = \underline{Z}_{R\hat{i}} & \quad ; \quad = \underline{Z}_{S\hat{i}R} = \underline{Z}_{T\hat{i}S} = \underline{Z}_{T\hat{i}R} = \underline{Z}_{R\hat{i}S} \\
 \underline{Z}_{\hat{i}R\hat{i}S} = \underline{Z}_{\hat{i}R\hat{i}T} = \underline{Z}_{\hat{i}S\hat{i}T} = \underline{Z}_{\hat{i}RS} &
 \end{aligned}$$

astfel că pentru matricea impedanță \underline{Z} rezultă expresia :

$$[\underline{Z}] = \begin{bmatrix} \underline{Z}_R & \underline{Z}_{RS} & \underline{Z}_{RS} & \underline{Z}_{R\hat{i}} & \underline{Z}_{R\hat{i}S} & \underline{Z}_{R\hat{i}S} \\ \underline{Z}_{RS} & \underline{Z}_R & \underline{Z}_{RS} & \underline{Z}_{R\hat{i}S} & \underline{Z}_{R\hat{i}} & \underline{Z}_{R\hat{i}S} \\ \underline{Z}_{RS} & \underline{Z}_{RS} & \underline{Z}_R & \underline{Z}_{R\hat{i}S} & \underline{Z}_{R\hat{i}S} & \underline{Z}_{R\hat{i}} \\ \underline{Z}_{R\hat{i}} & \underline{Z}_{R\hat{i}S} & \underline{Z}_{R\hat{i}S} & \underline{Z}_{\hat{i}} & \underline{Z}_{\hat{i}RS} & \underline{Z}_{\hat{i}RS} \\ \underline{Z}_{R\hat{i}S} & \underline{Z}_{R\hat{i}} & \underline{Z}_{R\hat{i}S} & \underline{Z}_{\hat{i}RS} & \underline{Z}_{\hat{i}} & \underline{Z}_{\hat{i}RS} \\ \underline{Z}_{R\hat{i}S} & \underline{Z}_{R\hat{i}S} & \underline{Z}_{R\hat{i}} & \underline{Z}_{\hat{i}RS} & \underline{Z}_{\hat{i}RS} & \underline{Z}_{\hat{i}} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Introducînd următoarele submatrici :

$$\begin{aligned}
 [\underline{Z}_c] = \begin{bmatrix} \underline{Z}_R & \underline{Z}_{RS} & \underline{Z}_{RS} \\ \underline{Z}_{RS} & \underline{Z}_R & \underline{Z}_{RS} \\ \underline{Z}_{RS} & \underline{Z}_{RS} & \underline{Z}_R \end{bmatrix} & \quad [\underline{Z}_m]_t = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{R\hat{i}} & \underline{Z}_{R\hat{i}S} & \underline{Z}_{R\hat{i}S} \\ \underline{Z}_{R\hat{i}S} & \underline{Z}_{R\hat{i}} & \underline{Z}_{R\hat{i}S} \\ \underline{Z}_{R\hat{i}S} & \underline{Z}_{R\hat{i}S} & \underline{Z}_{R\hat{i}} \end{bmatrix} \\
 [\underline{Z}_m] = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{R\hat{i}} & \underline{Z}_{R\hat{i}S} & \underline{Z}_{R\hat{i}S} \\ \underline{Z}_{R\hat{i}S} & \underline{Z}_{R\hat{i}} & \underline{Z}_{R\hat{i}S} \\ \underline{Z}_{R\hat{i}S} & \underline{Z}_{R\hat{i}S} & \underline{Z}_{R\hat{i}} \end{bmatrix} & \quad [\underline{Z}_{\hat{i}}] = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{\hat{i}} & \underline{Z}_{\hat{i}RS} & \underline{Z}_{\hat{i}RS} \\ \underline{Z}_{\hat{i}RS} & \underline{Z}_{\hat{i}} & \underline{Z}_{\hat{i}RS} \\ \underline{Z}_{\hat{i}RS} & \underline{Z}_{\hat{i}RS} & \underline{Z}_{\hat{i}} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$[\underline{I}_c] = \begin{bmatrix} \underline{I}_R \\ \underline{I}_S \\ \underline{I}_T \end{bmatrix} ; [\underline{I}_f] = \begin{bmatrix} \underline{I}_{fR} \\ \underline{I}_{fS} \\ \underline{I}_{fT} \end{bmatrix} ; [\underline{U}_c] = \begin{bmatrix} \underline{U}_R \\ \underline{U}_S \\ \underline{U}_T \end{bmatrix} ; [\underline{U}_f] = [0] \quad (3.7')$$

sistemul de ecuații (2.1) devine :

$$\begin{bmatrix} [\underline{U}_c] \\ [0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\underline{Z}_c] & [\underline{Z}_m]_t \\ [\underline{Z}_m] & [\underline{Z}_f] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\underline{I}_c] \\ [\underline{I}_f] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\underline{Z}_c] \cdot [\underline{I}_c] + [\underline{Z}_m]_t \cdot [\underline{I}_f] \\ [\underline{Z}_m] \cdot [\underline{I}_c] + [\underline{Z}_f] \cdot [\underline{I}_f] \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

din care rezultă relațiile :

$$[\underline{U}_c] = [\underline{Z}_c] \cdot [\underline{I}_c] + [\underline{Z}_m]_t \cdot [\underline{I}_f] \quad (3.9)$$

$$[0] = [\underline{Z}_m] \cdot [\underline{I}_c] + [\underline{Z}_f] \cdot [\underline{I}_f] \quad (3.10)$$

Prin multiplicarea ecuației (3.10) cu $[\underline{Z}_f]^{-1}$ obținem :

$$[\underline{I}_f] = -[\underline{Z}_f]^{-1} \cdot [\underline{Z}_m] \cdot [\underline{I}_c] \quad (3.11)$$

care introdus în relația (3.9), ne conduce la :

$$[\underline{U}_c] = \left\{ [\underline{Z}_c] - [\underline{Z}_m]_t [\underline{Z}_f]^{-1} [\underline{Z}_m] \right\} [\underline{I}_c] = [\underline{Z}_{c\hat{f}}] \cdot [\underline{I}_c] \quad (3.12)$$

unde :

$$[\underline{Z}_{c\hat{f}}] = [\underline{Z}_c] - [\underline{Z}_m]_t [\underline{Z}_f]^{-1} [\underline{Z}_m] \quad (3.13)$$

Rezolvarea ecuației matriciale (3.13) necesită calculul matricei $[\underline{Z}_f]^{-1}$, care este :

$$[\underline{Z}_f]^{-1} = \frac{1}{(\underline{Z}_{f1} + 2\underline{Z}_{f1RS})(\underline{Z}_{f1} - \underline{Z}_{f1RS})} \begin{bmatrix} \underline{Z}_{f1} + \underline{Z}_{f1RS} & -\underline{Z}_{f1RS} & -\underline{Z}_{f1RS} \\ -\underline{Z}_{f1RS} & \underline{Z}_{f1} + \underline{Z}_{f1RS} & -\underline{Z}_{f1RS} \\ -\underline{Z}_{f1RS} & -\underline{Z}_{f1RS} & \underline{Z}_{f1} + \underline{Z}_{f1RS} \end{bmatrix} \quad (3.13')$$

./.

Matricea $\begin{bmatrix} Z_{c\hat{i}} \end{bmatrix}$ devine :

$$\begin{bmatrix} Z_{c\hat{i}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_c \end{bmatrix} - \frac{1}{(Z_{\hat{i}} + 2Z_{\hat{i}RS})(Z_{\hat{i}} - Z_{\hat{i}RS})} \begin{bmatrix} Z_m \end{bmatrix}_t$$

$$\begin{bmatrix} Z_{\hat{i}} + Z_{\hat{i}RS} & -Z_{\hat{i}RS} & -Z_{\hat{i}RS} \\ -Z_{\hat{i}RS} & Z_{\hat{i}} + Z_{\hat{i}RS} & -Z_{\hat{i}RS} \\ -Z_{\hat{i}RS} & -Z_{\hat{i}RS} & Z_{\hat{i}} + Z_{\hat{i}RS} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_{R\hat{i}} & Z_{R\hat{i}S} & Z_{R\hat{i}S} \\ Z_{R\hat{i}S} & Z_{R\hat{i}} & Z_{R\hat{i}S} \\ Z_{R\hat{i}S} & Z_{R\hat{i}S} & Z_{R\hat{i}} \end{bmatrix}$$

respectiv:

$$\begin{bmatrix} Z_{c\hat{i}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_c \end{bmatrix} - \frac{1}{(Z_{\hat{i}} + 2Z_{\hat{i}RS})(Z_{\hat{i}} - Z_{\hat{i}RS})} \begin{bmatrix} Z_m \end{bmatrix}_t \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

termenii a_{ij} fiind :

$$a_{11} = \frac{Z_{R\hat{i}}(Z_{\hat{i}} + Z_{\hat{i}RS}) - Z_{\hat{i}RS} \cdot Z_{R\hat{i}S} - Z_{\hat{i}RS} \cdot Z_{R\hat{i}S}}{(Z_{\hat{i}} + 2Z_{\hat{i}RS})(Z_{\hat{i}} - Z_{\hat{i}RS})} = \frac{Z_{R\hat{i}}(Z_{\hat{i}} + Z_{\hat{i}RS}) - 2Z_{\hat{i}RS}Z_{R\hat{i}S}}{(Z_{\hat{i}} + 2Z_{\hat{i}RS})(Z_{\hat{i}} - Z_{\hat{i}RS})}$$

$$a_{12} = \frac{Z_{R\hat{i}S}(Z_{\hat{i}} + Z_{\hat{i}RS}) - Z_{R\hat{i}} \cdot Z_{\hat{i}RS} - Z_{\hat{i}RS} \cdot Z_{R\hat{i}S}}{(Z_{\hat{i}} + 2Z_{\hat{i}RS})(Z_{\hat{i}} - Z_{\hat{i}RS})} = \frac{Z_{R\hat{i}S} \cdot Z_{\hat{i}} - Z_{R\hat{i}} \cdot Z_{\hat{i}RS}}{(Z_{\hat{i}} + 2Z_{\hat{i}RS})(Z_{\hat{i}} - Z_{\hat{i}RS})}$$

$$a_{13} = \frac{Z_{R\hat{i}S}(Z_{\hat{i}} + Z_{\hat{i}RS}) - Z_{\hat{i}RS}Z_{R\hat{i}S} - Z_{\hat{i}RS}Z_{R\hat{i}}}{(Z_{\hat{i}} + 2Z_{\hat{i}RS})(Z_{\hat{i}} - Z_{\hat{i}RS})} = \frac{Z_{R\hat{i}S} \cdot Z_{\hat{i}} - Z_{R\hat{i}} \cdot Z_{\hat{i}RS}}{(Z_{\hat{i}} + 2Z_{\hat{i}RS})(Z_{\hat{i}} - Z_{\hat{i}RS})}$$

$$a_{21} = \frac{-Z_{R\hat{i}}Z_{\hat{i}RS} + (Z_{\hat{i}} + Z_{\hat{i}RS})Z_{R\hat{i}S} - Z_{\hat{i}RS}Z_{R\hat{i}S}}{(Z_{\hat{i}} + 2Z_{\hat{i}RS})(Z_{\hat{i}} - Z_{\hat{i}RS})} = \frac{Z_{R\hat{i}S}Z_{\hat{i}} - Z_{R\hat{i}}Z_{\hat{i}RS}}{(Z_{\hat{i}} + 2Z_{\hat{i}RS})(Z_{\hat{i}} - Z_{\hat{i}RS})}$$

$$a_{22} = \frac{-Z_{\hat{i}RS}Z_{R\hat{i}S} + (Z_{\hat{i}} + Z_{\hat{i}RS})Z_{R\hat{i}} - Z_{\hat{i}RS}Z_{R\hat{i}S}}{(Z_{\hat{i}} + 2Z_{\hat{i}RS})(Z_{\hat{i}} - Z_{\hat{i}RS})} = \frac{Z_{R\hat{i}}(Z_{\hat{i}} + Z_{\hat{i}RS}) - 2Z_{\hat{i}RS}Z_{R\hat{i}S}}{(Z_{\hat{i}} + 2Z_{\hat{i}RS})(Z_{\hat{i}} - Z_{\hat{i}RS})}$$

$$a_{23} = \frac{-Z_{\hat{i}RS}Z_{R\hat{i}S} + (Z_{\hat{i}} + Z_{\hat{i}RS})Z_{R\hat{i}S} - Z_{\hat{i}RS}Z_{R\hat{i}}}{(Z_{\hat{i}} + 2Z_{\hat{i}RS})(Z_{\hat{i}} - Z_{\hat{i}RS})} = \frac{Z_{R\hat{i}S}Z_{\hat{i}} - Z_{R\hat{i}}Z_{\hat{i}RS}}{(Z_{\hat{i}} + 2Z_{\hat{i}RS})(Z_{\hat{i}} - Z_{\hat{i}RS})}$$

$$a_{31} = \frac{-Z_{\hat{i}RS}Z_{R\hat{i}} - Z_{\hat{i}RS}Z_{R\hat{i}S} + (Z_{\hat{i}} + Z_{\hat{i}RS})Z_{R\hat{i}S}}{(Z_{\hat{i}} + 2Z_{\hat{i}RS})(Z_{\hat{i}} - Z_{\hat{i}RS})} = \frac{Z_{R\hat{i}S}Z_{\hat{i}} - Z_{R\hat{i}}Z_{\hat{i}RS}}{(Z_{\hat{i}} + 2Z_{\hat{i}RS})(Z_{\hat{i}} - Z_{\hat{i}RS})}$$

$$a_{32} = \frac{-Z_{\hat{i}RS}Z_{R\hat{i}S} - Z_{\hat{i}RS}Z_{R\hat{i}} + (Z_{\hat{i}} + Z_{\hat{i}RS})Z_{R\hat{i}S}}{(Z_{\hat{i}} + 2Z_{\hat{i}RS})(Z_{\hat{i}} - Z_{\hat{i}RS})} = \frac{Z_{R\hat{i}S}Z_{\hat{i}} - Z_{R\hat{i}}Z_{\hat{i}RS}}{(Z_{\hat{i}} + 2Z_{\hat{i}RS})(Z_{\hat{i}} - Z_{\hat{i}RS})}$$

$$a_{33} = \frac{-Z_{\hat{i}RS}Z_{R\hat{i}S} - Z_{\hat{i}RS}Z_{R\hat{i}S} + (Z_{\hat{i}} + Z_{\hat{i}RS})Z_{R\hat{i}}}{(Z_{\hat{i}} + 2Z_{\hat{i}RS})(Z_{\hat{i}} - Z_{\hat{i}RS})} = \frac{Z_{R\hat{i}}(Z_{\hat{i}} + Z_{\hat{i}RS}) - 2Z_{\hat{i}RS}Z_{R\hat{i}S}}{(Z_{\hat{i}} + 2Z_{\hat{i}RS})(Z_{\hat{i}} - Z_{\hat{i}RS})}$$

./.

Prin înmulțire cu matricea $[Z_m]_t$, se obține :

$$[Z_m]_t \cdot \begin{bmatrix} \underline{a}_{11} & \underline{a}_{12} & \underline{a}_{13} \\ \underline{a}_{21} & \underline{a}_{22} & \underline{a}_{23} \\ \underline{a}_{31} & \underline{a}_{32} & \underline{a}_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{b}_{11} & \underline{b}_{12} & \underline{b}_{13} \\ \underline{b}_{21} & \underline{b}_{22} & \underline{b}_{23} \\ \underline{b}_{31} & \underline{b}_{32} & \underline{b}_{33} \end{bmatrix}$$

unde:

$$\begin{aligned} \underline{b}_{11} = \underline{b}_{22} = \underline{b}_{33} &= \underline{Z}_{Ri}^2 (\underline{Z}_{i1} + \underline{Z}_{iRS}) - 2\underline{Z}_{Ri} \underline{Z}_{iRS} \underline{Z}_{RiS} + 2\underline{Z}_{RiS}^2 \underline{Z}_{i1} - 2\underline{Z}_{Ri} \underline{Z}_{iRS} \underline{Z}_{RiS} = \\ &= \underline{Z}_{Ri}^2 (\underline{Z}_{i1} + \underline{Z}_{iRS}) - 2\underline{Z}_{Ri} \underline{Z}_{iRS} \underline{Z}_{RiS} + 2\underline{Z}_{RiS} (\underline{Z}_{RiS} \underline{Z}_{i1} - \underline{Z}_{Ri} \underline{Z}_{iRS}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{b}_{12} = \underline{b}_{13} = \underline{b}_{21} = \underline{b}_{23} = \underline{b}_{31} = \underline{b}_{32} &= \underline{Z}_{Ri} (\underline{Z}_{RiS} \underline{Z}_{i1} - \underline{Z}_{Ri} \underline{Z}_{iRS}) + \underline{Z}_{Ri} \underline{Z}_{RiS} (\underline{Z}_{i1} + \underline{Z}_{iRS}) - \\ &- 2\underline{Z}_{iRS} \underline{Z}_{RiS} + \underline{Z}_{RiS} (\underline{Z}_{RiS} \underline{Z}_{i1} - \underline{Z}_{Ri} \underline{Z}_{iRS}) \end{aligned}$$

Pentru $[Z_{ci}]$ se obține astfel expresia :

$$[Z_{ci}] = \begin{bmatrix} \underline{Z}_R & \underline{Z}_{RS} & \underline{Z}_{RS} \\ \underline{Z}_{RS} & \underline{Z}_R & \underline{Z}_{RS} \\ \underline{Z}_{RS} & \underline{Z}_{RS} & \underline{Z}_R \end{bmatrix} - \frac{1}{(\underline{Z}_{i1} + 2\underline{Z}_{iRS})(\underline{Z}_{i1} - \underline{Z}_{iRS})} \begin{bmatrix} \underline{b}_{11} & \underline{b}_{12} & \underline{b}_{13} \\ \underline{b}_{21} & \underline{b}_{22} & \underline{b}_{23} \\ \underline{b}_{31} & \underline{b}_{32} & \underline{b}_{33} \end{bmatrix}$$

Scriind matricea $[Z_{ci}]$ sub forma :

$$[Z_{ci}] = \begin{bmatrix} \underline{c}_{11} & \underline{c}_{12} & \underline{c}_{13} \\ \underline{c}_{21} & \underline{c}_{22} & \underline{c}_{23} \\ \underline{c}_{31} & \underline{c}_{32} & \underline{c}_{33} \end{bmatrix}$$

./.

pentru termenii c_{ij} se obțin expresiile :

$$\underline{A} = c_{11} = c_{22} = c_{33} = \underline{Z}_R \frac{\underline{Z}_{Ri}^2 (\underline{Z}_i + \underline{Z}_{iRS}) - 2\underline{Z}_{Ri} \underline{Z}_{iRS} \underline{Z}_{RiS} + 2\underline{Z}_{RiS} (\underline{Z}_{RiS} \underline{Z}_i - \underline{Z}_{Ri} \underline{Z}_{iRS})}{(\underline{Z}_i + 2\underline{Z}_{iRS}) (\underline{Z}_i - \underline{Z}_{iRS})} \quad (3.13'')$$

$$\underline{B} = c_{12} = c_{13} = c_{21} = c_{23} = c_{31} = c_{32} =$$

$$\frac{\underline{Z}_{Ri} (\underline{Z}_{RiS} \underline{Z}_i - \underline{Z}_{Ri} \underline{Z}_{iRS}) + \underline{Z}_{Ri} \underline{Z}_{RiS} (\underline{Z}_i + \underline{Z}_{iRS}) - 2\underline{Z}_{iRS} \underline{Z}_{RiS}^2 + \underline{Z}_{RiS} (\underline{Z}_{RiS} \underline{Z}_i - \underline{Z}_{Ri} \underline{Z}_{iRS})}{(\underline{Z}_i + 2\underline{Z}_{iRS}) (\underline{Z}_i - \underline{Z}_{iRS})}$$

3.2. Calculul impedanțelor de secvență

Cu utilizarea matricilor de transformare [13, 36] :

$$[\underline{T}]_I = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \text{ și } [\underline{T}]_U = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

se obține matricea de impedanță în componente simetrice

$$\begin{aligned} [\underline{Z}_S] &= [\underline{T}]_U \cdot [\underline{Z}_{c\hat{i}}] \cdot [\underline{T}]_I \\ &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{A} & \underline{B} & \underline{B} \\ \underline{B} & \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{B} & \underline{B} & \underline{A} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \\ [\underline{Z}_S] &= \begin{bmatrix} \underline{A} - \underline{B} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{A} - \underline{B} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{A} + 2\underline{B} \end{bmatrix} \quad (3.15) \end{aligned}$$

Tinând seama de structura matricei în componente simetrice, se scrie relația

$$[\underline{Z}_S] = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{dd} & \underline{Z}_{di} & \underline{Z}_{dh} \\ \underline{Z}_{id} & \underline{Z}_{ii} & \underline{Z}_{ih} \\ \underline{Z}_{hd} & \underline{Z}_{hi} & \underline{Z}_{hh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A} - \underline{B} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{A} - \underline{B} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{A} + 2\underline{B} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Inlocuind pe \underline{A} și \underline{B} cu expresiile lor (3.13") se obține:

- impedanța de secvență directă (inversă) :

$$\underline{Z}_{dd} = \underline{Z}_{ii} = \underline{A} - \underline{B} =$$

$$\underline{Z}_R - \underline{Z}_{RS} - \left\{ \frac{\underline{Z}_i \left[\underline{Z}_{Ri}^2 - \underline{Z}_{Ri} (\underline{Z}_{iRS} + \underline{Z}_{RiS}) + \underline{Z}_{RiS}^2 \right] + 2\underline{Z}_{iRS} \left[\underline{Z}_{Ri}^2 - 2\underline{Z}_{Ri} \underline{Z}_{RiS} + \underline{Z}_{RiS}^2 \right]}{(\underline{Z}_i + 2\underline{Z}_{iRS}) (\underline{Z}_i - \underline{Z}_{iRS})} \right\} \quad (3.17)$$

In condițiile în care $\underline{Z}_{iRS} = \underline{Z}_{RiS}$

$$\underline{Z}_{dd} = \underline{Z}_R - \underline{Z}_{RS} - \frac{(\underline{Z}_{Ri} - \underline{Z}_{iRS})^2}{\underline{Z}_i - \underline{Z}_{iRS}} \quad (3.17')$$

- impedanța de secvență omopolară :

este:

$$\underline{Z}_{hh} = \underline{A} + 2\underline{B} = \underline{Z}_R + 2\underline{Z}_{RS} - \frac{(\underline{Z}_{Ri} + 2\underline{Z}_{RiS})^2}{\underline{Z}_i + 2\underline{Z}_{iRS}} \quad (3.18)$$

In condițiile în care $\underline{Z}_{iRS} = \underline{Z}_{RiS}$

$$\underline{Z}_{hh} = \underline{Z}_R + 2\underline{Z}_{RS} - \frac{(\underline{Z}_{Ri} + 2\underline{Z}_{iRS})^2}{\underline{Z}_i + 2\underline{Z}_{iRS}} \quad (3.18')$$

./.

3.3. Determinarea impedanțelor de secvență ale liniei subterane funcție de rezistențele și reactanțele parțiale și suplimentare

Din analiza expresiilor finale ale impedanțelor de secvență directă, inversă și omopolară rezultă că pentru calculul lor este necesară cunoașterea următoarelor impedanțe ale cablurilor :

$$\underline{Z}_R ; \underline{Z}_1 ; \underline{Z}_{RS} ; \underline{Z}_{R1} ; \underline{Z}_{1RS} ; \underline{Z}_{1S}$$

\underline{Z}_R este impedanța proprie a buclei conductor-pământ

și se poate scrie cu formula :

$$\underline{Z}_R = R_c + R_p + jX_R \quad (3.19)$$

Pentru cablurile fără benzi feromagnetice de protecție și pentru secvența directă la cablurile cu benzi feromagnetice de protecție $R_c = R'_c$, cu $\Delta R_{cb} = 0$ în relația (2.5), iar X_R se ia din tabelul 2.2. coloana 2, deci (3.19) devine :

$$\underline{Z}_R = R'_c + R_p + j(X_a + X_p + \Delta X_{cp}) \quad (3.20)$$

Pentru cablurile cu benzi feromagnetice de protecție și în cazul prezenței curenților omopolari $R_c = R'_c + K\Delta R_{cb}$, conform relației (2.5), iar X_R se ia din tabelul 2.2. col.3, deci relația (3.19) devine :

$$\underline{Z}_R = R'_c + K\Delta R_{cb} + R_p + j(X_a + X_p + \Delta X_{cp} + K\Delta X_{cb}) \quad (3.21)$$

\underline{Z}_1 este impedanța proprie a buclei înveliș metalic-

pământ și se poate scrie sub formula :

$$\underline{Z}_1 = R'_1 + R_p + jX_1 \quad (3.22)$$

în care R'_1 este dat de relația (2.16), iar X_1 se ia din tabelul 2.3 col.2, deci relația (3.22) devine :

$$\underline{Z}_{\hat{i}} = R_{\hat{i}}' + R_p + j(X_{\hat{i}a} + X_p) \quad (3.23)$$

Pentru calculul impedanței de secvență omopolară a învelișurilor metalice diamagnetice ale cablurilor cu considerarea întoarcerii curenților numai prin pământ, învelișurile iau locul conductoarelor de fază ($K = 1$), deci se poate scrie :

$$\underline{Z}_{\hat{i}} = R_{\hat{i}}' + \Delta R_{\hat{i}b} + R_p + j(X_{\hat{i}a} + X_p + \Delta X_{\hat{i}b}) \quad (3.24)$$

$$\text{cu } \Delta R_{\hat{i}b} = \Delta R_{cb} \text{ și } \Delta X_{\hat{i}b} = \Delta X_{cb}$$

\underline{Z}_{RS} este impedanța mutuală între două bucle conductor-pământ

Este dată de relația :

$$\underline{Z}_{RS} = R_p + j X_{RS} \quad (3.25)$$

în care X_{RS} se ia din tabelul 2.2. Reactanța X_{RS} are aceeași valoare pentru cele două tipuri constructive de cabluri, Se poate scrie :

$$\underline{Z}_{RS} = R_p + j(X_p - X_s) \quad (3.26)$$

$\underline{Z}_{R\hat{i}}$ este impedanța mutuală între bucla conductor-pământ și

bucla înveliș-pământ a aceleiași faze.

Este dată de relația

$$\underline{Z}_{R\hat{i}} = R_p + j X_{R\hat{i}} \quad (3.27)$$

în care $X_{R\hat{i}}$ se ia din tabelul 2.2. Reactanța $X_{R\hat{i}}$ are aceeași valoare pentru cele două tipuri constructive de cabluri. Deci se poate scrie :

$$\underline{Z}_{R\hat{i}} = R_p + j(X_{\hat{i}a} + X_p) \quad (3.28)$$

$\underline{Z}_{R\hat{i}S}$ este impedanța mutuală între bucla conductor-pământ a

unei faze și bucla înveliș-pământ a uneia din celelalte faze. Este

dată de relația :

$$\underline{Z}_{R\hat{i}S} = R_p + j X_{R\hat{i}S} \quad (3.29)$$

în care X_{RiS} se ia din tabelul 2.2. Reactanța X_{RiS} are aceeași valoare pentru cele două tipuri constructive de cabluri. Cu aceste precizări se poate scrie :

$$\underline{Z}_{RiS} = R_p + j(X_p - X_s) \quad (3.30)$$

\underline{Z}_{iRS} este impedanța mutuală între două bucle înveliș-pământ. Este dată de relația :

$$\underline{Z}_{iRS} = R_p + j X_{iRS} \quad (3.31)$$

în care X_{iRS} se ia din tabelul 2.3. Reactanța X_{iRS} care aceeași valoare pentru cele două tipuri constructive de cabluri. Cu aceste precizări se poate scrie :

$$\underline{Z}_{iRS} = R_p + j(X_p - X_s) \quad (3.32)$$

Cunoscînd impedanțele de mai sus se pot stabili expresiile de calcul pentru impedanțele de secvență directă, inversă și omopolară.

Impedanța de secvență directă și inversă

Cele două impedanțe sînt egale și sînt date de relația (3.17') în care ținînd cont de (3.20), (3.23), (3.26), (3.28), (3.32) se obține :

$$\underline{Z}_{dd} = \underline{Z}_{ii} = \underline{Z}_d = \underline{Z}_i = \frac{R_c' + R_p + j(X_a + X_p + \Delta X_{cp}) - R_p - j(X_p - X_s) - [R_p + j(X_{ia} + X_p) - R_p - j(X_p - X_s)]^2}{R_1' + R_p + j(X_{ia} + X_p) - R_p - j(X_p - X_s)} \quad (3.33)$$

Rezultă :

$$\underline{Z}_d = \underline{Z}_i = R_c' + j(X_a + X_s + \Delta X_{cp}) + \frac{(X_{ia} + X_s)^2}{R_1' + j(X_{ia} + X_s)}$$

$$\underline{Z}_d = R'_c + \frac{R'_1 (X_{\hat{1}a} + X_s)^2}{R'^2_1 + (X_{\hat{1}a} + X_s)^2} + j \left[X_a + X_s + \Delta X_{cp} - \frac{(X_{\hat{1}a} + X_s)^3}{R'^2_1 + (X_{\hat{1}a} + X_s)^2} \right] \quad (3.34)$$

Din relația (3.34) rezultă influența pe care o au asupra rezistenței și a reactanței directe învelișurile diamagnetice, exprimată prin termenii $\frac{R'_1 (X_{\hat{1}a} + X_s)^2}{R'^2_1 + (X_{\hat{1}a} + X_s)^2}$ respectiv $\frac{(X_{\hat{1}a} + X_s)^3}{R'^2_1 + (X_{\hat{1}a} + X_s)^2}$

Această influență este cu atât mai redusă cu cât rezistența învelișului diamagnetic este mai mare.

După unele transformări, relația (3.33) devine :

$$\underline{Z}_d = \underline{Z}_i = R'_c + j(X_a - X_{\hat{1}a} + \Delta X_{cp}) + \frac{R'_1 [j(X_{\hat{1}a} + X_s)]}{R'_1 + j(X_{\hat{1}a} + X_s)} \quad (3.35)$$

Relației (3.35) îi corespunde schema din figura 3.1.

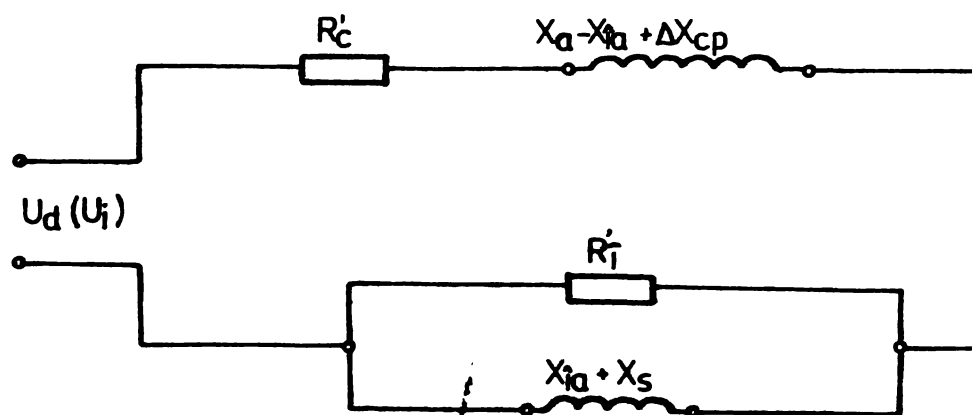


Fig.3.1.

Impedanțele de secvență omopolară ale cablurilor cu benzi feromagnetice de protecție

În forma cea mai generală, cu întoarcerea curenților atât prin pământ cât și prin învelișurile metalice dielectrice aferente și cu precizările de la paragrafele 2.2.1 și 2.3.1, impedanța omopolară este dată de relația (3.18), în care introducând (3.21), (3.24), (3.26), (3.28) și (3.32) se obține :

$$\underline{Z}_{hh} = \underline{Z}_h = R'_c + K \Delta R_{cb} + R_p + j(X_a + X_p + \Delta X_{cp} + K \Delta X_{cb}) + 2R_p + 2j(X_p - X_s) - \frac{[R_p + j(X_{1a} + X_p) + 2R_p + 2j(X_p - X_s)]^2}{R'_1 + R_p + j(X_{1a} + X_p) + 2R_p + 2j(X_p - X_s)} \quad (3.36)$$

rezultă:

$$\underline{Z}_h = R'_c + K \Delta R_{cb} + 3R_p + j(X_a + 3X_p - 2X_s + \Delta X_{cp} + K \Delta X_{cb}) - \frac{[3R_p + j(X_{1a} + 3X_p - 2X_s)]^2}{R'_1 + 3R_p + j(X_{1a} + 3X_p - 2X_s)} \quad (3.37)$$

După unele transformări, relația (3.37) devine :

$$\underline{Z}_h = R'_c + K \Delta R_{cb} + j(X_a - X_{1a} + \Delta X_{cp} + K \Delta X_{cb}) + \frac{(R'_1) [3R_p + j(X_{1a} + 3X_p - 2X_s)]}{R'_1 + 3R_p + j(X_{1a} + 3X_p - 2X_s)} \quad (3.38)$$

Relației (3.38) îi corespunde schema din figura 3.2.

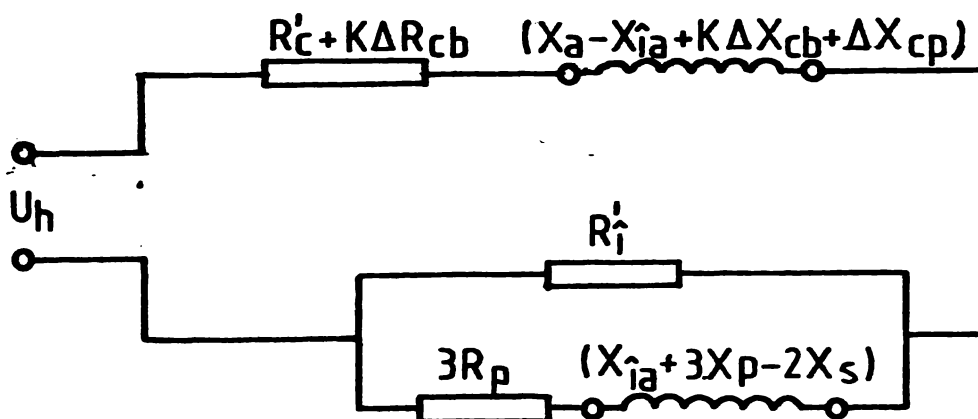


Figura 3.2

Dacă întoarcerea curentului se face numai prin învelișurile metalice, corespunzând conectării în capătul opus sursei a buclelor aferente unei faze conductor-pământ și înveliș-pământ, ($K = 0$) și curenții satisfac următoarele relații :

$$\underline{I}_{\hat{R}} = -\underline{I}_R \quad ; \quad \underline{I}_{\hat{S}} = -\underline{I}_S \quad ; \quad \underline{I}_{\hat{T}} = -\underline{I}_T \quad (3.39)$$

Avînd în vedere faptul că în cazul secvenței omopolare curenții pe cele trei faze sînt egali, pentru a determina impedanța omopolară în sistemul de ecuații (2.1) se procedează la scăderea ecuațiilor, a patra din prima, a cincea din a doua, a șasea din a treia. Cele trei ecuații în condițiile (3.5) rezultă identice și se reduc la una :

$$\underline{Z}_h = \underline{Z}_R + \underline{Z}_{\hat{I}} - 2\underline{Z}_{R\hat{I}} \quad (3.40)$$

Din relațiile (3.21), (3.23), (3.28) pentru astfel de situații, impedanța omopolară devine :

$$\underline{Z}_h = R'_c + R'_i + j(X_a - X'_{ia} + \Delta X_{cp}) \quad (3.41)$$

Se observă că relația (3.40) se obține și din schema prezentată în fig.3.2 dacă impedanța $3R_p + j(X'_{ia} + 3X_p - 2X_s)$ devine infinită, ceea ce înseamnă latura respectivă întreruptă. Avînd în vedere faptul că acest caz presupune curent nul prin pământ rezultă că în schema din fig.3.2 impedanța $\underline{Z}_{oh} = 3R_p + j(X'_{ia} + 3X_p - 2X_s)$

reprezintă chiar impedanța omopolară a căii de întoarcere a curentului prin pământ.

Dacă întoarcerea curentului se face numai prin pământ ($K = 1$), impedanța omopolară se obține din relația (3.18') impunându-se condiția $Z_1 \rightarrow \infty$

Expresia acestei impedanțe omopolare devine :

$$\underline{Z}_h = \underline{Z}_R + \frac{2Z_{RS}}{3} = R'_c + \Delta R_{cb} + 3R_p + j(X_a + 3X_p - 2X_s + \Delta X_{cp} + \Delta X_{cb}) \quad (3.42)$$

În acest caz, aceeași expresie a impedanței se obține și din schema prezentată în figura 3.2. dacă se întrerupe latura care conține rezistența R'_1 . Expresia impedanței omopolare a căii de întoarcere prin înveliș rezultă deci :

$$\underline{Z}_{ih} = R'_1 \quad (3.43)$$

Caracterul rezistiv al impedanței omopolare, în acest caz limită, se explică prin egalitatea dintre reactanța proprie a învelișului și reactanța mutuală conductor-înveliș.

Impedanțele de secvență omopolară ale cablurilor fără benzi feromagnetice de protecție

În forma cea mai generală, cu întoarcerea curenților atât prin pământ cât și prin învelișurile diamagnetice aferente, impedanța omopolară este dată de relația (3.18') în care introducând (3.20) (3.23), (3.26), (3.28) și (3.32) se obține :

$$\underline{Z}_h = R'_c + 3R_p + j(X_a + 3X_p - 2X_s + \Delta X_{cp}) - \frac{[3R_p + j(X_{1a} + 3X_p - 2X_s)]^2}{R'_1 + 3R_p + j(X_{1a} + 3X_p - 2X_s)} \quad (3.44)$$

După unele transformări, relația (3.44) devine :

$$\underline{Z}_h = R'_c + j(X_a - X_{1a} + \Delta X_{cp}) + \frac{R'_1 [3R_p + j(X_{1a} + 3X_p - 2X_s)]}{R'_1 + 3R_p + j(X_{1a} + 3X_p - 2X_s)} \quad (3.45)$$

Relația pentru întoarcerea curenților numai prin învelișurile metalice devine :

$$\underline{Z}_h = R'_c + R'_i + j(X_a - X_{ia} + \Delta X_{cp}) \quad (3.46)$$

iar relația pentru întoarcerea curenților numai prin pământ devine:

$$\underline{Z}_h = R'_c + 3R'_p + j(X_a + 3X_p - 2X_s + \Delta X_{cp}) \quad (3.47)$$

Impedanța de secvență omopolară a învelișurilor metalice diamagnetice ale cablurilor cu considerarea întoarcerii curenților numai prin pământ

În acest caz învelișurile metalice diamagnetice preiau funcția conductoarelor cablului. În expresiile (3.42) și (3.47), înlocuind parametrii conductorului cu cei corespunzători învelișurilor, se obțin impedanțele de secvență omopolară ale acestora, cu considerarea întoarcerii curenților numai prin pământ [45].

În aceste condiții se poate scrie :

- pentru cablurile cu benzi feromagnetice de protecție:

$$\underline{Z}_{h1} = R'_i + \Delta R'_{ib} + 3R'_p + j(X_{ia} + 3X_p - 2X_s + \Delta X_{ib}) \quad (3.48)$$

- pentru cablurile fără benzi feromagnetice de protecție :

$$\underline{Z}_{h1} = R'_i + 3R'_p + j(X_{ia} + 3X_p - 2X_s) \quad (3.49)$$

După cum rezultă din cele prezentate mai sus, pentru determinarea impedanțelor directe, inverse și omopolare este necesară cunoașterea rezistențelor căilor conductoare, a rezistențelor suplimentare, a reactanțelor parțiale și a reactanțelor suplimentare, mărimi definite la paragrafele 2.2.1, 2.2.2, 2.3.1 și 2.3.2

4. CALCULUL SI REPARTITIA CURENTULUI DE SCURTCIRCUIT MONOFAZAT IN REȚELE DE CABLURI CU NEUTRU LEGAT LA PĂMÎNT PRIN REZISTOR

4.1. Considerații generale

Calculul curentului de scurtcircuit monofazat cu ajutorul componentelor simetrice este tratat în literatura de specialitate [8, 11, 15, 21, 36, 90] din anumite puncte de vedere. De regulă, se stabilește valoarea curentului de scurtcircuit la locul de defect, cu sau fără rezistențe suplimentare și defazajele față de sistemul de tensiuni.

În cazul specific al rețelelor în cablu, prin luarea în considerare a căii de întoarcere prin învelișurile metalice diamagnetice, schemele de secvență directă, inversă și în special omopolară capătă noi expresii. Corespunzător acestora, în lucrare s-au stabilit noi relații de calcul și scheme echivalente.

Prin luarea în considerare, la dimensionarea elementelor rețelei, a valorii curentului de scurtcircuit total se ajunge atât la o supradimensionare a noilor instalații față de solicitările reale cât și la imposibilitatea practică a trecerii rețelei existente la tratarea neutrului prin rezistor.

Prin luarea în considerare, la dimensionarea elementelor rețelei, a valorii curentului de scurtcircuit total se ajunge atât la o supradimensionare a noilor instalații față de solicitările reale cât și la imposibilitatea practică a trecerii rețelei existente la tratarea neutrului prin rezistor.

În aceste condiții devine prioritar determinarea repartiției curentului de scurtcircuit monofazat pe cele două căi de întoarcere, prin aceasta stabilind condițiile de dimensionare corelate cu solicitările reale.

Lucrarea și-a propus elaborarea metodologiei privind repartitia curentului de scurtcircuit monofazat completînd astfel un gol existent în literatura de specialitate din țară.

Calculul curentului de scurtcircuit monofazat tratat în lucrare are la bază următoarele ipoteze :

- se neglijează rezistența de arc, deci se consideră scurtcircuit metalic, calculul fiind astfel acoperitor față de situația reală;
- se neglijează contribuția consumatorilor la valoarea curentului de scurtcircuit ;
- calculul se încadrează în teoria circuitelor electrice liniare ;
- locul de scurtcircuit se consideră la capătul opus sursei, pentru a introduce atît parametri liniei cît și ai sursei ;
- linia la care se calculează curentul este radială corespunzător regimului normal de funcționare ;
- construcția liniei subterane trifazate se consideră simetrică.

În figura 4.1 se prezintă schema simplificată pentru calculul curentului de scurtcircuit monofazat al unei rețele de medie tensiune.

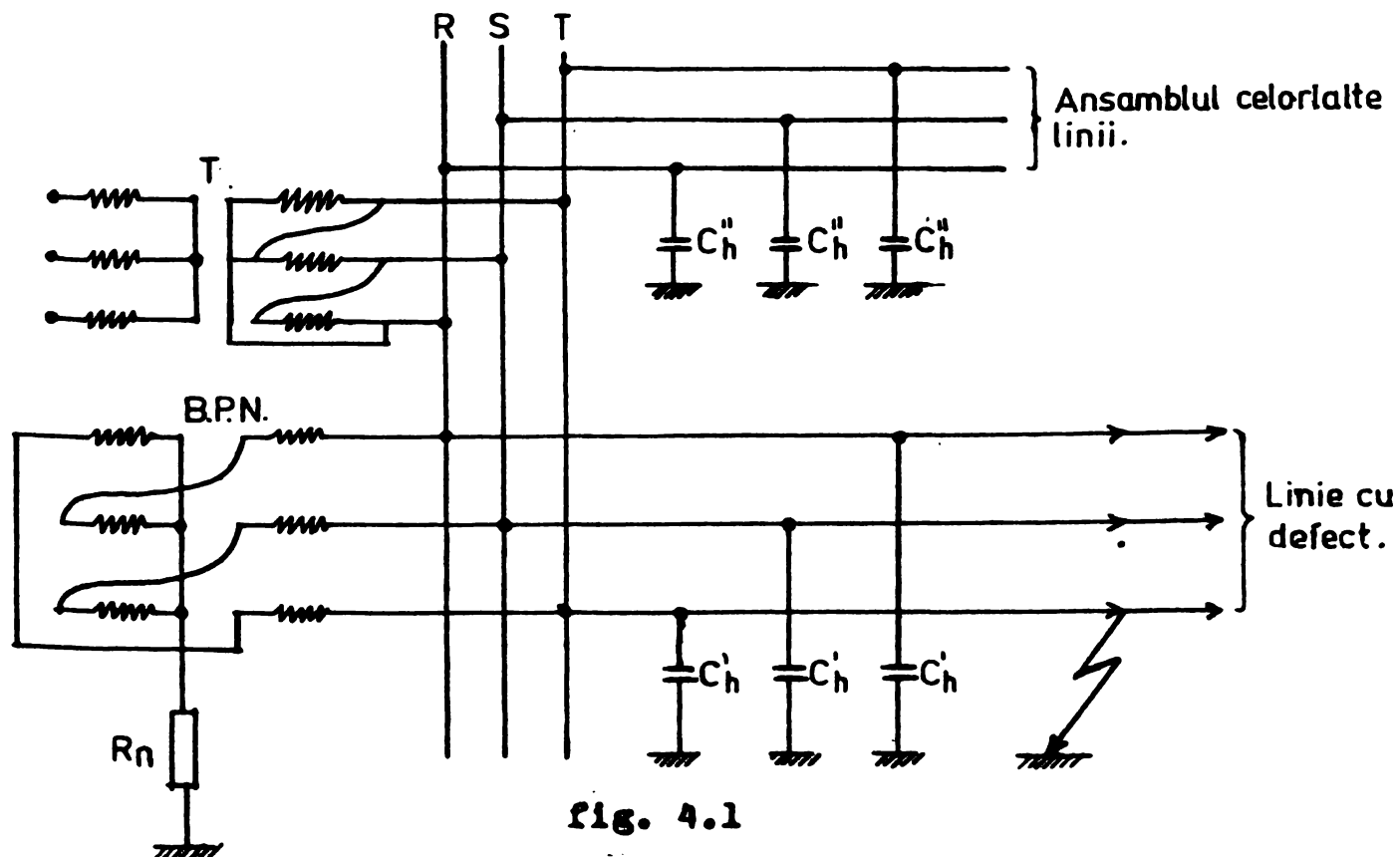


fig. 4.1

În figurile 4.2 și 4.3 sînt prezentate rețelele de secvență directă (inversă) și omopolară corespunzătoare. În cazul în care transformator-

medie tensiune este realizat cu ajutorul unei bobine trifazate de punct neutru în conexiunea Z_0 și a unui rezistor.

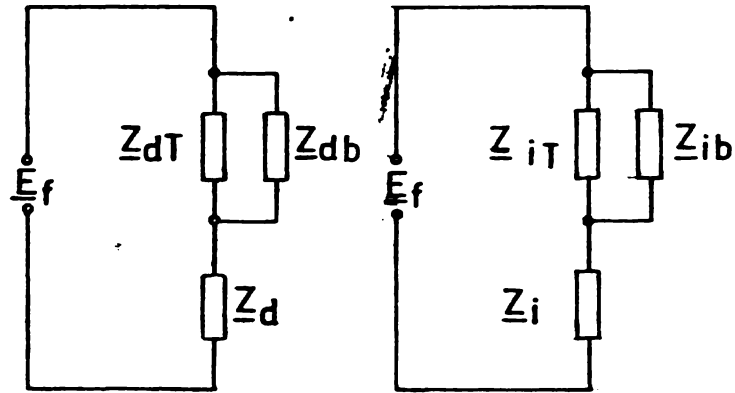


Fig.4.2

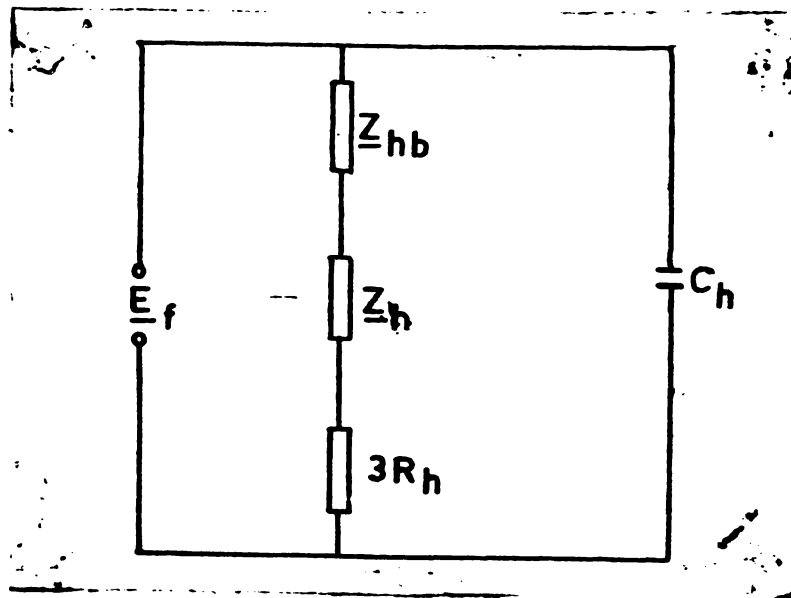


Fig.4.3

Notațiile folosite au următoarea semnificație :

- $\underline{Z}_{dT}, \underline{Z}_{iT}$ - impedanța de secvență directă și inversă de partea sursei (transformator) ;
- $\underline{Z}_d, \underline{Z}_i$ - impedanța de secvență directă și inversă a cablului avariat, pînă la locul defectului ;
- $\underline{Z}_{db}, \underline{Z}_{ib}$ - impedanța de secvență directă și inversă a bobinei de realizare a neutrului de medie tensiune ;
- \underline{Z}_{hb} - impedanța de secvență omopolară a bobinei de realizare a neutrului de medie tensiune ;
- \underline{Z}_h - impedanța de secvență omopolară a cablului avariat ;
- R_h - rezistența de tratare a neutrului ;
- C_h - capacitatea de fază a întregii rețele legate galvanic
 $C_h = C'_h + C''_h$;
- E_f - tensiunea în gol la locul defectului aproximată cu tensiunea de fază la barele stației.

Independent de calea de întoarcere, curentul de scurtcircuit monofazat este dat de relația :

$$\underline{I}_{sct}^{(1)} = \frac{3E_f}{2\left(\frac{\underline{Z}_{dT} \cdot \underline{Z}_{db}}{\underline{Z}_{dT} + \underline{Z}_{db}} + \underline{Z}_d\right) + \frac{3R_n + \underline{Z}_{hb} + \underline{Z}_h}{1 + j\omega C_h (3R_n + \underline{Z}_{hb} + \underline{Z}_h)}} = \frac{E_f}{\underline{Z}_{esct}^{(1)}} \quad (4.1)$$

În condițiile conexiunii zig-zag $\underline{Z}_{db} \rightarrow \infty$, fapt pentru care nu se ia în considerare [21,93]. Pentru cazul sectorului experimental, $Z_{db} = 59714$ ohmi, față de $Z_{dT} = 3,073$ ohmi. Cele două impedanțe fiind în paralel aportul lui \underline{Z}_{db} este cel al unei impedanțe de valoare infinită. Cu această precizare relația (4.1) devine :

$$\underline{I}_{sct}^{(1)} = \frac{3E_f}{2(\underline{Z}_{dT} + \underline{Z}_d) + \frac{3R_n + \underline{Z}_{hb} + \underline{Z}_h}{1 + j\omega C_h (3R_n + \underline{Z}_{hb} + \underline{Z}_h)}} = \frac{E_f}{\underline{Z}_{esct}^{(1)}} \quad (4.1')$$

în care $\underline{Z}_{esct}^{(1)}$ este impedanța echivalentă a rețelei cu neutru tratat prin rezistor în cazul scurtcircuit monofazat metallic, dată de relația:

$$\underline{Z}_{esct}^{(1)} = \frac{2}{3} (\underline{Z}_{dT} + \underline{Z}_d) + \frac{R_n + \frac{\underline{Z}_{hb} + \underline{Z}_h}{3}}{1 + j\omega C_h (3R_n + \underline{Z}_{hb} + \underline{Z}_h)} \quad (4.2)$$

Cu neglijarea aportului elementelor transversale ale rețelei, impedanța de scurtcircuit devine :

$$\underline{Z}_{esc}^{(1)} = \frac{2(\underline{Z}_{dT} + \underline{Z}_d) + \underline{Z}_{hb} + \underline{Z}_n}{3} + R_n = \frac{2\underline{Z}_{dT} + \underline{Z}_{hb}}{3} + \frac{2\underline{Z}_d + \underline{Z}_n}{3} + R_n \quad (4.3)$$

4.2. Relații de calcul și schema echivalentă

În scopul punerii în evidență a căilor de întoarcere a curentului de scurtcircuit monofazat, în cazul general atât prin pământ cât și prin învelișurile metalice în paralel, se prezintă în figura 4.4 schema simplificată a rețelei de medie tensiune (sursă, linie subterană).

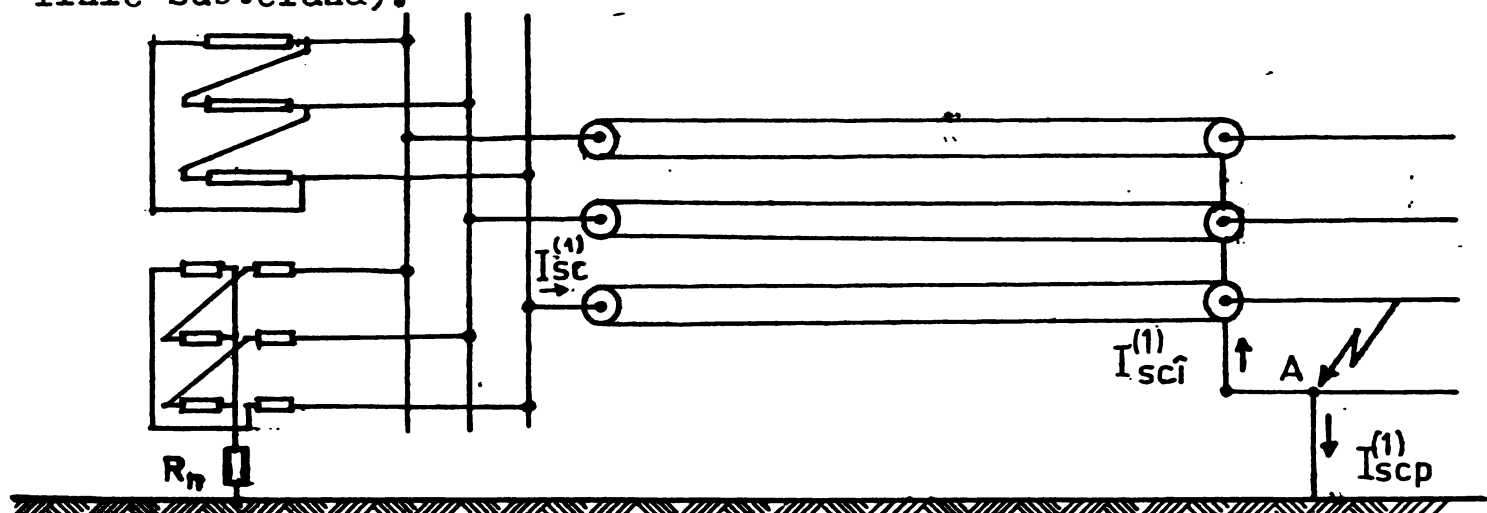


Fig.4.4.

Impedanța de scurtcircuit este dată de relația (4.3) care avînd în vedere relațiile (3.35) și (3.38) devine :

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{esc}^{(1)} = & \frac{2}{3} (R_{dT} + j X_{dT}) + \frac{1}{3} (R_{hb} + j X_{hb}) + R_n + \\ & + \frac{2R'_c + j 2(X_a - X_{ia} + \Delta X_{ci} + \Delta X_{cp}) + R'_c + K A R_{cb} + j(X_a - X_{ia} + \Delta X_{ci} + \Delta X_{cp} + K A X_{cb})}{3} + \\ & + \frac{2}{3} \cdot \frac{R'_i [j(X_{ia} + X_s)]}{R'_i + j(X_{ia} + X_s)} + \frac{1}{3} \cdot \frac{R'_i [3R_p + j(X_{ia} + 3X_p - 2X_s)]}{R'_i + 3R_p + j(X_{ia} + 3X_p - 2X_s)} \quad (4.4) \end{aligned}$$

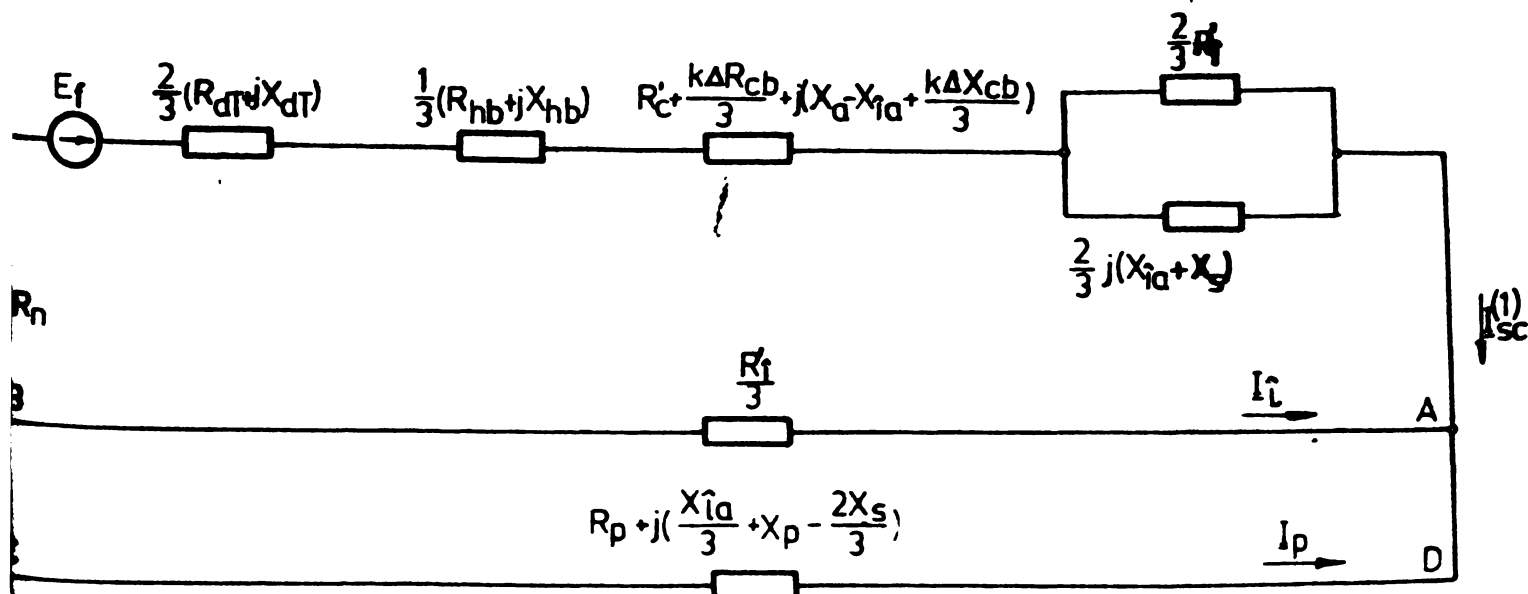
După unele rearranjări și transformări se obține :

$$\begin{aligned}
 \underline{Z}_{esc}^{(1)} = & \frac{2}{3} (R_{dT} + jX_{dT}) + \frac{1}{3} (R_{hb} + jX_{hb}) + R_n + R'_c + \frac{K\Delta R_{cb}}{3} + \\
 & + j(X_a - X_{\hat{i}a} + \Delta X_{c\hat{i}} + \Delta X_{cp} + \frac{K\Delta X_{cb}}{3}) + \frac{2}{3} \frac{R'_1 [j(X_{\hat{i}a} + X_s)]}{R'_1 + j(X_{\hat{i}a} + X_s)} + \\
 & + \frac{R'_1}{3} \left[R_p + j\left(\frac{X_{\hat{i}a}}{3} + X_p - \frac{2X_s}{3}\right) \right] \\
 & + \frac{R'_1}{3} + R_p + j\left(\frac{X_{\hat{i}a}}{3} + X_p - \frac{2X_s}{3}\right) \tag{4.5}
 \end{aligned}$$

În literatura de specialitate [5, 45], de regulă, nu se ține seama în calcule de $\Delta X_{c\hat{i}}$ și ΔX_{cp} , datorită valorilor mici ale acestora. Cu această precizare, relația (4.5) devine :

$$\begin{aligned}
 \underline{Z}_{esc}^{(1)} = & \frac{2}{3} (R_{dT} + jX_{dT}) + \frac{1}{3} (R_{hb} + jX_{hb}) + R_n + R'_c + \frac{K\Delta R_{cb}}{3} + j(X_a - X_{\hat{i}a} + \\
 & + \frac{K\Delta X_{cb}}{3}) + \frac{2}{3} \frac{R'_1 [j(X_{\hat{i}a} + X_s)]}{R'_1 + j(X_{\hat{i}a} + X_s)} + \frac{R'_1}{3} \left[R_p + j\left(\frac{X_{\hat{i}a}}{3} + X_p - \frac{2X_s}{3}\right) \right] \\
 & + \frac{R'_1}{3} + R_p + j\left(\frac{X_{\hat{i}a}}{3} + X_p - \frac{2X_s}{3}\right)
 \end{aligned}$$

În figura 4.5 se prezintă schema echivalentă a liniei în cablu în cazul unui scurtcircuit monofazat cu întoarcerea curentului prin pământ și învelișurile metalice în paralel, ce corespunde relației (4.6) :



Întoarcerea curentului de scurtcircuit ~~numai~~ prin una din căi constituie o particularizare a cazului general. Acestea corespund situației reale din funcționarea rețelelor ~~cînd~~ accidental se întrerupe legătura de punere la pământ respectiv ~~continuitatea~~ învelișului.

Pentru cazul particular de întoarcere a curentului numai prin pământ, ținînd cont de (3.42) și efectuînd unele transformări relația (4.3) devine :

$$\underline{Z}_{esc}^{(1)} = \frac{2}{3}(R_{dT} + jX_{dT}) + \frac{1}{3}(R_{hb} + jX_{hb}) + R_n + R'_c + \frac{\Delta R_{cb}}{3} + R_p + j(X_a + X_p) + \frac{\Delta X_{cb}}{3} \quad (4.7)$$

iar schema echivalentă este prezentată în figura 4.6.

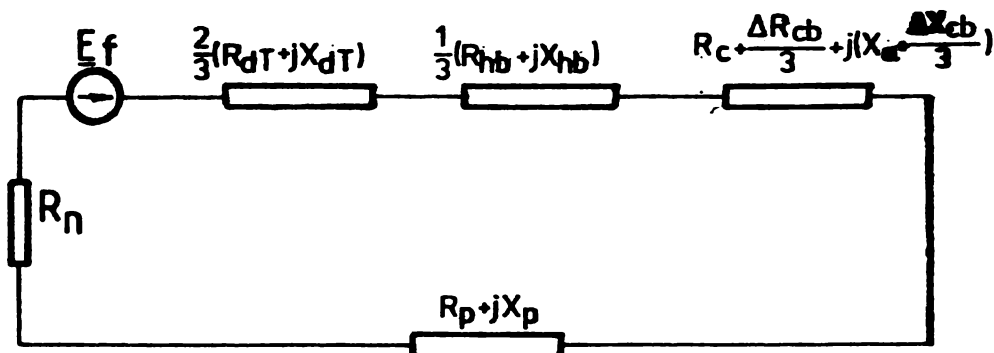


Fig.4.6.

Pentru cazul particular de întoarcere a curentului numai prin învelișurile metalice, ținînd cont de (3.41) și efectuînd unele transformări relația (4.3) devine :

$$\underline{Z}_{esc}^{(1)} = \frac{2}{3}(R_{dT} + jX_{dT}) + \frac{1}{3}(R_{hb} + jX_{hb}) + R'_c + j(X_a - X_{ia}) + \frac{2}{3} \frac{R'_i [j(X_{ia} + X_s)]}{R'_i + j(X_{ia} + X_s)} + \frac{1}{3} R'_i \quad (4.8)$$

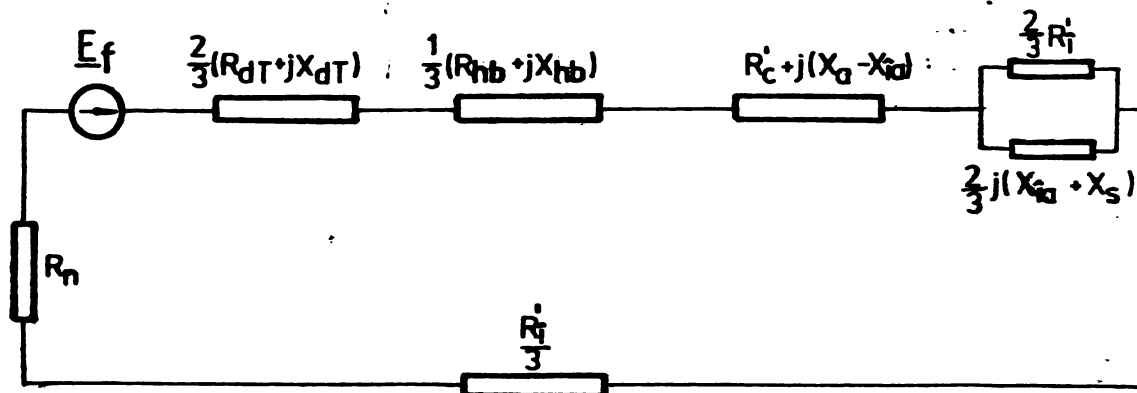


Fig.4.7.

Pentru calculul repartiției curentului de scurtcircuit prin pământ și învelișuri se revine la sistemul inițial, relațiile (2.1) și figura 2.1 sau la ecuațiile matriciale (3.10) și (3.11).

Se presupune că învelișurile metalice diamagnetice sînt legate la pământ la ambele capete, scurtcircuitul monofazat afectează faza T deci $\underline{I}_T = \underline{I}_{SC}^{(1)}$, iar curenții de sarcină din fazele R și S se neglijează față de curentul de scurtcircuit (ipoteză folosită și la calculul curentului de scurtcircuit monofazat).

Inlocuind în ecuația matricială (3.11), matricile

$[\underline{Z}_f]^{-1}$ și $[\underline{Z}_m]$ cu expresiile rezultate din (3.7) și (3.13') și cu

ipotezele enunțate anterior, rezultă curenții din învelișurile metalice diamagnetice funcție de curentul de scurtcircuit monofazat :

./.

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{\hat{R}} \\ \underline{I}_{\hat{S}} \\ \underline{I}_{\hat{T}} \end{bmatrix} = - \frac{1}{(\underline{Z}_{\hat{1}} + 2\underline{Z}_{\hat{1}RS})(\underline{Z}_{\hat{1}} - \underline{Z}_{\hat{1}RS})} \begin{bmatrix} \underline{Z}_{\hat{1}} + \underline{Z}_{\hat{1}RS} & -\underline{Z}_{\hat{1}RS} & -\underline{Z}_{\hat{1}RS} \\ -\underline{Z}_{\hat{1}RS} & \underline{Z}_{\hat{1}} + \underline{Z}_{\hat{1}RS} & -\underline{Z}_{\hat{1}RS} \\ -\underline{Z}_{\hat{1}RS} & -\underline{Z}_{\hat{1}RS} & \underline{Z}_{\hat{1}} + \underline{Z}_{\hat{1}RS} \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} \underline{Z}_{R\hat{1}} & \underline{Z}_{\hat{1}RS} & \underline{Z}_{\hat{1}RS} \\ \underline{Z}_{\hat{1}RS} & \underline{Z}_{R\hat{1}} & \underline{Z}_{\hat{1}RS} \\ \underline{Z}_{\hat{1}RS} & \underline{Z}_{\hat{1}RS} & \underline{Z}_{R\hat{1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \underline{I}_{sc}^{(1)} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Rezolvând ecuația matricială (4.9) rezultă :

$$\underline{I}_{\hat{R}} = \underline{I}_{\hat{S}} = - \frac{\underline{Z}_{\hat{1}RS}(\underline{Z}_{\hat{1}} - \underline{Z}_{R\hat{1}})}{(\underline{Z}_{\hat{1}} + 2\underline{Z}_{\hat{1}RS})(\underline{Z}_{\hat{1}} - \underline{Z}_{\hat{1}RS})} \underline{I}_{sc}^{(1)} \quad (4.10)$$

$$\underline{I}_{\hat{T}} = - \frac{(\underline{Z}_{\hat{1}} + \underline{Z}_{\hat{1}RS})\underline{Z}_{R\hat{1}} - 2\underline{Z}_{\hat{1}RS}^2}{(\underline{Z}_{\hat{1}} + 2\underline{Z}_{\hat{1}RS})(\underline{Z}_{\hat{1}} - \underline{Z}_{\hat{1}RS})} \underline{I}_{sc}^{(1)}$$

Curentul total prin cele trei învelișuri rezultă din :

$$\underline{I}_{\hat{1}} = \underline{I}_{\hat{R}} + \underline{I}_{\hat{S}} + \underline{I}_{\hat{T}} = - \frac{\underline{Z}_{R\hat{1}} + 2\underline{Z}_{\hat{1}RS}}{\underline{Z}_{\hat{1}} + 2\underline{Z}_{\hat{1}RS}} \underline{I}_{sc}^{(1)} \quad (4.11)$$

Datorită faptului că curentul de scurtcircuit total, curentul prin învelișuri și curentul prin pământ respectă relația:

$$\underline{I}_{sc}^{(1)} + \underline{I}_{\hat{1}} + \underline{I}_p = 0 \quad (4.12)$$

expresia pentru curentul prin pământ devine :

$$\underline{I}_p = - (\underline{I}_{sc}^{(1)} + \underline{I}_{\hat{1}}) = - \underline{I}_{sc}^{(1)} \left(1 - \frac{\underline{Z}_{R\hat{1}} + 2\underline{Z}_{\hat{1}RS}}{\underline{Z}_{\hat{1}} + 2\underline{Z}_{\hat{1}RS}} \right) \quad (4.13)$$

Inlocuind în relația (4.11) expresiile impedanțelor rezultate din (3.24) (3.28) și (3.32) rezultă :

./.

$$\underline{I}_{\hat{1}} = - \frac{3R_p + j(X_{\hat{1}a} - 2X_s + 3X_p)}{R_{\hat{1}}' + 3R_p + j(X_{\hat{1}a} - 2X_s + 3X_p)} \underline{I}_{-sc}^{(1)} \quad (4.14)$$

sau :

$$\underline{I}_{\hat{1}} = - \frac{R_p + j\left(\frac{X_{\hat{1}a}}{3} + X_p - \frac{2X_s}{3}\right)}{\frac{R_{\hat{1}}'}{3} + R_p + j\left(\frac{X_{\hat{1}a}}{3} + X_p - \frac{2X_s}{3}\right)} \underline{I}_{-sc}^{(1)} \quad (4.15)$$

Înlocuind în relația (4.13) expresiile impedanțelor rezultate din (3.24), (3.28) și (3.32) rezultă :

$$\underline{I}_p = - \frac{R_{\hat{1}}'}{R_{\hat{1}}' + 3R_p + j(X_{\hat{1}a} - 2X_s + 3X_p)} \underline{I}_{-sc}^{(1)} \quad (4.16)$$

sau:

$$\underline{I}_p = - \frac{\frac{1}{3} R_{\hat{1}}'}{\frac{R_{\hat{1}}'}{3} + R_p + j\left(\frac{X_{\hat{1}a}}{3} + X_p - \frac{2X_s}{3}\right)} \underline{I}_{-sc}^{(1)} \quad (4.17)$$

Se observă că se ajunge la aceleași rezultate pentru valorile curenților prin înveliș și prin pământ dacă, se utilizează figura 4.6, respectiv se scrie teorema I-a lui Kirchoff în nodul A și teorema II-a a lui Kirchoff pe bucla înveliș-pământ (ABCD).

Coeficientul K din relația (2.5) se determină ca pătratul raportului dintre curentul de întoarcere prin pământ și curentul de scurtcircuit total. Deci :

$$K = \left(\frac{|\underline{I}_p|}{|\underline{I}_{-sc}^{(1)}|} \right)^2 = \left(\frac{|\underline{I}_p|}{|\underline{I}_p + \underline{I}_{\hat{1}}|} \right)^2 \quad (4.18)$$

./.

sau înlocuind în (4.18) relațiile (4.14) și (4.16) rezultă :

$$K = \frac{R_1^2}{(R_1 + 3R_p)^2 + (X_{1a} - 2X_s + 3X_p)^2} \quad (4.19)$$

Din analiza relațiilor de calcul stabilite în acest capitol se desprind câteva precizări utile și practice pentru conceperea, proiectarea, construcția, exploatarea și întreținerea rețelelor de medie tensiune realizate cu cablu trifazat, cu învelișuri metalice ; pe faze, cu sau fără benzi feromagnetice de protecție, cu neutrul tratat prin rezistor și anume :

- determinarea repartiției curentului de scurtcircuit monofazat pe căile de întoarcere devine posibilă numai prin introducerea parametrilor parțiali ;

- cunoașterea repartiției curentului de scurtcircuit în toate ipotezele posibile, normale și accidentale (întreruperea legăturilor la prizele de pământ, respectiv a continuității învelișului), permite dimensionarea prizelor de pământ și verificarea stabilității termice a învelișurilor ;

- determinarea curentului de scurtcircuit monofazat folosind impedanțele cu parametri parțiali conduce la relații de calcul convenabile folosirii calculatoarelor numerice.

Se precizează că adoptarea razei de 30 cm pentru cilindrul de separație, așa cum se deduce din examinarea schemelor echivalente din fig. 4.5, 4.6 și 4.7, precum și din relațiile de calcul aferente, nu influențează rezultatele calculelor.

5. REZULTATE EXPERIMENTALE DE LABORATOR

În cadrul lucrării o preocupare centrală a constat în elaborarea unei metodologii pentru măsurarea pe cale experimentală a parametrilor enumerați la cap.2 și a impedanțelor de secvențe analizate în cap.3, în scopul confirmării valabilității acestora.

Schemele de măsurare posibile conduc, de regulă, la determinarea valorii unei grupe de parametri. Unii din parametri (X_a și X_{1a}) se pot măsura numai cu cabluri nepozate, care în viitor se consideră a fi puși la dispoziție de fabricile constructoare.

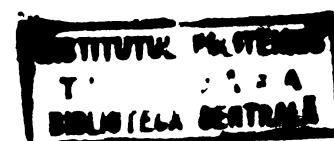
Considerentele de mai sus au condus la elaborarea unei metodologii și organizarea de măsurători în condiții de laborator și într-o rețea reală, alimentată cu tensiune redusă. Conținutul acestora, metodologia elaborată de autor constă în următoarele :

- gruparea potrivită a parametrilor, astfel încât succesiv să se obțină ecuațiile necesare alcătuirii unui sistem, prin a cărui rezolvare să rezulte valorile acestora ;
- elaborarea schemelor de măsurare, cu evidențierea aparaturii necesare și a tehnicii de lucru ;
- stabilirea de relații care să permită determinarea impedanțelor de secvență ale cablurilor pe baza rezultatelor măsurării cu tensiune redusă a parametrilor grupați.

Valorile parametrilor obținute prin măsurători și prin calcul în funcție de elementele constructive ale cablurilor și rezistivitatea solului în care se pozează, se compară, pentru evidențierea compatibilității celor două căi de determinare a lor.

5.1. Gruparea parametrilor, scheme de măsurare și relații de calcul

Din analiza sistematică a posibilităților de măsurare a parametrilor, ca funcție de condițiile de rezistență și reactanțelor suplimentare, s-a stabilit următoarele grupări :



pentru rezistențe

$$R'_c = A_1 \quad (1)$$

$$R'_c + 3R'_p = A_3 \quad (2)$$

$$R'_c + R'_i = A_4 \quad (3)$$

$$R'_i + 3R'_p = A_5 \quad (4)$$

(5.1)

- pentru reactanțe

$$X_a + X_s = B_1 \quad (1)$$

$$X_a = B_2 \quad (2)$$

$$X_2 + 3X_p - 2X_s = B_3 \quad (3) \quad (5.2)$$

$$X_a - X_{1a} = B_4 \quad (4)$$

$$X_{1a} + 3X_p - 2X_s = B_5 \quad (5)$$

Ecuațiile de mai sus se pot grupa în sistem de 3 ecuații pentru rezistențe în cazul cablurilor fără benzi feromagnetice de protecție și respectiv 4 ecuații în cazul cablurilor cu aceste benzi. În mod similar pentru reactanțe sistemul este format din 4, respectiv 5 ecuații.

Rezultă că atât pentru rezistențe, cât și pentru reactanțe în cazul cablurilor cu benzi feromagnetice de protecție, ca urmare a pierderilor de putere activă și reactivă, intervine o ecuație în plus.

Rezolvarea sistemelor de ecuații, în cazul cablurilor fără benzi feromagnetice de protecție, conduce la următoarele relații:

$$R'_c = A_1$$

$$X_a = B_2$$

$$R_p = \frac{A_3 - A_1}{3} \quad (5.3)$$

$$X_s = B_1 - B_2 \quad (5.4)$$

$$R'_i = A_4 - A_1$$

$$X_{1a} = B_2 - B_4$$

$$X_p = \frac{B_3 + 2B_1}{3} - B_2$$

În continuare se prezintă schemele pentru măsurarea parametrilor și relațiile de calcul aferente atât în condiții de laborator, cât și într-o rețea reală alimentată cu tensiune redusă.

Ultima parte a capitolului conține rezultatele măsurătorilor efectuate în laborator, cele privind rețeaua reală fiind expuse după prezentarea structurii experimentale în capitolul 6.

5.1.1. Schema experimentală pentru măsurarea mărimilor A_1 și B_1

Din relațiile (3.34), (5.1) și (5.2) rezultă că în cazul măsurării impedanței de secvență directă a unui cablu se determină mărimile A_1 și B_1 , respectiv rezistența conductorului de fază R_c^1 și suma reactanțelor $X_a + X_s$

În figura 5.1 este dată schema pentru măsurarea impedanței directe.

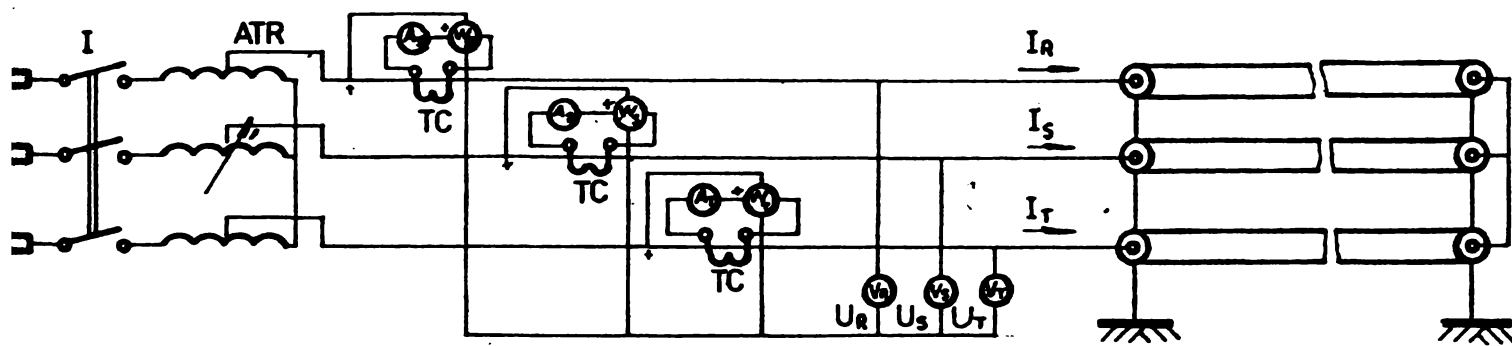


Fig.5.1.

Dacă se notează cu U_R , U_S și U_T tensiunile de fază, cu I_R , I_S și I_T curenții și cu P_R , P_S și P_T puterile active corespunzătoare, se pot scrie relațiile :

$$Z_{dR} = \frac{U_R}{I_R}; \quad Z_{dS} = \frac{U_S}{I_S}; \quad Z_{dT} = \frac{U_T}{I_T}; \quad Z_d = \frac{Z_{dR} + Z_{dS} + Z_{dT}}{3}$$

$$R_{dR} = \frac{P_R}{I_R^2}; \quad R_{dS} = \frac{P_S}{I_S^2}; \quad R_{dT} = \frac{P_T}{I_T^2}; \quad R_d = \frac{R_{dR} + R_{dS} + R_{dT}}{3} \quad (5.5)$$

$$X_{dR} = \sqrt{Z_{dR}^2 - R_{dR}^2}; \quad X_{dS} = \sqrt{Z_{dS}^2 - R_{dS}^2}; \quad X_{dT} = \sqrt{Z_{dT}^2 - R_{dT}^2}; \quad X_d = \frac{X_{dR} + X_{dS} + X_{dT}}{3}$$

./.

Se precizează că prin măsurători se determină valoarea medie a parametrilor de secvență directă. Dacă schema de mai sus este folosită în condițiile în care nu apar rezistențe suplimentare ca urmare a efectelor de proximitate și pelicular și ținând cont de faptul că în sistemul trifazat simetric fluxul magnetic din bandajele feromagnetice de protecție este zero, se poate scrie :

$$R_d = A_1 + \frac{R_1' (X_{1a} + X_s)^2}{R_1'^2 + (X_{1a} + X_s)^2} \quad (5.6)$$

$$X_d = B_1 - \frac{(X_{1a} + X_s)^3}{R_1'^2 + (X_{1a} + X_s)^2}$$

Cunoscînd rezistența și reactanța de secvență directă, se poate scrie în complex :

$$\underline{Z}_d = R_d + jX_d = Z_d e^{j\varphi}$$

în care

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_d}{R_d} \quad (5.7)$$

5.1.2. Schema experimentală pentru măsurarea mării B₂

Așa cum rezultă din relația (5.2) mărimea B₂ reprezintă de fapt reactanța X_a, definită de relația (2.25).

În cazul unui sistem monofazat format din două conductoare, (figura 5.2), de lungime l = 1 km, reactanța inductivă

./.

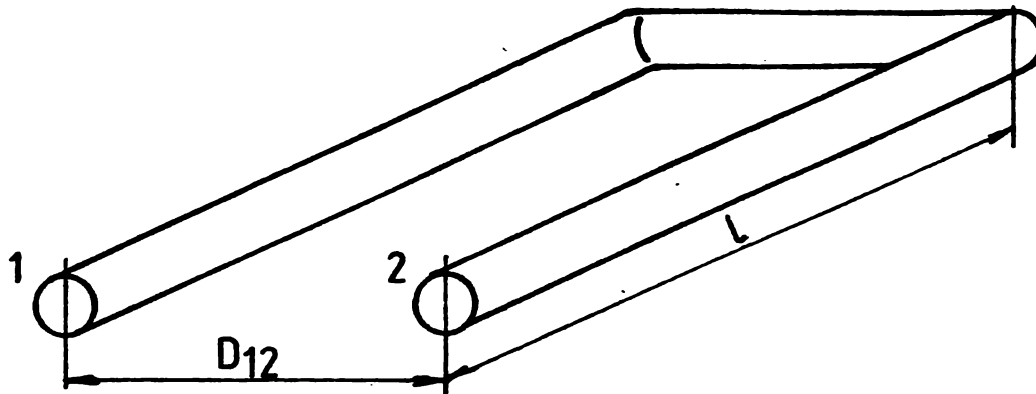


Fig.5.2.

specifică a buclei este dată de relația [5] :

$$X = 2 \cdot 0,1445 \lg \frac{D_{12}}{R_{MG_{1c}}} \quad (\Omega \text{ km}^{-1}) \quad (5.8)$$

Dacă distanța între cele două conductoare este de 30 cm, relația (5.8) devine :

$$X = 2 \cdot 0,1445 \lg \frac{30}{R_{MG_{1c}}} \quad (\Omega \text{ km}^{-1}) \quad (5.9)$$

Din compararea relațiilor (2.2.5) și (5.9) rezultă că $X_a = \frac{X}{2}$. Această concluzie a stat la baza elaborării schemei pentru măsurarea reactanței X_a , prezentată în figura 5.3.

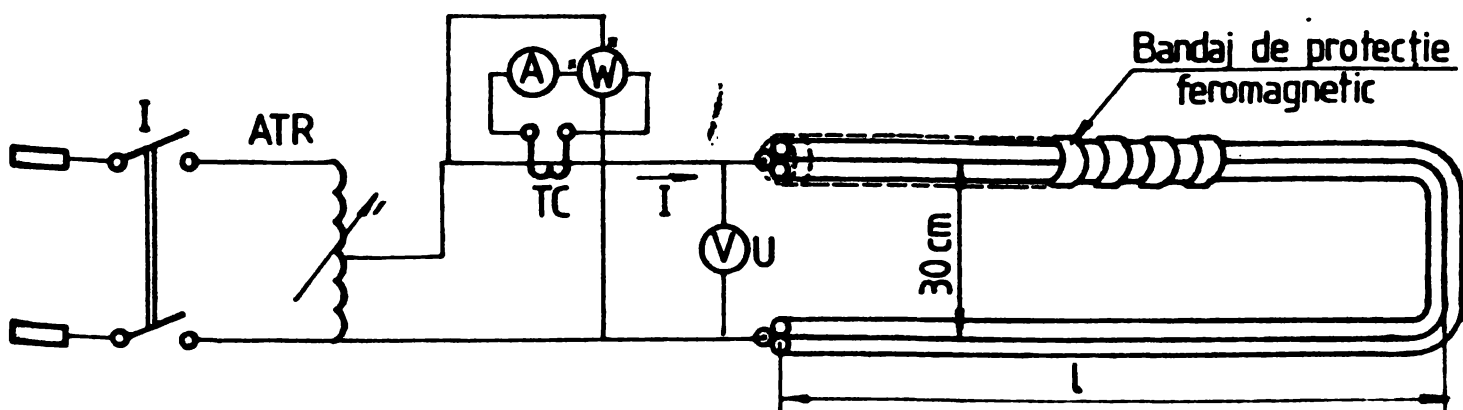


Fig.5.3.

In cazul cablurilor cu benzi de protecție feromagnetice alimentate numai printr-un conductor de fază, fluxul magnetic din aceste benzi este de trei ori mai mic decât în cazul a trei curenți omopolari de aceeași valoare. In acest caz, valorile rezistenței și reactanței suplimentare a unui conductor ca urmare a pierderilor în benzile feromagnetice de protecție, date de relațiile (2.6), (2.41) se reduc la o treime.

Notăm cu R , X , Z , ΔR_b și ΔX_b parametrii corespunzători buclei, deci pentru o fază cu o latură de dus și alta de întors. Dacă se notează cu U tensiunea, cu I curentul și cu P puterea corespunzătoare din schema de mai sus se pot scrie relațiile :

- pentru cabluri fără bandaje feromagnetice de protecție:

$$Z = \frac{U}{I} ; R = \frac{P}{I^2} ; X = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad (5.10)$$

și deci parametrii R'_c și $X_a = B_2$ pentru o lungime de conductor $l = 1$ km, (figura 5.3), devin :

$$R'_c = \frac{R}{2} ; X_a = B_2 = \frac{X}{2} \quad (5.11)$$

- pentru cablurile cu bandaje feromagnetice de protecție:

$$Z = \frac{U}{I} ; R + \frac{\Delta R_b}{3} = \frac{P}{I^2} ; X + \frac{\Delta X_b}{3} = \sqrt{Z^2 - \left(R + \frac{\Delta R_b}{3}\right)^2} \quad (5.12)$$

iar parametrii R'_c și $X_a = B_2$ pentru o lungime de conductor $l = 1$ km, (figura 5.3), devin :

$$R'_c + \frac{\Delta R_{cb}}{3} = \frac{R + \frac{\Delta R_b}{3}}{2} ; X_a + \frac{X_{cb}}{3} = \frac{X + \frac{\Delta X_b}{3}}{2} \quad (5.13)$$

De reținut că după cum rezultă din relația (5.11), prin această măsurare se obține rezistența R'_c și reactanța X_a , dacă cablurile nu au benzi metalice feromagnetice de protecție; iar conform relației (5.13) suma rezistențelor $R'_c + \frac{\Delta R_{cb}}{3}$, respectiv suma reactanțelor $X_a + \frac{\Delta X_{cb}}{3}$ dacă există aceste benzi.

5.1.3. Schema experimentală pentru măsurarea mărimilor A_3 și B_3

Din relațiile (3.42) și (3.47) rezultă că mărimile A_3 și B_3 intervin în expresiile impedanței de secvență omopolară a unui cablu cu considerarea întoarcerii curentului numai prin pământ. Această concluzie a stat la baza elaborării schemei experimentale de măsurare, prezentată în figura 5.4.

Ampermetrele A_R , A_S și A_T sînt folosite pentru verificarea egalității curenților I_{hR} , I_{hS} și I_{hT} .

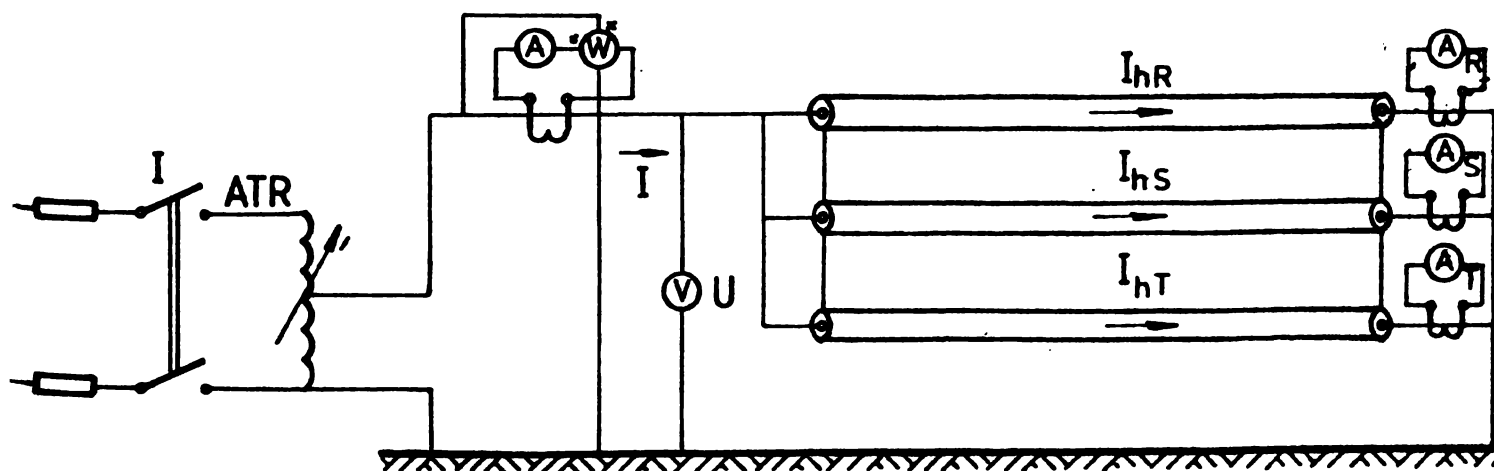


Fig. 5.4.

Notînd cu U tensiunea, cu I curentul, cu P puterea activă corespunzătoare și ținînd cont că $I_{hS} = I_{hS} = I_{hT} = \frac{I}{3}$, se pot scrie relațiile :

- pentru cablurile fără benzi feromagnetice de protecție :

$$Z_h = \frac{U_h}{I_h} = \frac{3U}{I} ; R'_c + 3R_p = A_3 = \frac{P}{3I_h^2} = \frac{3P}{I^2} ; X_a + 3X_p - 2X_s = B_3 =$$

$$= \sqrt{Z_h^2 - (R_c + 3R_p)^2} = \sqrt{Z_h^2 - A_3^2} \quad (5.14)$$

- pentru cablurile cu benzi feromagnetice de protecție :

$$Z_h = \frac{U_h}{I_h} = \frac{3U}{I} ; R'_c + 3R_p + \Delta R_{cb} = A_3 + \Delta R_{cb} = \frac{P}{3I_h^2} = \frac{3P}{I^2} \quad (5.15)$$

$$X_a + 3X_p - 2X_s + \Delta X_{cb} = B_3 + \Delta X_{cb} = \sqrt{Z_h^2 - (R'_c + 3R_p + \Delta R_{cb})^2} =$$

$$= \sqrt{Z_h^2 - (A_3 + \Delta R_{cb})^2}$$

Cunoscînd rezistențele și reactanțele se poate scrie în complex :

- pentru cablurile fără bandaje feromagnetice de protecție :

$$\underline{Z}_h = R'_c + 3R_p + j(X_a + 3X_p - 2X_s) = A_3 + jB_3 = Z_h e^{j\varphi} \quad (5.16)$$

$$\text{unde } \operatorname{tg} \varphi = \frac{X_a + 3X_p - 2X_s}{R'_c + 3R_p} = \frac{B_3}{A_3}$$

- pentru cablurile cu bandaje feromagnetice de protecție :

$$\underline{Z}_h = R'_c + 3R_p + \Delta R_{cb} + j(X_a + 3X_p - 2X_s + \Delta X_{cb}) = A_3 + \Delta R_{cb} + j(B_3 + \Delta X_{cb}) = Z_h e^{j\varphi} \quad (5.17)$$

$$\text{unde } \operatorname{tg} \varphi = \frac{X_a + 3X_p - 2X_s + \Delta X_{cb}}{R'_c + 3R_p + \Delta R_{cb}} = \frac{B_3 + \Delta X_{cb}}{A_3 + \Delta R_{cb}}$$

./.

5.1.4. Schema experimentală pentru măsurarea mărimilor A_4 și B_4

Din relația (3.41) rezultă că mărimile A_4 și B_4 intervin în expresiile impedanței de secvență omopolară a unui cablu în cazul considerării întoarcerii curentului numai prin învelișurile metalice diamagnetice. Întrucât în benzile feromagnetice de protecție fluxul magnetic, în orice moment, este zero, rezultă că relația (3.41) este general valabilă, independent de construcția cablului. Aceste considerente au stat la baza elaborării schemei experimentale de măsurare, prezentată în figura 5.5. Ampermetrele A_R , A_S și A_T sînt folosite pentru verificarea egalității curenților I_{hR} , I_{hS} și I_{hT} .

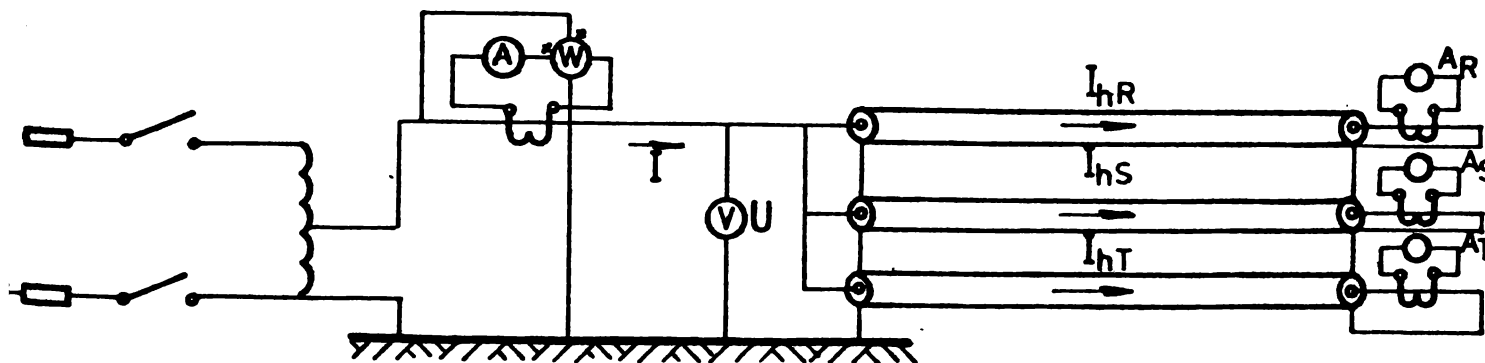


Fig.5.5.

Notînd cu U tensiunea, cu I curentul, cu P puterea activă corespunzătoare și țînînd cont că $I_{hR} = I_{hS} = I_{hT} = \frac{I}{3}$ se pot scrie relațiile :

$$Z_h = \frac{U_h}{I_h} = \frac{3U}{I}; R_c + R_f = A_4 = \frac{P}{3I_h^2} = \frac{3P}{I^2}; X_a - X_{fa} = B_4 = \sqrt{Z_h - (R_c + R_f)^2} = \sqrt{Z_h - A_4^2}$$

(5.10)

Relațiile (5.18) sînt valabile atît pentru cablurile cu bandaje feromagnetice de protecție, cît și pentru cele fără aceste elemente constructive de protecție mecanică.

Cu aceste precizări se poate scrie în complex :

$$\underline{Z}_h = R'_c + R'_1 + j(X_a - X_{\hat{1}a}) = A_4 + jB_4 = Z_h e^{j\varphi} ,$$

în care

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_a - X_{\hat{1}a}}{R'_c + R'_1} = \frac{B_4}{A_4} \quad (5.19)$$

5.1.5. Schema experimentală pentru măsurarea mărimilor A_5 și B_5

Din relațiile (3.48) și (3.49) rezultă că mărimile A_5 și B_5 intervin în expresiile impedanței omopolare a învelișului metalic al unui conductor de fază cu considerarea întoarcerii curenților numai prin pămînt. Relațiile de calcul pentru această impedanță sînt date pentru cele două variante de realizare a unui cablu trifazat, cu și fără benzi feromagnetice de protecție. Aceste considerente au stat la baza elaborării schemei experimentale de măsurare, prezentată în figura 5.6. Ampermetrele A_R , A_S și A_T sînt folosite pentru verificarea egalității curenților $I_{h\hat{1}R} = I_{h\hat{1}S} = I_{h\hat{1}T}$

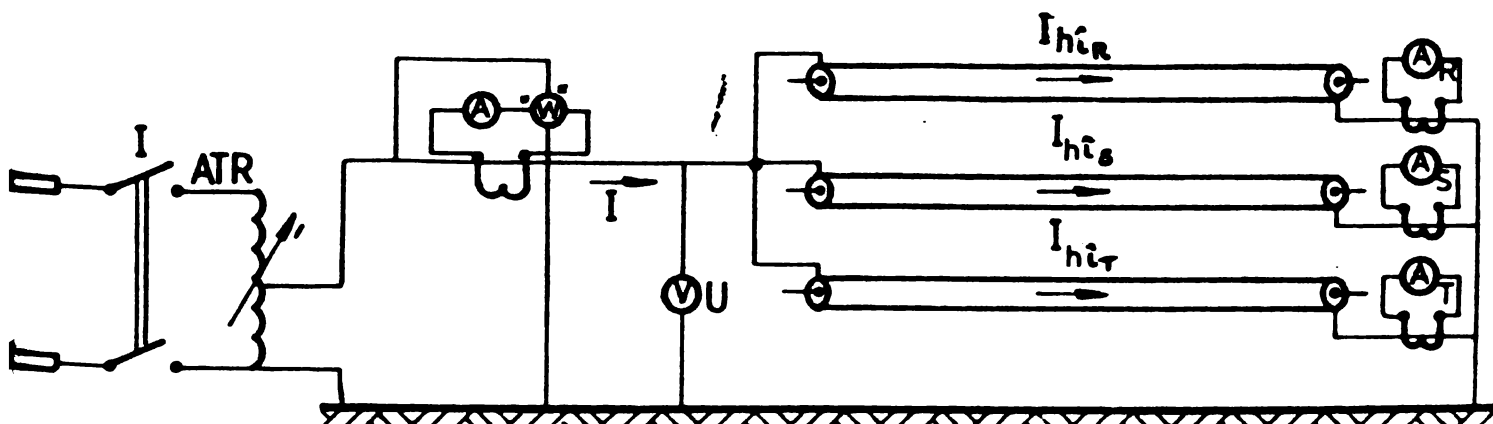


Fig. 5.6.

Notînd cu U tensiunea, cu I curentul, cu P puterea activă corespunzătoare și ținînd cont că $I_{h\hat{1}R} = I_{h\hat{1}S} = I_{h\hat{1}T} = \frac{I}{3}$ se pot scrie relațiile :

- pentru cablurile fără benzi feromagnetice de protecție

$$\begin{aligned} Z_{h\hat{1}} = \frac{U_{h\hat{1}}}{I_{h\hat{1}}} &= \frac{3U}{I}; R_{\hat{1}}^2 + 3R_p = A_5 = \frac{P}{3I_{h\hat{1}}^2} = \frac{3P}{I^2}; X_{\hat{1}a} + 3X_p - 2X_s = B_5 = \\ &= \sqrt{Z_{h\hat{1}}^2 - (R_{\hat{1}}^2 + 3R_p)^2} = \sqrt{Z_{h\hat{1}}^2 - A_5^2} \end{aligned} \quad ;$$

(5.20)

- pentru cablurile cu benzi feromagnetice de protecție:

$$\begin{aligned} Z_{h\hat{1}} = \frac{U_{h\hat{1}}}{I_{h\hat{1}}} &= \frac{3U}{I}; R_{\hat{1}}^2 + 3R_p + \Delta R_{\hat{1}b} = A_5 + \Delta R_{\hat{1}b} = \frac{P}{3I_{h\hat{1}}^2} = \frac{3P}{I^2} \\ X_{\hat{1}a} + 3X_p - 2X_s + \Delta X_{\hat{1}b} &= B_5 + \Delta X_{\hat{1}b} = \sqrt{Z_{h\hat{1}}^2 - (R_{\hat{1}}^2 + 3R_p + \Delta R_{\hat{1}b})^2} = \sqrt{Z_{h\hat{1}}^2 - (A_5 + \Delta R_{\hat{1}b})^2} \end{aligned}$$

(5.21)

Cu aceste precizări se poate scrie :

- pentru cablurile fără benzi feromagnetice de protecție

$$Z_{h\hat{1}} = R_{\hat{1}}^2 + 3R_p + j(X_{\hat{1}a} + 3X_p - 2X_s) = A_5 + jB_5 = Z_{h\hat{1}} e^{j\varphi}$$

(5.22)

unde :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_{\hat{1}a} + 3X_p - 2X_s}{R_{\hat{1}}^2 + 3R_p} = \frac{B_5}{A_5}$$

- pentru cablurile cu benzi feromagnetice de protecție:

$$\begin{aligned} Z_{hf} &= R_1^2 + 3R_p + \Delta R_{fb} + j(X_{1a} + 3X_p - 2X_s + \Delta X_{fb}) = A_5 + \Delta R_{fb} + j(B_5 + \Delta X_{fb}) = \\ &= Z_{hf} e^{j\varphi} \end{aligned} \quad (5.23)$$

unde :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_{1a} + X_p - 2X_s + X_{fb}}{R_1^2 + 3R_p + R_{fb}} = \frac{B_5 + \Delta X_{fb}}{A_5 + \Delta R_{fb}}$$

5.1.6. Impedanța omopolară a cablurilor cu considerarea
întoarcerii curentului prin pământ și învelișuri
în paralel

La paragrafele 5.1.1 - 5.1.5 s-au stabilit mărimile ce se măsoară, direct sau indirect, notate cu A_i și B_i , necesare pentru determinarea pe această cale a parametrilor constructivi ai cablurilor, cu și fără benzi feromagnetice de protecție.

Schemele de măsurare folosite au avut la baza elaborării lor, măsurări ale impedanței directe și ale impedanței de secvență omopolară, cu întoarcerea curentului numai prin pământ sau numai prin învelișurile metalice diamagnetice. Impedanța de secvență omopolară cu întoarcerea curentului prin pământ și învelișuri în paralel nu poate fi măsurată în mod direct pentru un cablu oarecare. Această impedanță poate fi însă determinată în funcție de mărimile măsurate la paragrafele 5.1.1 - 5.1.5, așa cum rezultă din relațiile (3.38) și (3.44).

Astfel, pentru cablurile cu benzi feromagnetice de protecție, impedanța omopolară cu întoarcere prin pământ și învelișuri în paralel, dată de relația (3.38) devine :

$$\underline{Z}_h = (A_1 + K \Delta R_{cb}) + j(B_4 + K \Delta X_{cb}) + \frac{(A_4 - A_1)(A_3 - A_1 + jB_5)}{A_5 + jB_5} \quad (5.24)$$

Pentru același cablu însă fără benzi feromagnetice de protecție, impedanța, dată de relația (3.44) devine :

$$\underline{Z}_h = A_1 + jB_4 + \frac{(A_4 - A_1)(A_3 - A_1 + jB_5)}{A_5 + jB_5} \quad (5.25)$$

Relațiile (5.24) și (5.25) prezintă avantajul de a permite folosirea directă a rezultatelor unor măsurări la determinarea impedanței de secvență omopolară în condițiile cele mai generale posibile de întoarcere a curentului prin pământ și învelișurile metalice în paralel. Pentru determinarea coeficientului K se folosește relația 4.19.

5.2. Determinarea pe cale experimentală a parametrilor cablurilor în condiții de laborator

Intr-o primă etapă s-au determinat pe cale experimentală, parametrii unui cablu realizat cu învelișuri metalice de plumb separat pentru fiecare fază și cu benzi metalice de protecție feromagnetice comune. Conductoarele fazelor sînt din aluminiu, cu secțiunea de 95 mm^2 . Cablul are tensiunea nominală de 20 kV.

Măsurările și încercările experimentale s-au făcut în condiții de laborator, cu cablul deci nepozat, lungimea totală a acestuia fiind de 29 m. Cablul a fost întins pe pământ cu capetele conductoarelor desfăcute, izolate față de pământ și pregătite prin curățire cu peria de sîrmă și ungere cu vaselina neutru pentru reali-

zarea schemelor experimentale analizate la paragrafele 5.1.1 - 5.1.5.

Datorită faptului că în condiții de laborator se pot determina numai rezistențele și reactanțele parțiale ce depind de caracteristicile constructive ale cablului, deci nu se pot determina parametrii R_p și X_p caracteristici pământului, calea de întoarcere s-a realizat practic dintr-un conductor multifilar de aluminiu, cu secțiunea de 150 mm^2 , în lungime totală de 45 m, cu o rezistență ohmică de $0,196 \Omega \text{ km}^{-1}$.

Distanța între cablu și latura paralelă cu acesta a buclei a fost de 8 m, astfel încît să fie satisfăcută cu suficientă precizie condiția de descreștere practic pînă la valoarea zero a inducției magnetice în dreptul căii de întoarcere a curentului.

Pentru efectuarea măsurărilor s-au folosit aparate de laborator cu clase de precizie 0,2 și 0,5. O atenție deosebită s-a dat realizării legăturilor electrice, contactelor electrice, atît din circuitul principal, cît și din circuitele aparatelor de măsură.

5.2.1. Măsurarea mărimilor A_1 și B_1

S-a folosit schema din figura 5.1, deci schema experimentală pentru măsurarea impedanței directe (inverse). În tabelul 5.1 sînt date valorile citirilor succesive, în număr de 6, ale tensiunilor, curenților și puterilor pentru fiecare fază în parte, respectiv valorile calculate ale impedanței, rezistenței și reactanței directe în baza măsurărilor făcute. Tabelul conține și media valorilor calculate pe faze pentru fiecare citire în parte, inclusiv valoarea medie, rezultată în baza mediei valorilor calculate pe faze.

Dintr-o analiza a mediilor valorilor calculate pe faze pentru fiecare citire în parte și a valorilor medii se trage

concluzia că în cazul rezistenței diferența este mică, $\pm 0,2\%$, atît între citirile succesive, cît și față de valoarea medie. Aceste diferențe sînt mai mari în cazul reactanței, $-13\% \div +14,5\%$, lucru explicabil prin greutățile întîmpinate în citirea unor valori relativ mici ale tensiunilor în condițiile oferite de o încercare de laborator.

In final s-au obținut următoarele rezultate :

$$A_1 + \frac{R_i^2(X_{ia}+X_s)^2}{R_i^2+(X_{ia}+X_s)^2} = R_d = R_i = 9,462 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$B_1 - \frac{(X_{ia}+X_s)^3}{R_i^2+(X_{ia}+X_s)^2} = X_d = X_i = 1,931 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (5.26)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_d}{R_d} = 0,204 ; \varphi = 11^{\circ}30'$$

și deci :

$$\underline{Z}_d = \underline{Z}_i = R_d + jX_d = 0,00967 e^{j11^{\circ}30'} \quad (5.27)$$

Tabelul 5.1

Nr. crt.	Mărimi măsurate								
	Faza R			Faza S			Faza T		
	U(V)	I(A)	P(W)	U(V)	I(A)	P(W)	U(V)	I(A)	P(W)
1	3,80	387,5	1410	3,80	390	1450	3,70	390	1430
2	3,70	384	1390	3,85	394	1500	3,72	391	1430
3	3,85	392,5	1480	3,80	392,5	1450	3,78	400	1500
4	3,85	392,5	1480	3,85	400	1510	3,80	398	1490
5	3,85	392,5	1480	3,85	397,5	1500	3,80	398	1490
6	3,85	391,5	1480	3,90	397,5	1490	3,78	399	1490

./.

Nr. crt.	Valori calculate în baza mărimilor măsurate					
	Faza R			Faza S		
	$Z_d \cdot 10^{-3} \Omega$	$R_d \cdot 10^{-3} \Omega$	$X_d \cdot 10^{-3} \Omega$	$Z_d \cdot 10^{-3} \Omega$	$R_d \cdot 10^{-3} \Omega$	$X_d \cdot 10^{-3} \Omega$
1	9,806	9,390	2,828	9,743	9,533	2,025
2	9,635	9,562	1,095	9,771	9,662	1,449
3	9,809	9,541	2,000	9,681	9,412	2,280
4	9,809	9,541	2,000	9,625	9,437	1,897
5	9,809	9,541	2,000	9,685	9,439	1,923
6	9,962	9,656	2,450	9,811	9,430	2,701

Nr. crt.	Valori calculate în baza mărimilor măsurate			Media valorilor calculate pe faze		
	Faza T					
	$Z_d \cdot 10^{-3} \Omega$	$R_d \cdot 10^{-3} \Omega$	$X_d \cdot 10^{-3} \Omega$	$Z_d \cdot 10^{-3} \Omega$	$R_d \cdot 10^{-3} \Omega$	$X_d \cdot 10^{-3} \Omega$
1	9,487	9,401	1,303	9,678	9,441	2,052
2	9,514	9,353	1,760	9,640	9,480	1,671
3	9,450	9,375	1,565	9,646	9,442	1,948
4	9,547	9,406	1,743	9,660	9,461	1,846
5	9,547	9,406	1,643	9,680	9,462	1,855
6	9,473	9,359	1,483	9,748	9,481	2,211
Valori medii :				9,675	9,462	1,931
$\underline{Z}_d = (9,462 + j 1,931) 10^{-3} \Omega$						

5.2.2. Măsurarea mărimii B₂

S-a folosit schema din figura 5.3, deci schema experimentală pentru măsurarea reactanței $X_a = B_2$. De fapt schema este specifică măsurării impedanței unei bucle cu laturile de dus și întors paralele, cu distanța între axe de 30 cm.

În tabelul 5.2 sînt date valorile citirilor succesive, în număr de 6, ale tensiunilor, curenților și puterilor. În baza acestor valori s-au calculat impedanțele Z , $R'_c + \frac{1}{3} \Delta R_{cb}$ și $X_a + \frac{1}{3} \Delta X_{cb}$ pentru fiecare citire în parte, inclusiv media valorilor citirilor succesive.

Tabelul 5.2.

Nr. crt.	Mărimi măsurate			Mărimi calculate în baza mărimilor măsurate		
	U(V)	I(A)	P(W)	$Z \cdot 10^{-3} \Omega$	$(R_c' + \frac{1}{3} \Delta R_{cb}) \cdot 10^{-3} \Omega$	$(X_a + \frac{1}{3} \Delta X_{cb}) \cdot 10^{-3} \Omega$
1	13,80	245	1350	56,326	22,490	51,641
2	13,60	242	1320	56,198	22,539	51,480
3	13,60	242	1320	56,198	22,539	51,480
4	13,50	240	1310	56,250	22,743	51,447
5	13,60	242	1300	56,198	22,197	51,628
6	13,90	245	1330	56,734	22,157	52,229
Valori medii				56,317	22,444	51,650
$Z = (22,444 + j51,650) 10^{-3} \Omega$						

Cablul la care s-au făcut măsurările este prevăzut cu bandaje feromagnetice de protecție și deci la calculele efectuate în baza valorilor măsurate s-au folosit relațiile (5.12). Se observă că între valorile calculate pentru citiri succesive și valorile medii diferența este mică, cuprinsă între $\pm 1,3\%$ pentru rezistențe și între $-0,4\%$ și $+1,1\%$ pentru reactanțe, ceea ce confirmă valabilitatea datelor obținute experimental.

În concluzie, din măsurări a rezultat :

$$R_c' + \frac{1}{3} \Delta R_{cb} = 22,444 \cdot 10^{-3} \Omega \quad ; \quad X_a + \frac{1}{3} \Delta X_{cb} = 51,650 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (5.28)$$

Pentru cablurile fără bandaje feromagnetice de protecție $\frac{1}{3} \Delta X_{cb} = 0$ și deci cu schema experimentală folosită s-ar fi obținut direct reactanța $X_a = B_2$.

5.2.3. Măsurarea mărimilor A_4 și B_4

S-a folosit schema din figura 5.5, deci schema experimentală pentru măsurarea impedanței omopolare a conductorului

de fază cu considerarea întoarcerii curentului numai prin învelișuri. În tabelul 5.3. sînt date valorile citirilor succesive, în număr de 6, iar tehnica de calcul este identică cu cea prezentată la paragraful 5.3.2.

Tabelul 5.3.

Nr. crt.	Mărimi măsurate			Mărimi calculate în baza mărimilor măsurate		
	U(V)	I(A)	P(W)	$Z_h \cdot 10^{-3} \Omega$	$(R_c^i + R_1^i) \cdot 10^{-3} \Omega$	$(X_a - X_{ia}) \cdot 10^{-3} \Omega$
1	5,35	340	1817	47,205	47,153	2,213
2	5,34	341	1816	46,979	46,852	1,378
3	5,35	340	1816	47,205	47,128	2,701
4	5,34	341	1816	46,979	46,852	1,378
5	5,35	340	1817	47,205	47,153	2,213
6	5,35	340	1817	47,205	47,153	2,213
Valori medii				47,100	47,043	2,016
$\underline{Z}_h = (47,043 + j 2,016) 10^{-3} \Omega$						

Se observă că diferențele între valorile calculate pentru citirile succesive și valorile medii sînt mici pentru suma rezistențelor $R_c^i + R_1^i$, fiind cuprinse între - 0,4 % și + 0,23 % și relativ mari pentru diferența reactanțelor $X_a - X_{ia}$, fiind cuprinse între - 31% și + 34%. Această diferență din urmă între valorile citirilor succesive se explică prin valoarea mare a raportului, $\frac{R_c^i + R_1^i}{X_a - X_{ia}} \cong 20$.

În concluzie, din măsurări a rezultat :

$$A_4 = R_c^i + R_1^i = 47,043 \cdot 10^{-3} \Omega ; \quad B_4 = X_a - X_{ia} = 2,016 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (5.29)$$

$$\tan \varphi = \frac{B_4}{A_4} = \frac{X_a - X_{ia}}{R_c^i + R_1^i} = 0,426 \Omega ; \quad \varphi = 2^\circ 42'$$

și deci: $\underline{Z}_h = 47,1 \cdot 10^{-3} e^{j 2^\circ 42'} \Omega$

5.2.4. Măsurarea mărimilor A_5 și B_5

S-a folosit schema din figura 5.6, deci schema experimentală pentru măsurarea impedanței omopolare a învelișului metalic al unui conductor de fază cu considerarea întoarcerii curentului numai prin pământ. În tabelul 5.4 sînt date valorile citirilor succesive. Tehnica de calcul pentru mărimile A_5 și B_5 este asemănătoare cu cea prezentată la paragrafele precedente.

Tabelul 5.4.

Nr. crt.	Mărimi măsurate			Mărimi calculate în baza mărimilor măsurate.		
	U(V)	I(A)	P(W)	$Z_H \cdot 10^{-3} \Omega$	$(R_1 + 3R_p + \Delta R_{fb}) \cdot 10^{-3} \Omega$	$(X_{fa} + 3X_p - 2X_s + \Delta X_{fb}) \cdot 10^{-3} \Omega$
1	23,50	340	3900	207,352	101,211	180,974
2	24	345	3900	208,695	98,298	184,095
3	23,50	335	3850	207,352	102,918	180,008
4	23,50	335	3850	207,352	102,918	180,008
5	23,50	335	3850	207,352	102,918	180,008
6	23,40	337	3850	207,350	100,823	182,327
Valori medii				207,5762	101,516	181,237

$$Z_h = (101,516 + j 181,237) 10^{-3} \Omega$$

Se observă că diferențele între valorile calculate pentru citirile succesive și valorile medii sînt relativ mici, cuprinse între - 3,16% și 1,4% pentru suma rezistențelor $(R_1 + 3R_p + \Delta R_{fb})$ și între - 0,68% și + 1,58% pentru suma reactanțelor $X_{fa} + 3X_p - 2X_s + \Delta X_{fb}$.

Cablul la care s-au făcut măsurările este prevăzut cu bandaje feromagnetice de protecție și deci la calculele efectuate în baza valorilor măsurate s-au folosit relațiile (5.22).

In final, din măsurători a rezultat :

$$A_5 + \Delta R_{1b} = R_1' + 3R_p + \Delta R_{1b} = 101,516 \cdot 10^{-3} \Omega ;$$

$$B_5 + \Delta X_{1b} = X_{1a} + 3X_p - 2X_s + \Delta X_{1b} = 181,237 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{B_5 + \Delta X_{1b}}{A_5 + \Delta R_{1b}} = \frac{X_{1a} + 3X_p - 2X_s + \Delta X_{1b}}{R_1' + 3R_p + \Delta R_{1b}} = 1,7855 ; \varphi = 60^{\circ}45'$$

$$\underline{Z}_h = 207,5762 \cdot 10^{-3} e^{j 60^{\circ}45'} \Omega \quad (5.30)$$

5.2.5. Calculul rezistențelor și reactanțelor inductive în baza măsurărilor

In baza măsurărilor de la paragrafele 5.2.1 - 5.2.4 au rezultat următoarele relații pentru calculul rezistențelor :

$$\left\{ \begin{array}{l} R_c' + \frac{R_1' (X_{1a} + X_s)^2}{R_1'^2 + (X_{1a} + X_s)^2} = 9,462 \cdot 10^{-3} \Omega \\ R_c' + R_1' = 47,042 \cdot 10^{-3} \Omega \\ R_1' + 3R_p + \Delta R_{1b} = 101,516 \cdot 10^{-3} \Omega \\ R_c' + \frac{1}{3} \Delta R_{cb} = 22,444 \cdot 10^{-3} \Omega \end{array} \right. \quad (5.31)$$

Considerînd că $\Delta R_{cb} = \Delta R_{1b}$ și ținînd cont de faptul că termenul $\frac{R_1' (X_{1a} + X_s)^2}{R_1'^2 + (X_{1a} + X_s)^2} \leq 0,5 \cdot 10^{-2} R_c'$ conform [45], el se

poate neglija deci relațiile (5.31) constituie un sistem de 4 necunoscute prin rezolvarea căruia se obține :

./.

$$\left\{ \begin{array}{l} R_c' = 9,462 \cdot 10^{-3} \Omega \\ R_1' = 37,628 \cdot 10^{-3} \Omega \\ \Delta R_{cb} = \Delta R_{\hat{1}b} = 39,090 \cdot 10^{-3} \Omega \\ R_p = 8,266 \cdot 10^{-3} \Omega \end{array} \right. \quad (5.32)$$

Pentru reactanțe, din aceleași măsurători, au rezultat următoarele relații de calcul :

$$\left\{ \begin{array}{l} X_a + X_s - \frac{(X_{\hat{1}a} + X_s)^3}{R_1'^2 + (X_{\hat{1}a} + X_s)^2} = 1,931 \cdot 10^{-3} \Omega \\ X_a - X_{\hat{1}a} = 2,016 \cdot 10^{-3} \Omega \\ X_{\hat{1}a} + 3X_p - 2X_s + \Delta X_{\hat{1}b} = 181,237 \cdot 10^{-3} \Omega \\ X_a + \frac{1}{3} \Delta X_{cb} = 51,65 \cdot 10^{-3} \Omega \end{array} \right. \quad (5.33)$$

Din capitolul 2, paragraful 2.3.2 a rezultat că

$\Delta X_{cb} = \Delta X_{\hat{1}b}$. Pentru măsurarea acestor reactanțe trebuie să se dispună de două cabluri identice, unul însă fără bandaje feromagnetice de protecție, iar celălalt cu aceste bandaje.

Nu s-a dispus astfel de cabluri și deci la rezolvarea sistemului de ecuații (5.33) se admit ca valabile valorile acestor reactanțe obținute din calculul lor în baza caracteristicilor constructive, relația (2.41) și tabelul 5.5.

$$\Delta X_{cb} = \Delta X_{\hat{1}b} = 133,26 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (5.34)$$

Tinând cont de faptul că termenul

$$\frac{(X_{\hat{1}a} + X_s)^3}{R_1'^2 + (X_{\hat{1}a} + X_s)^2} \leq 2 \cdot 10^{-4} X_a, \text{ conform [45] se poate neglija,}$$

sistemul (5.33) devine :

$$\begin{cases} X_a + X_s = 1,931 \cdot 10^{-3} \Omega \\ X_a - X_{\hat{1}a} = 2,016 \cdot 10^{-3} \Omega \\ X_{\hat{1}a} + 3X_p - 2X_s = 47,976 \cdot 10^{-3} \Omega \\ X_a = 7,23 \cdot 10^{-3} \Omega \end{cases} \quad (5.35)$$

Rezolvînd acest sistem de ecuații se obține :

$$\begin{cases} X_a = 7,23 \cdot 10^{-3} \Omega \\ X_s = -5,299 \cdot 10^{-3} \Omega \\ X_{\hat{1}a} = 5,214 \cdot 10^{-3} \Omega \\ X_p = 10,721 \cdot 10^{-3} \Omega \end{cases} \quad (5.36)$$

5.3. Parametrii cablului calculați în funcție de elementele constructive

Caracteristicile constructive de bază ale cablului au fost prezentate la începutul paragrafului 5.2. În completare, pentru calcul, mai sînt necesare :

$$\begin{aligned} r_c &= 6,25 \text{ mm. raza conductorului din aluminiu al unei faze ;} \\ r_e &= 15,3 \text{ mm. raza exterioară a învelișului diamagnetic} \\ &\quad \text{(manta de plumb) ;} \\ r_i &= 13,5 \text{ mm. raza interioară a învelișului diamagnetic ;} \\ r_{eb1} &= 39,5 \text{ mm. raza exterioară a benzilor feromagnetice} \\ &\quad \text{de protecție din stratul exterior ;} \\ r_{ib1} &= 38,5 \text{ mm. raza interioară a benzii feromagnetice} \\ &\quad \text{de protecție din stratul exterior ;} \\ r_{eb2} &= 38,5 \text{ mm. raza exterioară a benzilor} \\ &\quad \text{feromagnetice de protecție din} \\ &\quad \text{stratul interior ;} \\ r_{ib2} &= 37,5 \text{ mm. raza interioară a benzilor feromagnetice} \\ &\quad \text{de protecție din stratul interior.} \end{aligned} \quad (5.37)$$

Relațiile de calcul ale parametrilor unui cablu în funcție de elementele constructive au fost stabilite în cap.2 al lucrării.

În condițiile de laborator în care s-au făcut măsurările nu se pune problema efectului de proximitate, deci :

$$R'_c = R_{cc} + R_{cp} \quad (5.38)$$

Rezistența suplimentară ca urmare a pierderilor în învelișurile metalice diamagnetice care intervine în relația (3.34) raportată la lungimea l este :

$$\frac{R'_1 (X_{1a} + X_s)^2}{R'_1{}^2 + (X_{1a} + X_s)^2} = 0,041 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (5.39)$$

Pentru secțiuni ale conductoarelor cablurilor de 95 mm² rezistența suplimentară ca urmare a efectului pelicular este neglijabilă (tabelul 2.1). De asemenea, ținând cont de lungimea reală a firelor mai mare cu (2 - 6) % decât lungimea conductorului [1, 2, 3] rezultă :

$$R'_c = R_{cc}(1+0,04) = 1,04 \varrho \frac{l}{s} = 9,344 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (5.40)$$

În relația (5.40) s-a luat $\varrho = 2,94 \cdot 10^{-2} \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$, o lungime reală a firelor mai mare decât lungimea cablului cu 4 %, iar $l = 29 \text{ m}$.

Rezistența echivalentă în c.a a învelișului metalic diamagnetic este dată de relația (2.13) :

$$R_{\hat{1}} = R'_1 + \Delta R_{\hat{1}b} = R_{\hat{1}c} + \Delta R_{\hat{1}b} \quad (5.41)$$

$$R'_1 = R_{\hat{1}c} = \frac{\varrho_{pb} \cdot l}{(r_e^2 - r_i^2)} = 41,025 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (5.42)$$

In relația (5.42) s-a luat $\rho_{Pb} = 0,252 \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}$ și
 $l = 29 \text{ m}$.

Reactanța X_a este dată de relația (2.25) raportată la
lungimea l :

$$X_a = 0,1445 l \cdot \lg \frac{30}{\text{RMG}_{1c}} = 7,495 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (5.43)$$

$$\text{In relația (5.43) } \text{RMG}_{1c} = 0,7788 \cdot \frac{12,5}{2} = 4,8675 \text{ mm},$$

iar $l = 29 \text{ m}$.

Reactanța X_s este dată de relația (2.30), raportată
lungimea l :

$$X_s = 0,1445 l \cdot \lg \frac{\text{DMG}_{3c}}{30} = -4,156 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (5.44)$$

$$\text{In relația (5.44) } \text{DMG}_{3c} = 30,6 \text{ mm și } l = 29 \text{ m}.$$

Reactanța X_{ia} este dată de relația (2.38) raportată
la lungimea l :

$$X_{ia} = 0,1445 l \cdot \lg \frac{2 \cdot 30}{r_e + r_i} = 5,519 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (5.45)$$

$$\text{In relația (5.45) } \frac{r_e + r_i}{2} = 14,4 \text{ mm și } l = 29 \text{ m}.$$

Reactanța suplimentară ca urmare a pierderilor în
învelișurile metalice diamagnetice, care intervine în relația (3.34),
raportată la lungime l este :

$$\frac{(X_{ia} + X_s)^2}{R_i^2 + (X_{ia} + X_s)^2} = 1,502 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (5.46)$$

Rezistența suplimentară datorită pierderilor din ban-
dajele feromagnetice de protecție este dată de relația (2.6), ra-
portată la lungimea l a cablului :

$$\Delta R_{cb} = \frac{3}{\sqrt{2}\pi\delta^2\sigma} \left[\frac{\operatorname{sh}y + \sin y}{\operatorname{ch}y - \cos y} \left(\frac{1}{\alpha_2} + \frac{1}{\alpha_1} \right) - \frac{4}{\sqrt{\alpha_2\alpha_1}} \cdot \frac{\operatorname{ch}\frac{y}{2}\sin\frac{y}{2} + \operatorname{sh}\frac{y}{2}\cos\frac{y}{2}}{\operatorname{ch}y - \cos y} \right] l \quad (5.47)$$

Cu $\mu_r = 700$, $f = 50$ Hz și $\sigma = 6,67 \cdot 10^6$ S/m pentru benzile de oțel adîncimea de pătrundere are valoarea [88] :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}} = 0,1042 \text{ cm} \quad (5.48)$$

Cu aceste precizări coeficienții α_1 și α_2 , notați cu α_{11} și α_{12} pentru benzile exterioare și α_{12} și α_{22} pentru benzile interioare devin :

$$\alpha_{11} = \sqrt{2} \frac{r_{ib1}}{\delta} = 52,037 \quad ; \quad \alpha_{21} = \sqrt{2} \frac{r_{eb1}}{\delta} = 53,450$$

$$\alpha_{12} = \sqrt{2} \frac{r_{ib2}}{\delta} = 50,743 \quad ; \quad \text{și } \alpha_{22} = \sqrt{2} \frac{r_{eb2}}{\delta} = 52,019$$

și deci :

$$y_1 = \frac{2(\alpha_{21} - \alpha_{11})}{\sqrt{2}} \cong 1,9 \quad ; \quad y_2 = \frac{2(\alpha_{22} - \alpha_{12})}{\sqrt{2}} = 1,9$$

Rezultă : $y_1 = y_2$ (5.49)

Din lucrarea [88], tabelul 4 se obține :

$$\frac{\operatorname{sh}y_1 + \sin y_1}{\operatorname{ch}y_1 - \cos y_1} = \frac{\operatorname{sh}y_2 + \sin y_2}{\operatorname{ch}y_2 - \cos y_2} = 1,126$$

$$\operatorname{sh}\frac{y_1}{2}\cos\frac{y_1}{2} + \operatorname{ch}\frac{y_1}{2}\sin\frac{y_1}{2} = \operatorname{sh}\frac{y_2}{2}\cos\frac{y_2}{2} + \operatorname{ch}\frac{y_2}{2}\sin\frac{y_2}{2} = 1,566 \quad (5.50)$$

$$\operatorname{ch}y_1 - \cos y_1 = 3,741$$

./.

Tinând cont de construcția benzilor feromagnetice, care se suprapun în sensul axial al cablului pe 33,3 % din lungimea acestuia, precum și de lungimea l a cablului, rezultă :

$$\Delta R_{cb} = 40,12 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (5.51)$$

Reactanța inductivă suplimentară datorită pierderilor în benzile feromagnetice de protecție este dată de relația (2.41) raportată la lungimea l a cablului, care trebuie să țină cont de construcția benzilor, suprapuse în sensul axial al cablului pe 33,3 % din lungimea acestuia. Din această relație rezultă :

$$\Delta X_{cb} = 0,133 \Omega \quad (5.52)$$

Așa cum s-a precizat la începutul capitolului 5, pentru schemele la care s-a utilizat un conductor de aluminiu drept cale de întoarcere, parametrii calculați ai acestuia sînt :

$$R_p = 0,196 \cdot 0,045 = 8,82 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (5.53)$$

$$X_p = 0,45 \cdot 0,029 = 13,06 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Se precizează că în prima relație (5.53) 0,196 este rezistența unui conductor multifilar din aluminiu de 150 mm^2 în lungime de 1 km, iar în cea de a doua 0,45 este reactanța specifică a conductorului și se calculează cu relația (2.27) în care DMG_{3c} devine D_{12} respectiv distanța între cablu și calea de întoarcere ($D_{12} = 8 \text{ m}$).

5.4. Analiza comparativă a valorilor obținute prin calcul în funcție de elementele constructive și pe cale experimentală

În tabelul 5.5. sînt prezentate valorile rezistențelor și reactanțelor obținute pe cele două cai, prin calcul în funcție de elementele constructive și prin cale experimentală.

Tabelul 5.5.

Parametrul	Valori rezultate în baza măsurărilor experimentale $10^{-3} (\Omega)$	Valori calculate în funcție de caract. constructive $10^{-3} (\Omega)$	Diferența col.3 - col.2	
			în valori absolute $10^{-3} (\Omega)$	în procente %
1	2	3	4	5
R'_c	9,462	9,344	- 0,118	- 1,262
R'_i	37,628	41,025	+ 3,397	+ 8,28
$\Delta R_{cb} = \Delta R_{ib}$	39,090	40,120	+ 1,030	+ 2,567
R_p	8,266	8,820	+ 0,554	+ 6,349
X_a	7,230	7,495	+ 0,265	+ 3,535
X_s	-5,299	-4,156	+ 1,143	+ 27,5
X_{ia}	5,214	5,519	+ 0,305	+ 5,526
X_p	10,721	13,06	+ 2,339	+ 17,91

Pentru stabilirea diferențelor în valori absolute și în procente, în tabelul 5.5. s-au considerat de referință valorile obținute prin calcul în funcție de caracteristicile constructive ale cablului, (col.3). De asemenea, la calculul rezistențelor și reactanțelor suplimentare, $\Delta R_{cb} = \Delta R_{ib}$ și $\Delta X_{cb} = \Delta X_{ib}$, în funcție de caracteristicile constructive, s-a ținut cont de construcția benzilor feromagnetice de protecție. Astfel, una din benzi este exterioară, iar cealaltă este interioară și se suprapun, în sens axial, în proporție de 33 %.

Din analiza comparativă a celor două grupe de valori, se desprind următoarele concluzii mai importante :

- pentru rezistența conductorului R'_c valorile

obținute pe cele două căi sînt foarte apropiate, diferența fiind de ordinul a 1 % ;

- pentru rezistența învelișului metalic diamagnetic, realizat din plumb, diferența între cele două grupe de valori este ceva mai mare, explicabilă prin faptul că la calculul rezistenței în baza caracteristicilor constructive ale cablului valoarea rezistivității plumbului, luată din literatură, e diferită de cea reală ;

- pentru reactanțele X_a și $X_{\hat{a}}$ cele două grupe de valori sînt apropiate, diferențele fiind cuprinse în limitele a $4 \approx 5$ % ;

- legăturile electrice între conductoarele cablurilor realizîndu-se în schemele de măsurare folosite, cu cleme, s-au introdus în circuitele aferente rezistențe de contact suplimentare a căror valoare a fost sub $3 \cdot 10^{-4} \Omega$ astfel că erorile de determinare a rezistențelor au fost mai mici decît 3,5 % ;

- măsurările în condițiile de laborator fiind făcute la lungimi mici de cablu, cu valori ale parametrilor de ordinul milimilor de ohmi, chiar în condițiile folosirii unor aparate de clasă de precizie bună, pot conduce la erori mari ca de exemplu în cazul reactanței X_s .

Observația generală care se desprinde din această analiză este apropierea dintre valorile rezistențelor și reactanțelor inductive obținute pe cale de calcul în funcție de caracteristicile constructive ale cablului și cele rezultate pe bază de măsurări, ceea ce confirmă implicit valabilitatea relațiilor de calcul prezentate în lucrare, a schemelor și tehnicii de măsurare folosite.

6. IMPLEMENTAREA TEORIILOR ÎN SECTORUL EXPERIMENTAL

Încercările experimentale începute în condițiile de laborator au fost continuate într-un sector de rețea reală, ce a permis determinarea parametrilor influențați de natura solului în care se pozează cablurile, cât și de modul de legarea acestora la pământ. Metodologia pentru măsurarea parametrilor este aceeași, prezentată în cap.5.

Parametri calculați pe baza relațiilor stabilite în cap.2 și confirmați experimental în cap.5 și prima parte a cap.6, au permis trecerea la încercări experimentale privind repartiția curentului de scurtcircuit monofazat pe căile de întoarcere.

Stabilirea repartiției curentului de scurtcircuit monofazat constituie obiectivul prioritar al tezei, ca o contribuție personală a autorului lucrării, în care s-au confirmat compatibilitățile dintre enunțările teoretice făcute în cap.3 și 4 și încercările experimentale în condițiile de alimentare cu tensiune nominală a rețelei aferente sectorului experimental.

Corespunzător scopului urmărit o preocupare importantă a autorului lucrării a constituit-o organizarea sectorului experimental și a măsurătorilor sistematice vizînd căile de întoarcere ale curentului de scurtcircuit monofazat.

Organizarea sectorului experimental a comportat rezolvarea unei game complexe de probleme și anume :

- delimitarea sectorului experimental ;
- realizarea instalațiilor primare în sector corespunzătoare funcționării cu neutrul tratat prin rezistor (bobina de creare a neutrului artificial, rezistorul, refacerea legăturilor la pământ ale învelișurilor cablurilor pentru asigurarea stabilității la scurtcircuit) ;

- realizarea comutației secundare corespunzătoare tratării neutrului prin rezistor, scheme și elemente fizice ;

- stabilirea liniilor de telecomunicații afectate de măsurători și a măsurilor de adoptat ;

- stabilirea măsurilor tehnico-organizatorice pentru prevenirea riscului apariției unor tensiuni de pas și de atingere periculoase (izolarea nulului de protecție de nulul de lucru, izolarea zonelor periculoase, etc) ;

- stabilirea locului de scurtcircuit în condiții de solicitare maximă a elementelor componente ale rețelei, care condiționează dimensionarea acestora ;

- realizarea prizei experimentale, total separată de priza existentă.

Metodologia de măsurare a cuprins :

- stabilirea punctelor de măsurare (sursa, locul de scurtcircuit, instalațiile de telecomunicații) ;

- elaborarea schemelor de măsură (planta 2), inclusiv ale elementelor de telecomandă și a surselor de alimentare ;

- stabilirea mărimilor ce se măsoară și predeterminarea prin calcul a valorilor acestora pentru etalonarea aparatelor ;

- elaborarea programului de măsurători, corelat cu programul de manevre ;

- asigurarea pornirii simultane a aparatelor înregistratoare.

Compararea valorilor rezultate din calcul cu cele măsurate pentru confirmarea metodei de determinare a repartiției curenților de scurtcircuit monofazat a constituit partea finală a acestei încercări.

6.1. Prezentarea sectorului experimental

Sectorul experimental s-a organizat în rețeaua de 20 kV alimentată din stația 110/20 kV Pitagori-Vest.

Schema electrică a rețelei de 20 kV este prezentată în planta 1 anexată, cu indicarea caracteristicilor tehnice ale cablurilor, a materialului conductorului (cupru sau aluminiu),

lungimii tronsoanelor de cablu și a secțiunii conductoarelor.
De asemenea, pentru posturile de transformare sînt indicate numărul
afereent, puterea transformatorului și caracteristicile de bază ale
siguranțelor de protecție pe partea de medie tensiune.

Stația de transformare 110/20 kV Pitești-Vest este
echipată cu două transformatoare 110/20 kV, 16 MVA, fiind racordată
prin dublu circuit pe partea de 110 kV la stația 110/20 kV Pitești
Nord. Stația este prevăzută cu bare duble atît pe partea de 110 kV, ;
cît și pe partea de 20 kV, cu cuple transversale. Tratarea neutrului
rețelei de 20 kV este realizată printr-un rezistor de 7Ω , 20 kV,
racordat la punctul neutru artificial creat printr-o bobină trifazată
de 20 kV, 1000 A, conexiunea Z_0 , legată bloc la bornele de 20 kV ale
transformatorului nr.1 de 110/20 kV.

Rezistorul pentru tratarea neutrului este construit
din elemente de fontă tip grile, grupate în baterii care la rîndul
lor formează 5 rezistoare modul.

Cele 5 rezistoare modul sînt dispuse vertical, consoli-
date cu un cadru din profile de tablă îndoite, izolate între ele și
față de cadrul metalic cu izolatoare suport de 10 kV cu armare in-
terioară. Rezistorul modul este compus din 12 baterii de elemente de
fontă dispuse în două straturi și consolidate cu un cadru metalic,
fiind izolate față de acesta cu izolatoare suport de 3 kV. O baterie
de elemente este formată din 20 de grile dispuse cîte două în
paralel și apoi înseriate. Legăturile electrice interioare sînt reali-
zate cu bară rotundă de oțel zincat \varnothing 16 mm.

Racordarea rezistorului la neutrul rețelei se face
printr-un izolator de trecere de 20 kV iar racordarea la priza de
pămînt a stației se face printr-un izolator de trecere de 6 kV.

Cele 5 rezistoare modul sînt protejate ~~fa~~ de acțiunea agenților exteriori cu un înveliș din foi de tablă, iar pentru asigurarea unei răcirii naturale, două fețe opuse ale rezistorului sînt prevăzute cu fante pentru circulația aerului de răcire.

Rețeaua de 20 kV alimentată din stația Pitești-Vest este împărțită în 4 zone și anume :

- zona Banat, alimentată prin două distribuitoare în cablu de cupru cu secțiunile de 70-120 mm², cuprinzînd 6 posturi de transformare ;

- zona Exercițiu, alimentată prin trei distribuitoare în cablu de cupru cu secțiunile de 70 - 120 mm², cuprinzînd 10 posturi de transformare ;

- zona Trivale, alimentată din stația Pitești-Vest printr-un feeder în cablu de cupru de 120 mm², și PA Trivale, cuprinzînd 27 posturi de transformare ;

- zona Pitești-Sud, alimentată din stația Pitești-Vest printr-un cablu de cupru de 120 mm² și PA Pitești-Sud, cuprinzînd 21 posturi de transformare .

Rețeaua de distribuție de 20 kV de mai sus este formată din 29 km cablu și 1 km LEA, deci în proporție de 96,7% din cablu. În total, sectorul experimental are 64 posturi de transformare și 4 puncte de alimentare. Punctele de alimentare și posturile de transformare funcționează radial cu posibilitate de buclare.

Posturile de transformare au transformatoare cu puterea cuprinsă între 250 și 630 kVA. Din aceste posturi de transformare se alimentează cu energie electrică atât consumatorii casnici cît și cei industriali, ponderea cea mai mare revenind celor industriali

Cablurile de 20 kV de alimentare a posturilor de transformare sînt realizate în cea mai mare parte sub formă de cabluri trifazate cu învelișuri de protecție pe faze, mantale de plumb și benzi feromagnetice de protecție. Cablurile au conductoarele din cupru și aluminiu, cu secțiuni cuprinse între 50 - 150 mm². Cablurile sînt pozate în șanțuri amplasate în lungul străzilor, fără traversări sau subtraversări de elemente de construcție realizate din subansamble masive feromagnetice (poduri, țevi de gaze, țevi de apă etc).

În figura 6.1. este prezentată porțiunea din rețeaua în cablu de 20 kV în care s-au făcut cele mai multe din măsurătorile și probele analizate în acest capitol.

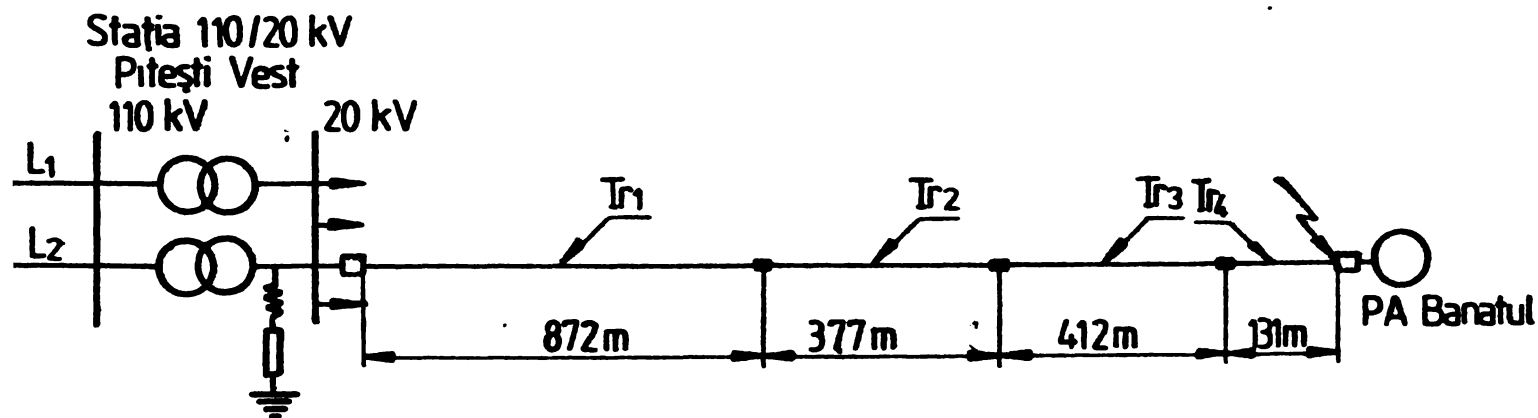


Fig.6.1.

Este o linie aeriană în lungime totală de 1792 m, alimentată radial din stația Pitești-Vest, scurtcircuitele monofazate experimentale fiind realizate la PA Banatul, deci în capătul opus sursei. Linia a fost executată în etape, cu cabluri trifazate cu mantale de plumb pe faze și benzi feromagnetice de protecție comune, cu caracteristici dimensionale și conductoarele fazelor diferite, în funcție de posibilitățile de aprovizionare din import. Linia este formată din 4 tronsoane de cabluri cu următoarele caracteristici specifice:

./.

- tronsonul 1 : cablu tip OSV, $3 \times 120 \text{ mm}^2 \text{Cu}$, 872 m lungime;
- tronsonul 2 : cablu $3 \times 185 \text{ mm}^2 \text{Al}$, 377 m lungime ;
- tronsonul 3 : cablu tip OSV, $3 \times 185 \text{ mm}^2 \text{Cu}$, 412 m lungime;
- tronsonul 4 : cablu NHKBA, $3 \times 150 \text{ mm}^2 \text{Al}$, 131 m lungime.

Linia fiind în faza finală de execuție tocmai în etapa când s-au făcut cele mai multe din încercările experimentale, organizarea și realizarea acestora a fost posibilă pe tronsoane separat și cu tronsoanele de cablu manșonate, întregite.

Încercările experimentale în rețea s-au desfășurat în următoarele condiții de alimentare :

- alimentarea liniei cu un sistem trifazat simetric de tensiuni de valoare redusă ;
- alimentarea liniei cu tensiune nominală și scurtcircuit monofazat.

6.2. Încercări experimentale în linia de cablu alimentată cu tensiune redusă

Încercările cu tensiune redusă s-au desfășurat pe rând în următoarea concepție de grupare a cablurilor liniei 20 kV stația Pitești-Vest - PA Banatul (vezi figura 6.1) :

- tronsonul 2 de cablu separat ;
- tronsonul 3 de cablu separat ;
- linia în cablu stația Pitești-Vest-PA Banatul.

S-a făcut o etapizare a încercărilor ca urmare a faptului că tronsoanele au fost realizate din cabluri cu caracteristici constructive diferite și s-a urmărit o primă comparare a valorilor parametrilor obținuți pe cele două căi, prin calcul și prin măsurători, pentru un același cablu.

Prin încercările făcute cu întreaga linie s-a urmărit să se verifice dacă realizarea ei din cabluri cu caracteristici constructive diferite are influență asupra rezultatelor pe de o parte, iar pe de altă parte s-a urmărit compararea valorilor obținute pe cele două căi, calcul și măsurări, la o astfel de linie în cablu.

Intrucât tehnica de lucru la cele două tronsoane de cablu la care încercările s-au făcut separat este aceeași, în continuare se prezintă rezultatele pentru tronsonul 2 de cablu și pentru linia în cablu întregită.

Alimentarea cu energie electrică, pentru încercări s-a făcut cu un generator cu motor termic, care asigură frecvența de 50 Hz.

6.2.1. Parametrii tronsonului de cablu

S-au determinat parametrii acestui tronson în funcție de elementele constructive ale cablului, cu relațiile stabilite în cap.2 și în baza încercărilor experimentale. În continuare s-a făcut o analiză comparativă a valorilor obținute, cu concluziile și observațiile ce s-au desprins.

6.2.1.1. Parametrii cablului calculați în funcție de elementele constructive

Caracteristicile constructive de bază ale cablului sînt date la paragraful 6.1. Rezistența echivalentă în c.a a unui conductor de fază este dată de relația (2.3).

În cazul cablului tronsonului 2 nu s-a ținut seama de efectul de proximitate, iar învelișurile metalice diamagnetice (mantalele de plumb) nefiind legate galvanic între ele nu apar pierderi în acestea, deci se poate scrie :

./.

$$R'_c = R_{cc} + \Delta R_{cp} \quad (6.1)$$

Pentru secțiuni ale conductoarelor cablurilor de 185 mm², rezistența suplimentară ΔR_{cp} , ca urmare a efectului pelicular reprezintă 0,52 % din rezistența în c.c a conductorului, (tabelul 1). De asemenea, ținându-se cont și de lungimea reală mai mare cu (2-6) % decât lungimea cablului [1, 2, 3] rezultă :

$$R'_c = R_{cc}(1+0,025+0,0052) = 1,03 R_{cc} = 0,0614 \Omega \quad (6.2) \quad ;$$

În relația (6.2) s-a luat $\rho = 2,94 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ și o lungime reală a firelor mai mare decât lungimea cablului cu 2,5 %.

Rezistența echivalentă în c.a a învelișului metalic diamagnetic este dată de relația (2.13).

Intrucât în cazul acestui cablu nu se pun probleme de efect de vecinătate și efect pelicular, se poate scrie :

$$R'_i = R_{ic}$$

Rezultă:

$$R'_i = \frac{\rho_{Pb} \cdot l}{\pi (r_e^2 - r_i^2)} = 0,5719 \Omega \quad (6.3)$$

În relația (6.3) s-a luat $\rho_{Pb} = 0,252 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, raza exterioară a mantalei de plumb $r_e = 15,6 \text{ mm}$ și raza interioară a acesteia $r_i = 13,8 \text{ mm}$.

Reactanța X_a este dată de relația (2.25), corespunzătoare lungimii l .

$$X_a = 0,1445 \cdot l \cdot \lg \frac{30}{RMG_{1c}} = 0,0905 \Omega \quad (6.4)$$

În relația (6.4) $RMG_{1c} = 6,54 \text{ mm}$ calculată cu relația (2.20).

Reactanța X_s este dată de relația (2.30), corespunzătoare lungimii l :

$$X_s = 0,1445 \cdot l \cdot \lg \frac{DMG_{3c}}{30} = - 0,0528 \Omega \quad (6.5)$$

În relația (6.5) $DMG_{3c} = 32,2$ mm, calculată cu relația (2.21).

Reactanța X_{ia} este dată de relația (2.45) corespunzătoare lungimii l :

$$X_{ia} = 0,1445 \cdot l \cdot \lg \frac{30.2}{r_e + r_i} = 0,0713 \Omega \quad (6.6)$$

Reactanța X_p este dată de relația (2.25) corespunzătoare lungimii l :

$$X_p = 0,1445 \cdot l \cdot \lg \frac{D_p}{30} = 0,182 \Omega \quad (6.7)$$

În relația (6.7) $D_p = 65836$ cm, conform (2.19), pentru un sol cu $\rho = 50 \Omega \cdot m$, așa cum a rezultat din măsurări ale rezistivității solului din sectorul experimental Pitești [55] .

Rezistența suplimentară datorită pierderilor din benzile feromagnetice de protecție este dată de relația (2.6), raportată la lungimea l a cablului, în care se ține cont de construcția benzilor feromagnetice de protecție, una interioară, iar cealaltă exterioară, suprapuse, în sensul axial al cablului, pe 33,3 % din lungimea acestuia :

./.

$$\Delta R_{cb} = 1,333 \cdot \frac{3}{\sqrt{2\pi\delta^2\sigma}} \left[\frac{\operatorname{sh}y + \operatorname{siny}}{\operatorname{chy} - \operatorname{cos}y} \left(\frac{1}{\alpha_2} + \frac{1}{\alpha_1} \right) - \frac{4}{\sqrt{\alpha_2\alpha_1}} \right] \cdot \frac{\operatorname{ch}\frac{y}{2} \sin\frac{y}{2} - \operatorname{sh}\frac{y}{2} \cos\frac{y}{2}}{\operatorname{chy} - \operatorname{cos}y} \quad (6.8)$$

Cu $\mu_r = 700$, $f = 50$ Hz și $\sigma = 6,67 \cdot 10^6$ S/m, pentru benzi de oțel, adîncimea de pătrundere δ are valoarea :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}} = 0,1042 \text{ cm} \quad (6.9)$$

Notăm cu $r_{eb1} = 3,8$ cm ; $r_{ib1} = 3,7$ cm ; $r_{eb2} = 3,7$ cm

$r_{ib2} = 3,6$ cm razele, exterioară și interioară, ale benzilor

exterioare și interioare.

Cu aceste precizări coeficienții α_1 și α_2 , notați cu α_{11} și α_{21} pentru benzile exterioare, respectiv α_{12} și α_{22} pentru benzile interioare devin :

$$\alpha_{11} = \sqrt{2} \frac{r_{ib1}}{\delta} = 50,067 \quad ; \quad \alpha_{21} = \sqrt{2} \frac{r_{eb1}}{\delta} = 51,420$$

$$\alpha_{12} = \sqrt{2} \frac{r_{ib2}}{\delta} = 48,714 \quad ; \quad \alpha_{22} = \sqrt{2} \frac{r_{eb2}}{\delta} = 50,067 \quad (6.10)$$

deci:

$$y_1 = \frac{2(\alpha_{21} - \alpha_{11})}{2} \approx 1,9 \quad ; \quad y_2 = \frac{2(\alpha_{22} - \alpha_{12})}{2} \approx 1,9 \quad ; \quad y_1 = y_2 \quad (6.11)$$

./.

Din [88] tabelul 4, se obține :

$$\frac{\operatorname{sh} y_1 + \operatorname{siny}_1}{\operatorname{chy}_1 - \operatorname{cos} y_1} \cdot \frac{\operatorname{sh} y_2 + \operatorname{siny}_2}{\operatorname{chy}_2 - \operatorname{cos} y_2} = 1,126 ; \operatorname{sh} \frac{y_1}{2} \operatorname{cos} \frac{y_1}{2} + \operatorname{ch} \frac{y_1}{2} \operatorname{sin} \frac{y_1}{2} \operatorname{sh} \frac{y_2}{2} \operatorname{cos} \frac{y_2}{2} + \frac{\operatorname{chy}_2}{2} \operatorname{sin} \frac{y_2}{2} = 1,566$$

$$\operatorname{chy}_1 - \operatorname{cos} y_1 = \operatorname{ch} y_2 - \operatorname{cos} y_2 = 3,741 \quad (6.12)$$

Cu aceasta, din relația (6.8) se obține :

$$\Delta R_{cb} = 0,5428 \Omega \quad (6.13)$$

Reactanța suplimentară datorită pierderilor din benzile feromagnetice de protecție corespunzătoare lungimii l este dată de relația (2.41) în care s-a ținut cont de suprapunerea benzilor în sensul axial al cablului pe o lungime de 33 % din l .

Cu $\mu_r = 700$ și $l = 0,377$ km rezultă

$$\Delta X_{cb} = 1,7968 \quad (6.14)$$

6.2.1.2. Parametrii cablului determinați prin încercări

Pentru determinarea parametrilor cablului s-au măsurat :

- impedanța de secvență directă ;
- impedanța de secvență omopolară a conductorului de fază cu întoarcerea curentului numai prin învelișurile metalice diamagnetice ;
- impedanța de secvență omopolară a conductorului de fază cu întoarcerea curentului numai prin pământ ;
- impedanța de secvență omopolară a învelișului metalic diamagnetic al unei faze cu întoarcerea curentului numai prin pământ.

În tabelul 6.1 sînt date rezultatele măsurătorilor impedanței directe a cablului, S-a folosit schema de măsurare din figura 5.1.

Dintr-o analiză a mediilor valorilor calculate pe faze pentru fiecare citire și a valorilor medii, se trage concluzia că în cazul rezistențelor, diferența este mică, fiind cuprinsă între - 1,3 % și + 0,7 %, iar în cazul reactanțelor este mai mare, cuprinsă între - 3,1 % și + 2,1 %. Diferențele citirilor succesive față de media valorilor reactanțelor sînt cu mult mai mici decît în cazul măsurărilor prezentate în cap.5, paragraful 5.3.1, ceea ce confirmă observația făcută cu privire la cauzele abaterilor, cablul tronsonului 2 fiind cu mult mai lung decît cel la care s-au făcut măsurători experimentale în condiții de laborator.

Se precizează că în timpul efectuării măsurătorilor, învelișurile metalice diamagnetice (mantale de plumb) ale celor trei faze nu au fost legate galvanic între ele și deci

expresia $\frac{R_1'(X_{1a}+X_s)^2}{R_1'^2+(X_{1a}+X_s)^2}$ este zero. În concluzie, din încercări

a rezultat :

$$R_c' = R_d = R_i = 0,0647 \Omega$$

$$X_a = X_s = X_d = X_i = 0,0388 \Omega$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_d}{R_d} = \frac{0,0388}{0,0647} = 0,599 ; \quad \varphi = 30^{\circ} 50' \quad (6.15)$$

și deci :

$$\underline{Z}_d = \underline{Z}_i = R_d + jX_d = 0,0647 + j 0,0388 = 0,0754 e^{j 30^{\circ} 50'} \Omega$$

./.

Tabelul 6.1

Nr. crt.	Mărimi măsurate								
	Faza R			Faza S			Faza T		
	U(V)	I(A)	P(W)	U(V)	I(A)	P(W)	U(V)	I(A)	P(W)
1	3,58	46	140,10	3,32	45,9	129,70	3,20	42,8	117,10
2	3,57	45,2	137,40	3,32	45	128,50	3,20	45	117
3	3,58	45,9	139,50	3,32	45	128,50	3,20	43	117
4	3,57	45,2	137,20	3,32	44,9	128,50	3,20	43	117
5	3,58	46	140	3,32	45	128,50	3,10	42,2	116
6	3,58	46	140	3,32	44,9	128,50	3,10	41,5	114

Nr. crt.	Valori calculate în baza mărimilor măsurate					
	Faza R			Faza S		
	$Z_d(\Omega)$	$R_d(\Omega)$	$X_d(\Omega)$	$Z_d(\Omega)$	$R_d(\Omega)$	$X_d(\Omega)$
1	0,0779	0,0662	0,0411	0,0723	0,0615	0,0381
2	0,0789	0,0672	0,0414	0,0737	0,0634	0,0377
3	0,0779	0,0662	0,0412	0,0737	0,0634	0,0377
4	0,0789	0,0672	0,0414	0,0739	0,0637	0,0373
5	0,0779	0,0662	0,0411	0,0737	0,0634	0,0377
6	0,0779	0,0662	0,0411	0,0739	0,0634	0,0377

Nr. crt.	Valori calculate în baza mărimilor măsurate			Valori medii		
	Faza T			$Z_d(\Omega)$	$R_d(\Omega)$	$X_d(\Omega)$
	$Z_d(\Omega)$	$R_d(\Omega)$	$X_d(\Omega)$			
1	0,0752	0,0616	0,0397	0,0751	0,0639	0,0387
2	0,0747	0,0632	0,0398	0,0758	0,0646	0,0396
3	0,0747	0,0632	0,0398	0,0755	0,0642	0,0395
4	0,0747	0,0632	0,0398	0,0758	0,0647	0,0395
5	0,0734	0,0651	0,0339	0,0750	0,0649	0,0375
6	0,0746	0,0661	0,0344	0,0754	0,0652	0,0377
Valori medii :				0,0754	0,0647	0,0388
$\underline{Z}_d = (0,0647 + j 0,0388) \Omega$						

In tabelul 6.2 sînt date rezultatele măsurărilor impedanței de secvență omopolară a unui conductor de fază cu considerarea întoarcerii curenților numai prin învelișuri (mantale de plumb). S-a folosit schema de măsură din figura 5.5.

Tabelul 6.2.

Nr. crt.	Mărimi măsurate			Mărimi calculate în baza măsurărilor		
	U(V)	I(A)	P(W)	$Z_h(\Omega)$	$(R'_c + R'_i)\Omega$	$(X_a - X_{ia})\Omega$
1	10,275	49,9	512,43	0,6177	0,6174	0,0203
2	10,225	49,8	508,92	0,6159	0,6156	0,0205
3	10,275	49,9	512,43	0,6177	0,6174	0,0203
4	10,275	49,9	512,43	0,6177	0,6174	0,0203
5	10,275	49,9	512,43	0,6177	0,6174	0,0203
6	10,275	49,9	512,43	0,6177	0,6174	0,0203
Valori medii				0,6174	0,6171	0,0203
$\underline{Z} = (0,6171 + j 0,0204) \Omega$						

Se observă că diferențele între valorile calculate pentru citirile succesive și valorile medii sînt foarte mici pentru suma rezistențelor $R'_c + R'_i$, cuprinse între - 0,24 % și + 0,05 % și relativ mici pentru diferența reactanțelor $X_a - X_{ia}$, cuprinse între - 0,19 % și 0,93 %. Aceste erori mici confirmă afirmația făcută cu privire la efectul lungimii cablului asupra valorii acestora.

In concluzie, din măsurători a rezultat :

$$R'_c + R'_i = 0,6171 \Omega$$

$$X_a - X_{ia} = 0,0204 \Omega$$

$$\tan \varphi = \frac{X_a - X_{ia}}{R'_c + R'_i} = \frac{0,0204}{0,6171} = 0,033 ; \varphi = 1^{\circ}53'$$

deci:

$$\underline{Z}_h = R'_c + R'_i + j(X_a - X_{ia}) = 0,6174 \cdot e^{j1^{\circ}53'} \Omega \quad (6.16)$$

./.

In tabelul 6.3. sînt date rezultatele măsurătorilor impedanțelor de secvență omopolară a unui conductor de fază cu considerarea întoarcerii curenților numai prin pămînt. S-a folosit schema de măsură din figura 5.4.

Tabelul 6.3.

Nr. crt.	Mărimi măsurate			Mărimi calculate în baza măsurătorilor		
	U(V)	I(A)	P(W)	Z_h (Ω)	$(R_c' + 3R_p + \Delta R_{cb})\Omega$	$(X_a + 3X_p - 2X_s + \Delta X_{cb})\Omega$
0	1	2	3	4	5	6
1	133,50	50	6350	8,011	7,620	2,472
2	133,50	50	6350	8,011	7,620	2,472
3	133,40	50	6020	8,004	7,584	2,558
4	133,40	50	6020	8,004	7,584	2,558
5	133,40	50	6020	8,004	7,584	2,558
6	133,40	50	6020	8,004	7,584	2,258
Valori medii				8,006	7,596	2,529
$\underline{Z} = (7,596 + j 2,529)\Omega$						

Se observă că diferențele între valorile calculate pentru citirile succesive și valorile medii sînt foarte mici pentru suma rezistențelor $R_c' + 3R_p + \Delta R_{cb}$, cuprinse între - 0,16 % și + 0,32 % și relativ mici pentru suma reactanțelor $X_a + 3X_p - 2X_s + \Delta X_{cb}$, cuprinse între - 2,28 % și + 1,1 %.

Se face, de asemenea, precizarea că în valoarea rezistenței R_p este cuprinsă și rezistența de dispersie $R_p'' = 2,31\Omega$ a prizelor artificiale de la cele două capete ale tranșonului de cablu, folosite la aplicarea schemei de măsurare.

In concluzie, din măsurători a rezultat :

$$R'_c + 3R_p + \Delta R_{cb} = 7,596 \Omega$$

$$X_a + 3X_p - 2X_s + \Delta X_{cb} = 2,529 \Omega$$

$$\cos \varphi = \frac{R'_c + 3R_p + \Delta R_{cb}}{R'_c + 3R_p + \Delta R_{cb} + j(X_a + 3X_p - 2X_s + \Delta X_{cb})} = \frac{7,596}{7,596 + j2,529} = 0,333 ; \varphi = 18^\circ 25'$$

și deci :

$$Z_h = R'_c + 3R_p + \Delta R_{cb} + j(X_a + 3X_p - 2X_s + \Delta X_{cb}) = 8,006 \cdot e^{j \cdot 18^\circ 25'} \Omega$$

In tabelul 6.4 sînt date rezultatele măsurătorilor impedanței de secvență omopolară a învelișului diamagnetic (manta de plumb) al unei faze, cu considerarea întoarcerii curentului numai prin pămînt, S-a folosit schema de măsurare din figura 5.4.

Tabelul 6.4.

Nr. crt.	Mărimi măsurate			Mărimi calculate în baza măsurătorilor		
	U(V)	I(A)	P(W)	Z _h (Ω)	(R' _c + 3R _p + ΔR _{cb}) Ω	(X _a + 3X _p - 2X _s + ΔX _{cb}) Ω
1	140,70	50	6731	8,4581	8,0772	2,5098
2	140,70	50	6731	8,4581	8,0772	2,5098
3	140,70	50	6731	8,4581	8,0772	2,5098
4	140,70	50	6731	8,4581	8,0772	2,5098
5	140,70	50	6731	8,4581	8,0772	2,5098
6	140,70	50	6731	8,4581	8,0772	2,5098
	Valori medii			8,4581	8,0772	2,5098
	Z _h = (8,0772 + j2,5098) Ω					

Din analiza datelor din tabelul 6.4. se observă că diferențele sînt neglijabile. Ca și în cazul precedent R_p cuprinde

./.

și rezistența de dispersie $R_p'' = 2,31 \Omega$ a prizelor artificiale de la cele două capete ale tronsonului de cablu, folosite la aplicarea schemei de măsurare.

In concluzie, din măsurători a rezultat :

$$R_i' + 3R_p + \Delta R_{ib} = 8,0772 \Omega$$

$$X_{ia} + 3X_p - 2X_s + \Delta X_{ib} = 2,5098 \Omega$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_{ia} + 3X_p - 2X_s + \Delta X_{ib}}{R_i' + 3R_p + \Delta R_{ib}} = \frac{2,5098}{8,0772} = 0,310 ; \quad \varphi = 17^\circ 16'$$

și deci :

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{hi} &= R_i' + 3R_p + \Delta R_{ib} + j(X_{ia} + 3X_p - 2X_s + \Delta X_{ib}) = 8,0772 + j \cdot 2,5098 = \\ &= 8,4581 \cdot e^{j 17^\circ 16'} \Omega \end{aligned}$$

(6.19)

In baza celor patru grupe de măsurători au rezultat două sisteme de ecuații pentru calculul parametrilor cablului și anume :

$$\left\{ \begin{array}{l} R_c' = 0,0647 \Omega \\ R_c' + R_i' = 0,6171 \Omega \\ R_i' + 3R_p + \Delta R_{ib} = 8,0772 \Omega \\ R_c' + 3R_p + \Delta R_{cb} = 7,596 \Omega \end{array} \right. \quad (6.19)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} X_a + X_s = 0,0388 \Omega \\ X_a - X_{ia} = 0,0204 \Omega \\ X_{ia} + 3X_p - 2X_s + \Delta X_{ib} = 2,5098 \Omega \\ X_a + 3X_p - 2X_s + \Delta X_{cb} = 2,5290 \Omega \end{array} \right. \quad (6.20)$$

./.

Utilizând pentru ΔR_{cb} și ΔX_{cb} valorile calculate, date în (6.13) și (6.14) și ținând cont de egalitățile

$\Delta R_{cb} = \Delta R_{fb}$ și $\Delta X_{cb} = \Delta X_{fb}$, rezultate din paragraful 3.3, din rezolvarea celor două sisteme de ecuații (6.20) și (6.21) în care s-a introdus valoarea măsurată a prizelor de pământ,

($R_p'' = 2,31 \Omega$), se obține :

$$\left\{ \begin{array}{l} R_c' = 0,0647 \Omega \\ R_l' = 0,5524 \Omega \\ R_p' = 0,0184 \Omega \end{array} \right. \quad (6.21)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} X_a = 0,0905 \Omega \\ X_{fa} = 0,0701 \Omega \\ X_s = 0,0517 \Omega \\ X_p = 0,1798 \Omega \end{array} \right. \quad (6.22)$$

Se precizează că mărimile R_p și X_p au fost calculate ca valori medii din ultimele două relații ale sistemelor (6.19) și (6.20).

6.2.1.3. Analiza comparativă a valorilor parametrilor obținute prin calcul și pe cale experimentală

În tabelul 6.5 sînt date în sinteză valorile medii ale parametrilor cablului obținute teoretic și experimental.

./.

Tabelul 6.5.

Parametrul.	Valori calculate în baza măsurătorilor experimentale (Ω)	Valori calculate în funcție de caracteristicile constructive (Ω)	Diferența col.3 - col.2	
			în valori absolute (Ω)	în procente (%)
1	2	3	4	5
R'_c	0,0647	0,0614	-0,0033	-5,37
R'_i	0,5524	0,5719	+0,0195	+3,40
R'_p	0,0184	0,0186	+0,0002	+1,07
X_{ia}	0,0701	0,0713	+0,0012	+1,68
X_s	-0,0517	-0,0528	+0,0011	+2,08
X_p	0,1798	0,182	+0,0022	+1,20
X_a	0,0905	0,0905	0	0

Pentru stabilirea diferențelor în valori absolute și în procente, în tabelul 6.5. s-au considerat de referință valorile obținute prin calcul în funcție de caracteristicile constructive (col.3).

Concluziile care se desprind din analiza comparativă sînt mai avantajoase, în ceea ce privește cele două tehnici de calcul, decît cele enunțate în paragraful 5.3.6. Astfel, erorile procentuale sînt cuprinse în limita 0 și 5,37.

De asemenea, dintr-o analiză comparativă a erorilor procentuale din tabelele 5.5 și 6.5 se observă că în cazul cablului tronsonului doi, lung de 377 m, erorile sînt în general mai mici, pentru unii parametri sensibil mai mici, decît în cazul cablului la care s-au făcut măsurători în condiții de laborator, lung de numai 29 m. Această observație ne îndreptățește să afirmăm că în cazul unor astfel de măsurători erorile sînt mai mici în cazul cablurilor mai lungi și invers, întrucît tehnica de măsurare a fost aceeași, iar aparatele de măsură folosite au fost de aceeași clasă de precizie. Din această constatare rezultă faptul că pentru măsurători, ale parametrilor în condiții de laborator este necesară utilizarea unor aparate de măsură cu clasă de precizie foarte bună și că trebuie să se țină cont de rezistențele suplimentare ale legăturilor la aparate.

6.2.2. Parametrii liniei în cablu 20 kV stația Pitești-Vest - P.A.Banatului

Se precizează că această linie este formată din 4 tronsoane de cablu, caracteristicile și lungimile cablurilor componente fiind prezentate la paragraful 6.1.

6.2.2.1. Parametrii calculați ai liniei în cablu în funcție de elementele constructive

Calculul rezistenței R_c a liniei în cablu are la bază precizările făcute la paragraful 6.2.1.1, iar calculul efectiv se face pe tronsoane, în funcție de elementele constructive ale fiecărui cablu ce intră în componența liniei. Pentru cablurile cu conductoare din cupru s-a considerat $\rho = 1,748 \cdot 10^{-2} \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$, iar pentru cele din aluminiu $\rho = 2,94 \cdot 10^{-2} \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$.

Intrucît metodologia de calcul este aceeași, prezentată în detaliu la paragraful 6.2.1.1, în continuare se mai fac cîteva precizări specifice construcției fiecărui cablu în parte.

Astfel, la cablul tronsoanelor nr.1 și nr.2 suprapunerea benzilor feromagnetice de protecție în sens axial se face pe 33,3 %, la cel al tronsonului nr.3 pe 55,74 % iar pentru tronsonul nr.4 pe 54,23 % din lungime.

In tabelul 6.6. sînt date, sintetic, unele dimensiuni geometrice și valori calculate pentru cablurile tronsoanelor nr.1-4 care intervin în relațiile de calcul privind parametrii acestora.

Tabelul 6.6.

Mărimea	Tronsonul de cablu			
	nr.1	nr.2	nr.3	nr.4
r_{eb1} (mm)	39,5	38	43,5	41,5
r_{ib1} (mm)	38,5	37	42,5	40,5
r_{eb2} (mm)	38,5	37	42,5	40,5
r_{ib2} (mm)	37,5	36	41,5	39,5
α_{11}	52,09	50,06	57,50	54,80
α_{21}	53,45	51,42	58,86	56,15
α_{12}	50,74	48,71	56,15	53,45
α_{22}	52,09	50,06	57,50	54,80
γ_1	1,9	1,9	1,9	1,9
γ_2	1,9	1,9	1,9	1,9

In tabelul 6.7 sînt prezentate valorile calculate ale parametrilor pentru cele 4 tronsoane de cablu, iar in ultima coloană se prezintă valorile pentru întreaga linie Pitești-Vest - PA Banatul, precum și impedanțele de secvență succesiv ale cablului (fără prizele în stație și PA) pentru cele trei cazuri de întoarcere a curentului din scurtcircuit.

Tabelul 6.7.

Parametrul	Tronsonul de cablu				Linia în cablu stația Pitești Vest-P.A. Banatul.
	1	2	3	4	
lungimea (km)	0,872	0,377	0,412	0,131	1,792
materialul inductorului pe faze-	Cu	Al	Cu	Al	-
secțiunea inductorului (mm ²)	120	185	185	150	-
R_0 (Ω)	0,1302	0,0614	0,0399	0,0263	0,2578
R_1 (Ω)	1,1150	0,5719	0,4701	0,1555	2,3125
$X_b = \Delta R_{fb}$ (Ω)	1,5082	0,5428	0,6031	0,1992	2,8533
X_{cb} (Ω)	0,0428	0,0186	0,0202	0,0064	0,0880
X_{cb} (Ω)	0,2189	0,0905	0,0980	0,0317	0,4391
X_{cb} (Ω)	-0,1212	-0,0528	-0,0547	-0,0176	-0,2463
R_a (Ω)	0,1658	0,0713	0,0755	0,0243	0,3369
X_p (Ω)	0,4168	0,182	0,1969	0,0626	0,8583
$X_{cb} =$ X_{fb} (Ω)	4,0076	1,7968	1,9889	0,6574	8,4507
Impedanța de secvență a cablului	Condiții de întoarcere a curentului				Valoarea, ohmi
$Z_d(Z_i)$	-				0,2578+j 0,1928
Z_{si}	numai prin pământ				3,3751+j12,0573
	numai prin învelișuri				2,5703+j 0,1022
	prin înveliș și pământ				1,8070+j 1,2503

Se precizează că în tabelul de mai sus rezistența R'_1 s-a calculat cu $\rho_{Pb} = 0,2083 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ pentru tronsoanele 1,3 și 4 și cu $\rho_{Pb} = 0,252 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ pentru tronsonul 2, cablurile fiind din import, de fabricație diferită.

6.2.2.2. Parametrii liniei determinați prin încercări

Tehnica de măsurare este identică cu cea folosită în cazul cablului tronsonului nr.2. Pentru fiecare grupă de măsurători s-au făcut câte 6 citiri.

Pentru simplificare, în continuare în lucrare se dau numai valorile medii ce se folosesc la calculul rezistențelor și reactanțelor inductive în baza măsurătorilor.

Astfel, impedanța directă măsurată este :

$$\underline{Z}_d = R_d + jX_d = (0,2525 + j0,1904) \Omega \quad (6.23)$$

Impedanța omopolară a conductorului de fază, cu considerarea întoarcerii curenților numai prin învelișuri, este :

$$\underline{Z}_{h(i)} = R'_c + R'_1 + j(X_a - X_{ia}) = (2,4847 + j0,1019) \Omega \quad (6.24)$$

Impedanța omopolară a conductorului de fază, cu considerarea întoarcerii curenților numai prin pământ, este :

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{h(p)} &= R'_c + 3R_p + \Delta R_{cb} + j(X_a + 3X_p - 2X_s + \Delta X_{cb}) = \\ &= (9,1152 + j.11,7229) \Omega \end{aligned} \quad (6.25)$$

Se face precizarea că măsurarea impedanței omopolare a învelișurilor metalice diamagnetice (de plumb) cu considerarea întoarcerii curenților numai prin pământ nu a fost posibilă, întrucât izolația acestora față de pământ a fost degradată, iar curenții se întoarceau în cea mai mare parte prin pământ, în lungul liniei, fără să mai ajungă la capătul acesteia și deci să treacă prin priza

artificială din punctul de alimentare P.A. Banatul și de aici spre sursă.

Din relațiile (6.23), (6.24) și (6.25) rezultă două sisteme de ecuații cu care se calculează parametrii liniei.

Astfel, pentru calculul rezistențelor sistemul de ecuații este :

$$\begin{cases} R_c' = 0,2525 \Omega \\ R_c' + R_1' = 2,4847 \Omega \\ R_c' + jR_p + \Delta R_{cb} = 9,1152 \Omega \end{cases} \quad (6.26)$$

Rezistențele de dispersie R_p'' ale prizei de pământ din stația 110/20 kV Pitești-Vest și prizei experimentale din P.A.Banatul au fost măsurate separat și au valoarea totală de $1,91\Omega$.

De asemenea, sînt valabile precizările făcute la punctul 6.2.1.2. cu privire la rezistența suplimentară ΔR_{cb} , deci se utilizează în sistemul de ecuații valoarea obținută pe cale de calcul în funcție de elementele constructive ale cablurilor (tabelul 6.7).

$$\Delta R_{cb} = 2,8533 \Omega \quad (6.27)$$

Cu aceste precizări sistemul de ecuații (6.26) poate fi rezolvat. Se obține :

$$\begin{cases} R_c' = 0,2525 \Omega \\ R_1' = 2,2322 \Omega \\ R_p' = 0,0901 \Omega \end{cases} \quad (6.28)$$

Din relațiile (6.23), (6.24) și (6.25) pentru calculul reactanțelor se deduce următorul sistem de ecuații :

$$\begin{cases} X_a + X_s = 0,1904 \Omega \\ X_a - X_{ia} = 0,1019 \Omega \\ X_a + 3X_p - 2X_s + \Delta X_{cb} = 11,7229 \Omega \end{cases} \quad (6.29)$$

Pentru reactanțe sînt valabile precizările făcute la paragraful 6.2.1.2. și deci pentru X_a și ΔX_{cb} se utilizează în sistemul de ecuații valorile obținute pe cale de calcul în funcție de elementele constructive ale cablurilor, (tabelul 6.7)

$$X_a = 0,4391 \quad (6.30)$$

$$\Delta X_{cb} = 8,4507 \quad (6.31)$$

Cu aceste precizări prin rezolvarea sistemului (6.29) de ecuații se obține :

$$\begin{cases} X_s = - 0,2488 \Omega \\ X_{ia} = 0,3372 \Omega \\ X_p = 0,7785 \Omega \end{cases} \quad (6.32)$$

6.2.2.3. Analiza comparativă a valorilor parametrilor liniei în cablu, obținute prin calcul și în baza măsurărilor experimentale

În tabelul 6.8. sînt date în sinteză valorile parametrilor liniei în cablu obținute pe cele două căi.

Pentru stabilirea diferențelor în valori absolute și în procente s-au considerat de bază valorile obținute pe cale de calcul în funcție de caracteristicile constructive, (col.3).

Tabelul 6.8.

Parametrul	Valori calculate în baza măsurătorilor experimentale (Ω)	Valori calculate în funcție de caracteristicile constructive (Ω)	Diferența, col.3 - col.2	
			în valori absolute (Ω)	în procente (%)
1	2	3	4	5
R'_c	0,2525	0,2578	+0,0053	+2,055
R'_1	2,2322	2,3125	+0,0803	+3,47
R'_p	0,0901	0,0880	-0,0021	-2,38
X'_{ia}	0,3372	0,3369	-0,0003	-0,089
X_s	-0,2488	-0,2463	-0,0025	-1,015
X_p	0,7785	0,8583	+0,0798	+9,297

Din analiza rezultatelor din tabelul 6.8. se desprinde concluzia că diferențele între valorile parametrilor obținute pe cele două căi sînt în general mici.

În ceea ce privește eroarea mare în cazul reactanței X_p apreciem că este un rezultat direct al faptului că s-a luat ca valabilă reactanța suplimentară ΔX_{cb} rezultată din calculul acesteia în funcție de elementele constructive ale cablurilor.

6.3. Determinarea experimentală a curenților și repartiției lor în cazul unui scurtcircuit monofazat.

Determinarea pe cale experimentală a curenților de scurtcircuit, precum și a repartiției lor pe căile de întoarcere în cazul scurtcircuitului monofazat alimentat cu tensiunea nominală

a rețelei comportă o atentă pregătire a rețelei, și a instalațiilor de măsură, necesare încercărilor pe viu, datorită efectelor în întreg sistemul energetic local. Prin anvergura lor, probele pe viu sînt deosebit de complexe și reclamă studierea și rezolvarea unei game de probleme, cum sînt :

- stabilirea unui program de probe și încercări, care să permită desfășurarea acestora în condițiile asigurării continuității alimentării cu energie electrică a consumatorilor și prevenirii degradării căilor de curent ;

- stabilirea măsurărilor necesare pentru prevenirea extinderii efectelor unui scurtcircuit monofazat în rețeaua conexă, rămasă în funcțiune ;

- elaborarea schemei primare de alimentare a locului de scurtcircuit ținînd seama de necesitatea asigurării unui întrerupător de bază și a unui întrerupător de rezervă, care să intervină automat în caz de nefuncționare a celui dintîi ;

- stabilirea și adaptarea instalațiilor de măsură și înregistrare din stația de alimentare, și locurile de scurtcircuit ;

- conceperea și realizarea unei scheme de automatizare suplimentare, specifică probelor complexe pe viu, care să asigure pornirea sincronă a aparatelor de înregistrare amplasate la mari distanțe între ele (1 - 3 km), închiderea întrerupătoarelor care alimentează scurtcircuitul după demararea instalațiilor de înregistrare, asigurarea declanșării automate a întrerupătoarelor de bază și rezervă la refuz de funcționare a protecției prin relee din sistem, după expirarea timpului stabilit pentru înregistrarea fenomenului ;

- realizarea căilor de comunicații operative între personalul de supraveghere a instalațiilor de măsură amplasate la distanță ;

- luarea de măsuri pentru prevenirea influenței golurilor de tensiune în timpul probelor de scurtcircuit asupra consumatorilor și instalațiilor de înregistrare din puncte de măsură.

Efectuarea probelor și măsurătorilor experimentale a fost organizată și realizată în următoarele scheme de funcționare:

- linia în cablu 20 kV Pitești-Vest - PA Banatul alimentată radial separat, de pe un sistem de bare din stația 110/20 kV Pitești-Vest, celelalte plecări în 20 kV din această stație fiind alimentate, tot radial, de pe cel de al doilea sistem de bare al acesteia ;

- linia în cablu 20 kV stația Pitești-Vest - PA Banatul alimentată radial de pe bare comune cu celelalte plecări radiale în 20 kV din stația 110/20 kV Pitești-Vest.

Printr-o astfel de realizare a încercărilor experimentale s-au urmărit mai multe obiective și anume :

- determinarea pe cale experimentală a valorilor curenților de scurtcircuit monofazat pe o singură linie radială, cu și fără aportul curenților capacitivi ai rețelei de 20 kV alimentată radial din aceeași stație ;

- determinarea pe cale experimentală a repartiției pe căile de întoarcere a curenților de scurtcircuit monofazat ;

- compararea valorilor curenților de scurtcircuit monofazat și a repartiției lor pe căi de întoarcere obținute prin calcul și pe cale experimentală.

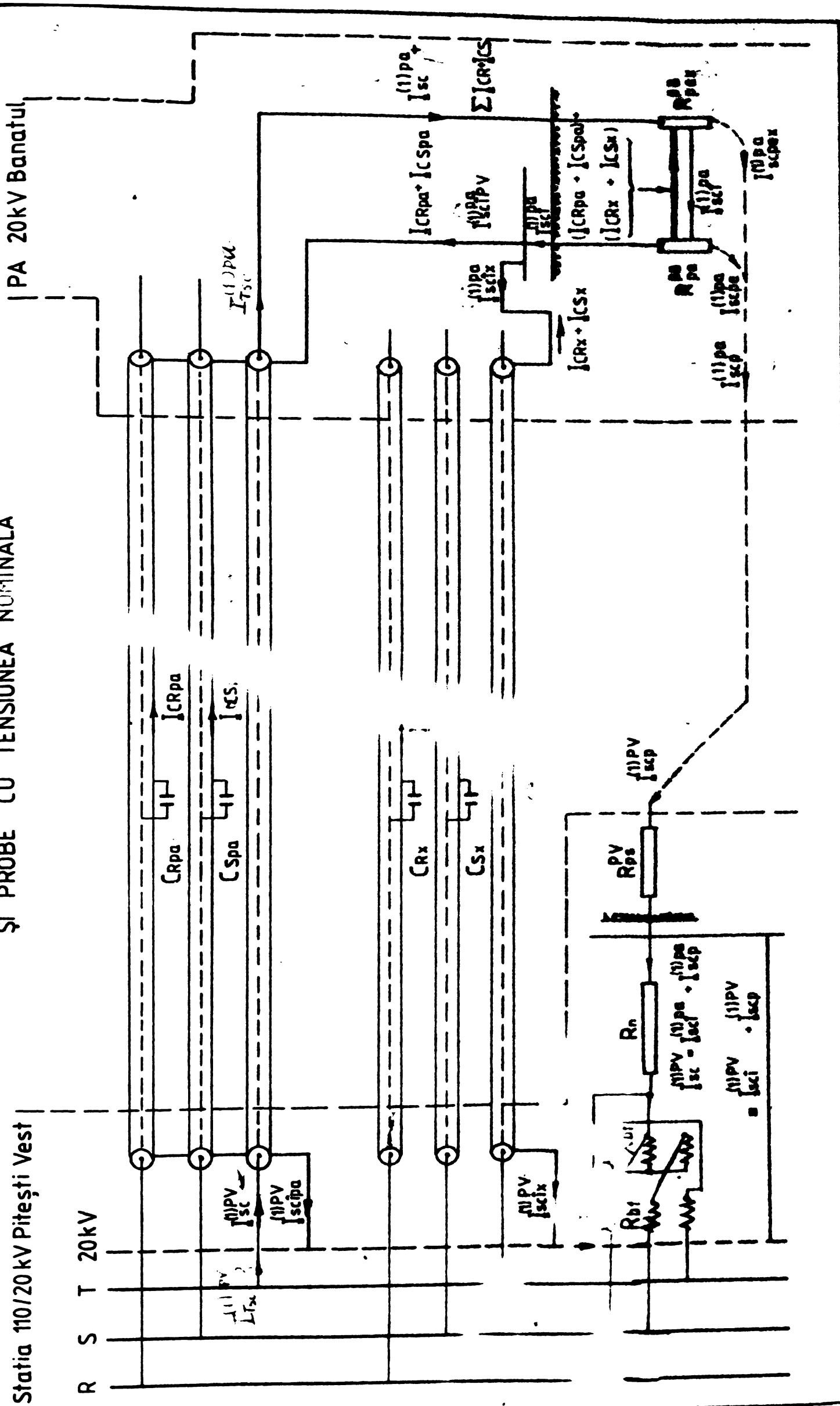
Curenții de scurtcircuit monofazat au fost determinați pentru cele trei variante de întoarcere a lor și anume: numai prin pământ, numai prin învelișurile metalice diamagnetice și prin pământ și învelișurile metalice diamagnetice în paralel.

Determinarea prin măsurători a valorilor curenților de scurtcircuit monofazat și a repartiției lor s-a făcut prin oscilografere, realizându-se în total un număr de peste 150 oscilograme. Fotocopii după o parte din aceste oscilograme sînt anexate la lucrare, ca material documentar. Pentru aceste încercări în P.A. Banatul s-a amenajat o priză experimentală, separată de priza punctului de alimentare, asigurîndu-se astfel posibilitatea materializării diverselor scheme electrice din timpul efectuării lucrărilor.

În figura 6.2. este dată schema generală a rețelei în care s-au făcut probele și măsurătorile experimentale cu tensiunea nominală, cu precizarea notațiilor folosite și anume :

- $I_{Tsc}^{(1)PV}$ - curentul de scurtcircuit monofazat pe faza T în stația 110/20 kV Pitești-Vest ;
- $I_{Tsc}^{(1)pa}$ - curentul de scurtcircuit monofazat pe faza T în P.A. Banatul ;
- $I_{scp}^{(1)pa}$ - curentul de scurtcircuit monofazat în P.A. Banatul ce se întoarce prin priza acestuia ;
- $I_{sci}^{(1)pa}$ - curentul de scurtcircuit monofazat în P.A. Banatul ce se întoarce prin învelișurile metalice (mantale) ale cablurilor de legătură dintre P.A. Banatul și stația Pitești Vest, fie direct, fie prin alte stații sau puncte de alimentare ;
- $I_{scipv}^{(1)pa}$ - curentul de scurtcircuit monofazat în P.A. Banatul ce se întoarce prin învelișurile metalice (mantale) ale cablurilor liniei de alimentare stația Pitești-Vest - P.A. Banatul ;

Fig.6.2 - SCHEMA REȚELEI EXPERIMENTALE LA MĂSURĂRI
ȘI PROBE CU TENSIUNEA NOMINALĂ



- $I_{scix}^{(1)pa}$ - curentul de scurtcircuit monofazat în P.A. Banatul ce se întoarce prin învelișurile metalice (mantale) ale altor cabluri de legătură dintre stația Pitești-Vest și P.A. Banatul ;
- $I_{scipa}^{(1)PV}$ - curentul de scurtcircuit monofazat în stația Pitești-Vest ce se întoarce prin învelișurile metalice (mantalele) cablurilor liniei de alimentare a P.A. din stația Pitești-Vest ;
- $I_{scix}^{(1)PV}$ - curentul de scurtcircuit monofazat în stația Pitești Vest ce se întoarce prin învelișurile metalice (mantalele) altor cabluri de legătură dintre P.A. Banatul și stația Pitești-Vest ;
- I_{CR}, I_{CS} - curenții capacitivi corespunzători fazelor R și S ;
- R_n - rezistența de tratare a neutrului ;
- R_{ps}^{PV} - rezistența de dispersie a prizei stației Pitești-Vest ;
- R_{pe}^{pa} - rezistența de dispersie a prizei existente din P.A. Banatul ;
- R_{pex}^{pa} - rezistența de dispersie a prizei experimentale din P.A. Banatul .

S-a dispus de aparatele necesare, oscilografe și anexe, pentru înregistrarea mărimilor de bază, corespunzătoare schemelor de măsurare folosite.

În planșa nr.2 este prezentată schema instalațiilor de înregistrare a mărimilor în stația de alimentare 110/20 kV

Pitești-Vest și P.A.Banatul, cu indicarea aparatelor de măsură care se racordează la instalațiile electroenergetice existente, precum și aparatele suplimentare care s-au montat special pentru aceste probe. Totodată, se indică modul de transmitere la distanță a impulsului de demarare a instalațiilor de înregistrare de la punctele de măsură de la locul de scurtcircuit și instalațiile PTR.

În acest scop s-au folosit 4 oscilografe cu 8 - 12 bucle în stația de alimentare, 2 oscilografe cu 8 respectiv 12 bucle ; la locul de defect și un oscilograf cu 8 bucle în instalațiile PTR, montat la oficiul din Pitești.

În vederea comparării valorilor determinate pe cele două căi, de calcul și prin măsurători, s-au calculat curenții de scurtcircuit monofazat, în aceleași variante de întoarcere. Relațiile de calcul sînt cele prezentate în cap.4.

Impedanța de scurtcircuit cu luarea în considerare a capacității de secvență omopolară a rețelei este dată de relația (4.2), iar fără luarea în considerare a acestei capacități de relația (4.3). Pentru simplificare, în continuare se prezintă relația de calcul pentru determinarea valorii curentului de scurtcircuit monofazat într-una din alternative, atunci cînd este stabilit în cealaltă alternativă. În lucrare, calculele de detaliu se fac pentru alternativa cînd nu se ia în considerare capacitatea omopolară a rețelei.

Notînd cu $I_{sct}^{(1)}$ curentul de scurtcircuit monofazat în varianta cînd se ia în considerare capacitatea de secvență omopolară a rețelei și cu $I_{sc}^{(1)}$ curentul de scurtcircuit monofazat în alternativa cînd nu se ia în considerare această capacitate, din relațiile (4.1), (4.2) și (4.3) rezultă :

- 110 -

$$\frac{1}{I_{sct}^{(1)}} - \frac{1}{I_{sc}^{(1)}} = \frac{\frac{2}{3}(Z_{Td} + Z_d) + \frac{R_n + \frac{Z_{hb} + Z_h}{3}}{1 + j3\omega C_h(R_n + \frac{Z_{hb} + Z_h}{3})} - \frac{2}{3}(Z_{Td} + Z_d) + \frac{Z_{hb} + Z_h}{3} + R_n}{E_f}$$

$$= \frac{(R_n + \frac{Z_{hb} + Z_h}{3})^2}{E_f(\frac{Z_{ch}}{3} + R_n + \frac{Z_{hb} + Z_h}{3})} \quad (6.34)$$

sau:

$$\frac{1}{I_{sct}^{(1)}} = \frac{1}{I_{sc}^{(1)}} - \frac{(R_n + \frac{Z_{hb} + Z_h}{3})^2}{E_f(\frac{Z_{ch}}{3} + R_n + \frac{Z_{hb} + Z_h}{3})} \quad (6.35)$$

Din măsurătorile făcute în sectorul experimental pentru $U = 21000/\sqrt{3}$ V s-a obținut un curent capacitiv total de 130 A.
 Răspunzător acestuia rezultă:

$$Z_{ch} = -j 281 \Omega \quad (6.36)$$

Determinarea valorii curentului capacitiv s-a făcut cu neutrul izolat, cu toate liniile de 20 kV în funcțiune, alimentate de pe același sistem de bare al stației Pitești-Vest, punerea la pământ fiind realizată pe o fază a acestuia.

6.3.1. Încercări experimentale cu o linie alimentată radial de pe bare separate.

Acestea sînt încercările și probele făcute cu tensiune nominală cu alimentarea liniei în cablu de 20 kV P.N. Banatul de pe bare separate din stația Pitești-Vest. S-au efectuat determinări experimentale în următoarele condiții :

- scurtcircuit monofazat metalic faza T - prize
experimentală din P.A.Banatul ;

- scurtcircuit monofazat metalic în P.A.Banatul faza T
- învelișurile diamagnetice ale cablurilor liniei de alimentare din
stația Pitești-Vest ;

- scurtcircuit monofazat metalic faza T - prize
experimentală din P.A.Banatul + învelișurile diamagnetice ale cablu-
rilor liniei de alimentare.

Scurtcircuit monofazat metalic în P.A. Banatul
faza T - prize experimentală

La această probă curentul de scurtcircuit monofazat
s-a întors numai prin pământ, învelișurile metalice diamagnetice
fiind dezlegate de la prizele experimentale.

În acest caz impedanța de scurtcircuit s-a calculat
cu relația (4.7) în care valorile parametrilor aferenți cablului au
fost luate din tabelul 6.7 iar valorile impedanțelor elementelor
din stație (transformator, bobină Z_0 , rezistor) sînt evidențiate
în planșa 1, respectiv :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{2}{3}R_{Td} = \frac{2}{3} \cdot 0,167 = 0,1113 \Omega \\ \frac{2}{3}X_{Td} = \frac{2}{3} \cdot 3,073 = 2,0486 \Omega \\ \frac{R_{hb}}{3} = \frac{5,76}{3} = 1,92 \Omega \\ \frac{X_{hb}}{3} = \frac{16,81}{3} = 5,63 \Omega \\ R_n = 7 \Omega \end{array} \right. \quad (6.37)$$

./.

Din măsurătorile efectuate înaintea probei s-au
ținut următoarele valori pentru prizele de pământ :

$$\text{- în stația Pitești-Vest : } R_{ps}^{PV} = 0,11 \Omega \quad (6.38)$$

$$\text{- în P.A.Banatul : } R_{pex}^{PA} = 0,904 \Omega \quad (6.39)$$

Cu aceste precizări :

$$\underline{Z}_{esc}^{(1)} = (11,3434 + j 11,8913) \Omega \quad (6.40)$$

Valoarea pe fază a t.e.m. echivalente a surselor
care alimentează defectul a fost $E_f = 10900 \text{ V}$. (rezultată din oscilo-
ramele anexate ale probei X1-1).

Curentul de scurtcircuit monofazat rezultă :

$$\underline{I}_{sc}^{(1)} = (457,804 - j 479,918) \text{ A} \quad (6.41)$$

respectiv :

$$\underline{I}_{sc}^{(1)} = I_{sc}^{(1)} e^{j\varphi} = 663 e^{-j46^{\circ}22'} \text{ A} \quad (6.42)$$

Curentul de scurtcircuit oscilografiat în stația
Pitești-Vest a fost de 707 A. Diferența între cele două valori ale
curentului de scurtcircuit, obținute prin calcul și prin măsurători
exprimată în procente din valoarea obținută prin calcul este :

$$\xi_{I_{sc}}^{(1)} \% = 100 \cdot \frac{I_{sc,calc}^{(1)} - I_{sc,m\acute{a}s}^{(1)}}{I_{sc,calc}^{(1)}} = - 6,6\% \quad (6.43)$$

Se observă o diferență relativ mică între valoarea
curentului de scurtcircuit calculată și cea măsurată, confirmându-se
astfel valabilitatea relațiilor de calcul stabilite în capitolele
precedente.

./.

Scurtcircuit monofazat metalic în P.A.Sanatul
faza T - învelișurile metalice de plumb ale
cablurilor liniei de alimentare din stația
Pitești-Vest.

La această probă curentul de scurtcircuit monofazat s-a întors numai prin învelișurile metalice diamagnetice, acestea fiind dezlegate de la priza experimentală.

În acest caz impedanța de scurtcircuit s-a calculat cu relația (4.8) în care valorile parametrilor au fost luate din tabelul 6.7 și relațiile (6.37), (6.38) și (6.39) cu precizarea că măsurătorile efectuate înaintea probei au condus la aceleași valori ale prizelor de pământ ca în proba precedentă, relațiile (6.38) și (6.39).

Cu aceste precizări :

$$\underline{Z}_{esc}^{(1)} = (10,0608 + j 7,7941) \Omega \quad (6.44)$$

Valoarea pe fază a t.e.m. echivalente a surselor care alimentează defectul (oscilogrammele anexate ale probei III - 2) a fost $E = 10560$ V, deci :

$$\underline{I}_{sc}^{(1)} = (655,941 - j 508,159) A \quad (6.45)$$

respectiv :

$$\underline{I}_{sc}^{(1)} = I_{sc}^{(1)} e^{j\varphi} = 830 e^{-j 37^{\circ}46'} A \quad (6.46)$$

Curentul de scurtcircuit oscilografiat în stația Pitești-Vest a fost de 886 A. Diferența între valoarea obținută prin calcul și cea măsurată, în procente din valoarea calculată este :

./.

$$\varepsilon_{I_{sc}}^{(1)} \% = 100 \cdot \frac{I_{sc.calc}^{(1)} - I_{sc.m\ddot{a}s.}^{(1)}}{I_{sc.calc}^{(1)}} = -4,06 \% \quad (6.47)$$

Se observă că și în acest caz diferența este mică, confirmându-se valabilitatea relațiilor de calcul stabilite.

Scurtcircuit monofazat metalic în P.A.Banatul faza T-
priza experimentală + învelișurile cablurilor liniei,
de alimentare.

La această probă curentul de scurtcircuit monofazat s-a întors atât prin pământ cât și prin învelișurile metalice diamagnetice ale cablului liniei.

În acest caz impedanța de scurtcircuit s-a calculat cu relația (4.6) în care valorile parametrilor aferenți au fost luate din tabelul 6.7 și relațiile (6.37), (6.38) cu precizarea că măsurătorile au condus la o valoare diferită pentru R_{pex}^{PA} și anume :

$$R_{pex}^{PA} = 4,2 \ \Omega \quad (6.48)$$

$$Z_{esc}^{(1)} = (9,973 + j 7,925) \ \Omega \quad (6.49)$$

în care coeficientul K s-a calculat cu relația (4.19) obținându-se valoarea $K = 0,0212$.

Valoarea pe fază a t.e.m. echivalente a surselor care alimentează defectul a fost $E_f = 10760 \text{ V}$ (proba V - 1 anexată) deci :

$$I_{sc}^{(1)} = (661,31 - j 525,51) \ \Omega \quad (6.50)$$

respectiv :

$$\underline{I}_{sc}^{(1)} = I_{sc}^{(1)} e^{j\varphi} = 844,68 e^{-j 38031'} \text{ A} \quad (6.51)$$

Defazajul curentului de scurtcircuit este exprimat în raport cu \underline{E}_f considerat ca origine de fază .

Curentul de scurtcircuit monofazat ce se întoarce prin învelișurile metalice diamagnetice ale cablului $\underline{I}_{sc\text{ipv}}^{(1)\text{pa}}$ este ; dat de relația (4.14) în care introducând valorile respective rezultă :

$$\underline{I}_{sc\text{i}}^{(1)} = (-587,69 + j 428,55) \text{ A} \quad (6.52)$$

respectiv :

$$\underline{I}_{sc\text{i}}^{(1)} = I_{sc\text{i}}^{(1)} \cdot e^{j\varphi} = 727,35 e^{j143^{\circ}54'} \text{ A} \quad (6.53)$$

Curentul de scurtcircuit monofazat ce se întoarce prin pământ, $\underline{I}_{sc\text{pex}}^{(1)\text{pa}}$, este dat de relația (4.16) în care introducând valorile respective rezultă :

$$\underline{I}_{sc\text{p}}^{(1)} = (-73,18 + j 97,45) \text{ A} \quad (6.54)$$

respectiv :

$$\underline{I}_{sc\text{p}}^{(1)} = I_{sc\text{p}}^{(1)} \cdot e^{j\varphi} = 121,88 e^{j 126^{\circ}54'} \text{ A}$$

Prin oscilografieră, (proba V-1) s-a obținut :

$$I_{Tsc}^{(1)\text{pa}} = 700 \text{ A}; \quad I_{Tsc\text{i}}^{(1)\text{pa}} = 700 \text{ A} \quad \text{și} \quad I_{Tsc\text{pex}}^{(1)\text{pa}} = 115 \text{ A}$$

În tabelul 6.9 se prezintă sintetic valorile calculate și măsurate în cazul acestei probe :

./.

Tabelul 6.9.

Curentul	$I_{Tsc}^{(1)pa}$	$I_{Tscipv}^{(1)pa}$	$I_{Tscpex}^{(1)pa}$
calculat (A)	844,66	727,35	121,88
măsurat (A)	780	700	115
diferența (A)	64,68	27,35	6,88
%	7,65	3,76	5,64

Din analiza valorilor curenților de scurtcircuit (tabelul 6.9) se desprinde observația că diferențele dintre valorile măsurate și cele calculate sînt relativ mici, ceea ce confirmă variabilitatea metodologiei de calcul propuse în lucrare.

6.3.2. Incercări experimentale cu o linie alimentată radial de pe bare comune cu celelalte plecări radiale.

Spre deosebire de încercările de la paragraful 6.3.1 cele realizate și analizate la acest punct sînt executate în condițiile alimentării de pe același sistem de bare de 20 kV din stația Pitești-Vest a tuturor plecărilor radiale aferente sectorului experimental.

În acest context de încercări se ține cont de aportul curentului capacitiv corespunzător capacității de secvență omopolară a sectorului experimental, a cărei impedanță este de $-j 281 \Omega$, relația (6.36). Dintr-un ansamblu de încercări făcute în această concepție, în lucrare se prezintă numai cazul scurtcircuitului monofazat metalic în PA banatul / faza T - priza experimentală + învelșurile liniei de alimentare din stația Pitești-Vest, cu toate plecările radiale de 20 kV din această stație în funcțiune, pe același sistem de bare.

Măsurătorile efectuate pentru determinarea valorilor prizelor de pământ au condus la aceleași valori ca la proba precedentă (proba V - 1).

În acest caz expresia (6.34) cu $E_f = 10.800 \text{ V}$ (proba II-2 anexată) devine :

$$-\frac{\left(R_n + \frac{Z_{hb} + Z_h}{3}\right)^2}{E_f \left(\frac{Z_{ch}}{3} + R_n + \frac{Z_{hb} + Z_h}{3}\right)} = -\frac{0,0056 + j 0,0106}{9,732 - j 87,79} \quad (6,56)$$

Curentul de scurtcircuit monofazat fără luarea în considerare a reactanței capacitive de secvență omopolară, ținând cont de impedanța de scurtcircuit monofazat echivalentă (6.49) este:

$$\underline{I}_{Tsc}^{(1)} = (663,77 - j 527,46) \text{ A} \quad (6,57)$$

respectiv :

$$\underline{I}_{Tsc}^{(1)} = I_{Tsc}^{(1)} e^{j\varphi} = 847,82 e^{-j 38^{\circ}28'} \text{ A} \quad (6,58)$$

Curentul de scurtcircuit monofazat total cu luarea în considerare și a reactanței capacitive de secvență omopolară, dat de relația (6.35) este :

$$\underline{I}_{TscT}^{(1)} = (680,03 - j 437,78) \text{ A} \quad (6,59)$$

respectiv :

$$\underline{I}_{TscT}^{(1)} = I_{TscT}^{(1)} e^{j\varphi} = 808,76 e^{-j 32^{\circ}46'} \text{ A} \quad (6,60)$$

Curentul de scurtcircuit monofazat ce se întoarce prin învelișurile metalice diamagnetice ale cablului, $I_{TscT}^{(1)FV}$, este dat de relația (4.14) de unde rezulta :

$$-\underline{I}_{TscT}^{(1)} = (-680,03 + j 437,78) \text{ A} \quad (6,61)$$

respectiv :

$$- \underline{I}_{Tsct\hat{i}}^{(1)} = I_{Tsct\hat{i}}^{(1)} e^{j\varphi} = 696,42 e^{j 149^{\circ}39'} \text{ A} \quad (6.62)$$

Curentul de scurtcircuit monofazat ce se întoarce prin pământ $\underline{I}_{Tsctp}^{(1)}$, este dat de relația (4.16) în care introducând valorile respective rezultă :

$$- \underline{I}_{Tsctp}^{(1)} = (- 79,02 + j 85,87) \text{ A} \quad (6.63)$$

respectiv :

$$- \underline{I}_{Tsctp}^{(1)} = I_{Tsctp}^{(1)} e^{j\varphi} = 116,70 e^{j 132^{\circ}37'} \text{ A} \quad (6.64)$$

Prin oscilografieră, (proba II-2 anexată) s-au obținut :

$$I_{Tsct}^{(1)PV} = 760 \text{ A}, \quad I_{Tsct\hat{i}pa}^{(1)PV} = 670 \text{ A}, \quad I_{Tsctpex}^{(1)pa} = 105 \text{ A}$$

În tabelul 6.10 se prezintă sintetic valorile calculate și măsurate în cazul acestei încercări.

Tabelul 6.10.

Curentul		$I_{Tsct}^{(1)PV}$	$I_{Tsct\hat{i}pa}^{(1)PV}$	$I_{Tsctpex}^{(1)PV}$
calculat	(A)	808,76	696,42	116,70
măsurat	(A)	760	670	105
diferențe	(A)	48,76	26,42	11,7
	%	+6,0	+3,8	10

Din analiza valorilor curenților de scurtcircuit din tabelul 6.10 se observă că și în acest caz, când se ține cont de prezența capacității de secvență omopolară a rețelei, diferența între valorile calculate și cele măsurate este relativ mică, confirmându-se valabilitatea relațiilor de calcul prezentate în lucrare.

./.

7. CONCLUZII SI CONTRIBUTII

Pe linia introducerii de tehnologii noi în domeniul rețelelor electrice de medie tensiune, cu implicații directe privind fiabilitatea acestora, creșterea productivității muncii în exploatare și reducerea consumului de materiale se înscrie metoda tratării neutrilor prin rezistor.

În cazul specific al rețelelor subterane un rol hotărâtor asupra dimensionării elementelor de rețea, îl are determinarea repartiției curentului de scurtcircuit monofazat pe căile de întoarcere ale acestuia, constituite din învelișurile diamagnetice ale cablurilor și pământ.

Contribuția principală în lucrare constă tocmai în stabilirea repartiției curentului de scurtcircuit monofazat pe căile de întoarcere, atât pe cale matricială cât și prin scheme echivalente pentru cazul general cu întoarcere prin învelișurile metalice diamagnetice și prin pământ. Un astfel de calcul, cu determinări și verificări experimentale sistematice, a fost făcut pentru prima oară în țară.

În lucrare se analizează în afară de cazul general al repartiției curentului de scurtcircuit monofazat și cazurile particulare, corespunzătoare unor situații accidentale (întreruperea continuității învelișului și a legăturii de punere la pământ).

Stabilirea pe cale de calcul a repartiției curentului de scurtcircuit monofazat a fost posibilă numai prin adoptarea unui sistem de parametri, care să permită substituția ansamblului cablu-pământ prin elemente de circuit. Astfel, au fost introduse reactanțe parțiale, care au permis elaborarea schemelor echivalente, cu parametri concentrați. Evidențierea aportului învelișurilor atât în cazul rețelelor subterane, cât și în cele de suprafață,

constituie o contribuție teoretică originală, a autorului.

Expresiile impedanțelor de secvență au fost stabilite pentru cazul general al cablurilor trifazate, cu învelișuri metalice diamagnetice pe fază și extinse la cazul particular al cablurilor cu benzi feromagnetice de protecție. Determinarea influenței benzilor, și introducerea acestora în expresia impedanțelor cablurilor, constituie de asemenea o contribuție a autorului prin formularea și stabilirea expresiilor rezistențelor și reactanțelor suplimentare.

În centrul preocupării autorului s-a situat elaborarea unei metodologii originale pentru măsurarea pe cale experimentală a parametrilor în condiții de laborator și într-un sector experimental. Astfel, au fost concepute scheme pentru determinarea experimentală a parametrilor, s-au efectuat grupări corespunzătoare iar dintr-un set de măsurători au rezultat valorile tuturor parametrilor. Concepția de organizare a măsurărilor a urmărit :

- măsurarea parametrilor rezultați din construcția cablului în condiții de laborator ceea ce corespunde unui cablu nepozat ;

- măsurarea parametrilor rezultați din condițiile de pozare, cu punerea în evidență a caracteristicilor solului, în condițiile unui cablu montat în pământ în sectorul experimental de rețea.

În urma efectuării de măsurători în laborator și sectorul experimental (tronsoanel 2), cu tensiune redusă, a rezultat următoarea compatibilitate între parametrii calculați și cei

măsurați :

- 3,53 % pentru reactanța parțială a conductorului

(X_a) , respectiv 5,526 % pentru cea a învelișului (X_{ia});

- 1,2 % pentru reactanța parțială a pământului (X_p) și
- 2,08 % pentru reactanța mutuală parțială (X_s) ;
- 1,07 % pentru rezistența solului (R'_p) ;
- 3,4 % și 5,37 % pentru rezistențele învelișurilor (R'_i) și conductorului (R'_c).

Compatibilitatea între valorile parametrilor obținute prin calcul și cele rezultate din măsurători a confirmat valabilitatea relațiilor teoretice stabilite și utilizarea acestora în determinarea repartiției curentului de scurtcircuit.

În legătură cu calculul impedanței de secvență omopolară, autorul pune în evidență raportul acesteia față de impedanța de secvență directă Z_h/Z_d , pentru cablurile cu învelișuri din plumb și cu benzi feromagnetice de protecție, în funcție de căile de întoarcere a curentului omopolar :

- 38,89 pentru întoarcerea numai prin pământ ;
- 7,99 pentru întoarcerea numai prin înveliș ;
- 7,07 pentru întoarcerea în comun (pământ-înveliș).

Se consideră că acestea pot sta la baza calculelor preliminare și înlocui aproximările existente [87], în care raportul unic era 10 pentru rezistență și respectiv (3,5 ÷ 4,6) pentru reactanță.

Confruntarea rezultatelor teoretice referitoare la calculul curentului de scurtcircuit mono fazat și a repartiției acestuia pe căile de întoarcere cu rezultatele experimentale a constituit partea principală a lucrării. Corelat cu elaborarea metodologiei de măsurare, la tensiunea nominală a rețelei, autorul s-a ocupat și de organizarea sectorului experimental.

Metodologia de măsurare a cuprins : stabilirea mărimilor de măsurat, elaborarea schemelor de măsură cu precizarea locului de amplasare al aparatelor înregistratoare, realizarea unor scheme pentru comanda de la distanță simultană a tuturor aparatelor înregistratoare și asigurarea unei durate prestabilite a defectului.

În urma efectuării unui număr mare de măsurători cu tensiune nominală, se constată următoarele :

- încercările efectuate, cu o linie radială, în lungime de 1792 m au condus la erori între mărimile calculate și cele măsurate de : 3,7 % pentru componenta curentului de scurtcircuit prin învelișuri, respectiv 5,6 % pentru componenta curentului de scurtcircuit monofazat prin pământ ;

- încercările efectuate, cu întreg sectorul experimental, (toate liniile racordate la bara de alimentare), conduc la următoarele erori ale valorilor calculate ale curentului de scurtcircuit monofazat față de valorile determinate prin încercări : 7,6 % în cazul neglijării aportului reactanței de secvență omopolară capacitivă, respectiv 6 % când se ia în considerare și această mărime.

Calcululele teoretice și încercările experimentale au evidențiat faptul că din curentul total de scurtcircuit monofazat, cea mai mare pondere o are componenta care se întoarce prin învelișurile metalice diamagnetice și anume : 86,1 % rezultată din calcule și 88,1 % din încercări. Aceste valori pot sta la baza calculelor preliminare pentru cabluri cu învelișuri metalice din plumb, cu benzi feromagnetice de protecție.

Concordanța între partea teoretică și partea experimentală a lucrării în limita unor erori compatibile, confirmă valabilitatea metodei de calcul prezentată de autor în lucrarea în discuție.

astfel literatura noastră de specialitate în domeniul rețelelor în cablu. Metodologiile experimentale pentru măsurarea parametrilor și repartiției curentului de scurtcircuit monofazat constituie o contribuție originală a autorului și pot fi generalizate la fabricile constructoare de cabluri și la întreprinderile de rețele electrice din țară.

În baza lucrării elaborate, prin care s-a fundamentat condițiile de dimensionare a elementelor de rețea, a fost pus în funcțiune sectorul experimental Pitești Vest. Instalațiile existente, parcurse de componentele curentului de scurtcircuit monofazat pe căile de întoarcere, s-au dovedit apte funcționării în condițiile tratării neutrului cu rezistor (rezistența echivalentă a prizei 1 ohm ; grosimea învelișurilor de plumb 1,6 mm ; legăturile de punere la pământ a învelișurilor 16 mm² cupru).

Generalizarea pe țară a soluției tratării neutrului prin rezistor la rețelele electrice în cablu s-a făcut prin actul normativ 3 RE-CT 64-78 și prin îndreptarul de proiectare a stațiilor de 110 kV/MT 1E-1p-35-80.

O preocupare de viitor o constituie extinderea metodologiei elaborate, la cablurile cu izolație de polietilenă și înveliș (ecran) realizat din benzi sau sârme de cupru acoperite cu policlorură de vinil. Se are în vedere realizarea de linii cu și fără conductor suplimentar de-a-lungul traseului. Concomitent se vor elabora și instrucțiunile de realizare a instalațiilor de legare la pământ.

- BIBLIOGRAFIE -

=====

1. Adămuț, I.A. - Analiza propagării undelor electromagnetice pe linii în regim tranzitoriu. Editura Academiei RSR, 1972.
2. Ametani, A. - Wave propagation characteristics of cables. IEEE Transactions vol. PAS-99, No. 2 March / April, 1980.
3. Auge, Commelini, Erich, Hardt, Jomier, Lagostena, Lemoine, Noferi, Poper, Scapini, Siegel. - Comparaison des criteres de calcul et de fonctionnement du reseaux moyenne tension adoptés dans trois pays (Allemagne, France, Italie) pour le projet d'électrification de la même zone. UNIPEDEE - referat 50/D.3, 1972.
4. Bălan, Gh. - Influența tratării neutrilor asupra siguranței în funcționare a rețelelor de medie tensiune, I.P. București, 1978. Teză de doctorat.
5. Bercovici, M. Arie, A. Poiată, Al. - Rețelele electrice. Calcul electric Editura tehnică, București, 1974.
6. Boast, W.B. - Transpositions and the calculation of inductance from geometric mean distances, AIEE Transactions, vol. 69, 1950.
7. Bogorodițchi, N.P. Pasancov, V.V. Tareev, B.M. - Materiale folosite în industria electro-tehnică. Traducere din limba rusă. Editura Tehnică, 1952.
8. Booth, H.C. Hutchings, E.E. Whithead, S. - Current-rating and impedance of cables in buildings and ships, I.E.E. Journal, vol. 63, October, 1938.
9. Bucchere, P.L. Catoliotti, V. - Analisi sperimentale di modelli di dispersori per impianti di terra di piccola estensione, L'Elettrotecnica, vol. LVI No. 8, Agosto, 1969.
10. Cheek, R.C. - Zero-sequence impedances of parallel three conductor cables, Electric Light and Power, October, 1948.
11. Clarke, E. - Analiza circuitelor sistemelor electro-energetice, traducere din limba engleză. Editura tehnică, București, 1973.

12. Comellini, E. - A computer program for determining electrical resistance and reactance of any transmission line, IEEE Transactions, vol.PAS-92, 1973.
13. Crişan, O. - Sisteme electroenergetice. Editura didactică și pedagogică, 1979.
14. Dawalibi, F. - Ground fault current distribution between soil and neutral conductors. IEEE Transactions vol.PAS-99, No.2 March / April, 1980, p. 452-459.
15. Dawalibi, F. Mukhedkar, D. - Transferred earth potentials in power systems, IEEE Transactions, vol. PAS-97, ; no.1 January / February 1976.
16. Dimo, P. Ionescu.S. Arie, E. Nicolae,P. Manea, F. - Tratarea neutrului rețelelor de înaltă tensiune pentru evitarea supratensiunilor prelungite. Editura Academiei RSR, 1960.
17. Electricité de France - Cables moyenne tension a isolation synthétique extrudée HN 33-S-22, mars 1971.
18. Electricité de France - Mise à la terre des reseaux basse tension. G.Te.Po - BF/F.V, 1967.
19. Electricité de France - Cables 12/20 kV a isolation en polyethylene reticule chimiquement pour les reseaux de distribution HN-S-23, sept.1978.
20. Engineering Recommendation Forty-fourth chief engineers conference - National code of practice on the application of protective multiple earthing to medium voltage networks G-12. January, 1969.
21. Favraud, J. - Fonctionnement et protection des réseaux de distribution, 3dF, 1967.
22. Feodorov, A.A. Kameneva, B.B. Cernuşkii, A.I. Stebunova, E.D. Siderov, S.T. - Neobhodimosti primeneniia naprajenia 20 kV v rasprededelitelnih setiah predpriatii i gorodov. Electricestvo, no.8, 1980
23. Griscom, S.B. - Grounding of power system neutrals Westinghouse, Pittsburg, Electrical Transmission and Distribution Reference Book, 1964.
24. Höppner, H. Lau, H. - Planungs-und betriebsprobleme bei der einföhrung der niederohmigen sternpunktterdung in mittelspannungskabelnetzen Teil 1 Elektrische 29, 1975.

25. Iacobescu, Gh.
Iordănescu, I.
Tudose, M. - Rețele și sisteme electrice. Editura didactică și pedagogică, 1979.
26. x
x x - Instruction pour l'application de l'arrêté interministeriel du 13 février 1970 déterminant les conditions techniques auxquelles doivent satisfaire les distributions d'énergie électrique Journal officiel 5 mars 1970.
27. x
x x - Tratarea neutrului rețelelor subterane de medie tensiune. CIRE - 3RE-CT-64, 1978.
28. IRS - Cabluri de energie cu izolație de hirtie impregnată, în manta de plumb, pentru tensiunea nominală (U) pînă la 20 kV între conductoare. STAS 4481-73.
29. IRS - Instalații electrice de 1 kV și peste 1 kV. Instalații de legare la pămînt de protecție. Prescripții. STAS 7334-78.
30. IRS - Instalații electrice de joasă tensiune. Instalații de legare la pămînt de protecție. Prescripții. STAS 6119-78.
31. IRS - Protecția împotriva electrocutărilor. Limite admise. STAS 2612-72.
32. Kalantarov, P.L.
Teitlin, L.A. - Calculul inductanțelor. Traducere din limba rusă. Editura Tehnică, București 1958.
33. Kruger, F.H.
Bentvelsen, P.A.C. - Cable a isolation synthetique avec ecran exterior á resistance non lineaire CIGRE Rapport 21-02, sesiunea 1978.
34. Le Verre, P. - Les surtensions lors de l'élimination de courts-circuits sur le reseaux dont le neutre est mis à la terre par une réactance. Bulletin SFE, nr.4 avril 1960.
35. Lewis, W.A.
Allen, G.D.
Wang, J.C. - Circuit constants for concentric neutral underground distribution cables on 4 phase basis, IEEE Transactions, vol. PAS-97, No.1 January / February 1978.
36. Lewis, W.A.
Allen, G.D. - Symmetrical component circuit constants and neutral circulating currents for concentric-neutral underground distribution cables, IEEE Transactions, vol. PAS-97, No.1 January / February 1978.

37. Margolin, N.F. - Curentii din pământ. Editura Energetică de Stat 1953. Traducere din limba rusă.
38. Mark, D.
Bălan, G. - Coordonarea izolației în sistemele energetice. Editura Tehnică, 1968.
39. Mauduit, A. - Installations electriques a haut et basse tension, tome I, Dunod, Paris, 1964.
40. Mauduit, A. - Installations electriques a haut et basse tension, tome II, Dunod, Paris.
41. Mauduit, A. - Installations electriques a haut et basse tension, tome III, Dunod, Paris, 1959.
42. Mazza, G.P. - I mezzi di protezione contro le sovratensioni per le reti a media tensione. *Lucrări : Congres Trieste 1966.* Referat A.B. 23.
43. MICM - ICMB - Cabluri de energie cu izolație din polietilenă normală pentru 20 kV. NID 6094, 1976.
44. Moretti, M. - Il problema dello stato del neutro delle reti a media tensione. *L'elettrotecnica, No. 8 bis, august 1963.*
45. Muller, H.N. - Electrical characteristics, of cables Westinghouse, Pittsburg, Electrical Transmission and Distribution Reference Book, 1964.
46. Nemeș, M.
Besoiu, I., Ivașcu, C.
Velicescu, C. - Optimizarea rezistenței de liantare în rețele cu neutrul tratat prin rezistor. Sesiunea de comunicări tehnico-științifică Buc., 12-14 iunie 1980.
47. ONU-Conseil Economique et social
Comite de l'Énergie électrique. - Les reseaux de distribution par cables dans les zones rurales. EP/GE.1/R.20/Add.5 24 mars 1980.
48. Owen, R.E.
Clinkerbeard, C.R. - Surge protection of UD cable systems, IEEE Transactions, vol. PAS-97, nr. 4 July / August, 1976.
49. Pélissier, R. - Les réseaux d'énergie électrique. Tome 1 Les Aspects technique du service, Dunod, 1971.
50. Pélissier, R. - Tome 2 Calcul et réglage des réseaux. Dunod, 1971.
51. Pélissier, R. - Tome 4. Propagation des ondes électriques sur les lignes d'énergie, Dunod, 1975.
52. Pelizzari, P.
Pinceti, L. - Il sistema elettrico del centro siderurgico di Toronto. *Bollettino Tecnico Pnsider gennaio,*

53. Petard, M. - Generalites sur la protection des reseaux d'energie electrique. EdF - 1961.
54. Poeată, A. Arie, A. - Transportul și distribuția energiei electrice. Editura didactică și pedagogică, București, 1981.
Crișan, O.
Eremia, M.
Alexandrescu, V.
Buta, A.
55. Raicu, C. - Măsurători de rezistivitate sol în sectorul experimental Pitești. ICPTTc No. 2851, 1979.
56. Rüdénberg, R. - Fenomene tranzitorii în sistemele electroenergetice. Traducere din limba engleză. Editura Tehnică. 1959.
57. Rueger, M. - Optimale sternpunktbehandlung in mittelspannunganetzer. Elektrizitätswirtschaft, No.21, 12 octobree 1970, vol.69.
Stolte, E.
58. Salter, E.H. - Resistance and reactance of three-conductor cables, AIEE Transactions, vol. 53, December 1934.
Shanklin, G.B.
Wiseman, R.J.
59. Silvester, P. - The accurate calculation of skin effect in conductors of complicated shape IEEE Transactions, vol. PAS-87, 1968.
60. Simmons, D.M. - Calculation of the electrical problems of underground cables, The Electric Journal, vol.29, May to November, 1932.
61. Smith, D.R. - Impedance and circulating current calculations for UD multi-wire concentric neutral circuits, IEEE Transactions, vol. PAS-91, No. 3 May / June 1972.
Barger, J.V.
62. Stimmer - Störungen und schadenstatistik 1966 des verbaudes der elektrizitätswerke osterreiches OZE, 21 (1966).
63. Stone, D.L. - Mathematical analysis of direct buried rural distribution cable impedance, IEEE Transactions, vol. PAS-91, No.3 May / June 1972, p. 1015-1020.
64. x - Legarea neutralui la pământ în rețele de înaltă tensiune.
x x Studii și cercetări de Energetică Tom I, nr.3-4, 1951.

65. Sora, C.
Toader, D.
Gheju, P.
Tithăzan, M.
- Studierea și stabilirea caracteristicilor elementelor de rețea și ale consumatorilor pentru prelucrarea rezultatelor experimentale din rețeaua de 20 kV Pitești, precum și a celor care trebuie modelate în vederea studierii repartiției curenților de scurtcircuit monofazați.
Lucrare de colaborare contract 37/77.
Inst.Polit. "Traian Vuia", Timișoara, 1977.
66. Sora, C.
Toader, D.
Gheju, P.
Tithăzan, M.
- Studierea și realizarea filtrului trece bandă pentru $f=50$ Hz și a punții redresoare care să filtreze armonica a treia față de fundamentală într-un raport egal cu 10.
Lucrare de colaborare, contract 37/77.
Inst.Polit. "Traian Vuia", Timișoara, 1977.
67. Sora, C.
Dobre, S.
Toader, D.
Hărăguș, St.
- Schema pentru selectarea liniei de medie tensiune pe care a apărut un scurtcircuit monofazat cu rezistență de trecere mare.
Lucrare de colaborare, contract 222/79.
IPT, 1979.
68. Sora, C.
- Bazele electrotehnicii vol.3, partea I,
Inst.Politehnic "Traian Vuia", Timișoara,
1976.
69. Sora, C.
- Bazele electrotehnicii vol.3, partea II,
Inst.Politehnic "Traian Vuia",
Timișoara, 1977.
70. Tănăsescu, Al.
Ișfanu, T.
Blăniță, Fl.
- Rezistența pentru tratarea neutrului de 20 kV - 1000 A.
SCP-CIRE Nr.339/V, septembrie, 1974.
71. Tănăsescu, Al.
Dîmboveanu, V.
- Transformator pentru crearea neutrului artificial prin rezistență în sectorul experimental 20 kV.
SCP-CIRE, No.339/II, septembrie, 1974.
72. Tănăsescu, Al.
Mărieș, H.
- Analiza comparativă a riscurilor de accidente la rețele subterane de medie tensiune cu neutrul izolat sau compensat în cazul dublei puneri la pământ și la rețele subterane de medie tensiune cu neutrul tratat prin rezistență în cazul scurtcircuitului monofazat.
SCP-CIRE No.339, 1980.
73. Tănăsescu, Al.
Ișfanu, T.
- Considerațiuni teoretice privind supra-tensiunile și circulația curenților în cazul scurtcircuitelor monofazate din rețelele de medie tensiune cu neutrul tratat prin rezistență.
Pitești, 1977.

74. Tănăsescu, Al.
Ionescu, M.
- Studiul de oscilarea cablurilor de 20 kV
SCP-CIRE No.310, 1974.
75. Tănăsescu, Al.
Catona, M.
- Determinarea influenței modului de
tratament a neutrului în rețele electrice
subterane de medie tensiune asupra
costului specific.
SCP-CIRE No. 202, octombrie 1973.
76. Tănăsescu, Al.
Hristea, V.
Cepleu, E.
- Comportarea în exploatare a rețelei
subterane 20 kV Pitești-Vest cu
neutrul tratat prin rezistență în anul
1977, CIRE-SCP No.3.48, decembrie 1977.
77. Tănăsescu, Al.
Hristea, V.
Cepleu, E.
- Prelucrarea rezultatelor obținute în
timpul exploatării sectorului experimental
Pitești-Vest, precum și în baza înre-
gistrărilor efectuate în timpul incidentelor
produse în rețeaua 20 kV cu neutrul
tratament prin rezistență.
CIRE-SCP No.3.48, decembrie 1978.
78. Tănăsescu, Al.
Hristea, V.
Cepleu, E.
- Prelucrarea rezultatelor obținute în
timpul exploatării sectorului
experimental Pitești-Vest, precum și în
baza înregistrărilor efectuate în
timpul incidentelor produse în rețeaua
20 kV având neutrul tratat prin rezis-
tență.
CIRE-SCP No.3.48, decembrie 1979.
79. Tănăsescu, Al.
Hristea, V.
Mihăilescu, A.
Ceuță, M.
- Analiza comparativă a riscurilor de ac-
cidente care apar în rețele de medie
tensiune cu neutrul izolat sau compensat
la defecte de simplă sau dublă punere la
pământ cu cele din cadrul rețelelor
aeriene sau mixte cu neutrul tratat prin
rezistență în cazul defectelor de scurt-
circuit monofazat SCP-CIRE No.687,
martie 1980.
80. Tănăsescu, Al.
Ișfanu, T.
Russ, M.
Mărieș, H.
- Prizele de pământ echivalente din
posturile de transformare și punctele de
alimentare în cazul rețelelor de cabluri
de 20 kV cu neutrul tratat prin rezistență.
Referat 77 la sesiunea ICERN&ERG, iunie,
1980.
81. Tănăsescu, Al.
Catona, M.
- Determinarea timpilor de funcționare sub
defect a cablurilor de medie tensiune.
SCP-CIRE No.294, noiembrie, 1974.
82. Tănăsescu, Al.
Ișfanu, T.
- Parametrii cablurilor în regia de scurt-
circuit monofazat. Reactanțe inductive.
Energetica vol.XVII, No. 11-12 Nov/dec,
1979.

83. Tănăsescu, Al.
Işfănu, T. - Tratatul neutralităţii reţelelor electrice de medie tensiune cu rezistenţă. Prima conferinţa a energeticienilor din România, oct. 1974.
84. Tănăsescu, Al.
Mărieş, H. - Calculul supratensiunilor în regim permanent de scurtcircuit. Consfătuire tehnico ştiinţifică I.R.E. Suceava, 1980.
85. Timotin, Al.
Tugulea, A. - Parametrii tranzitorii longitudinali ai liniei coaxiale. Studii cercetări electrice, tom.17, nr.3, 1967.
86. Timotin, A. ş.a. - Lecţii de bazele electrotehnicii, Editura didactică şi pedagogică, Bucureşti, 1970.
87. Ulianov, S.A. - Regimuri tranzitorii ale sistemelor electrice. Traducere din limba rusă. Editura tehnică, Bucureşti, 1967.
88. Vazaca, Chr. - Incălzirea prin inducţie de joasă şi înaltă frecvenţă. Editura Academiei RPR (RSR), Bucureşti, 1956.
89. Wedwpohl, L.M.
Wileox, D.J. - Transient analysis of underground Power Transmission Systems PROC, IEEE vol. 120, 1973.
90. Wend, H. - Petersen-Spulen oder strombegrenzende widerstände in stadtnetzen. Elektrizitätswirtschaft, No. 22, 27 oct. 1969, vol. 68.
91. Willheim, R.
Waters, M.
Rüdenberg, R. - Neutral grounding in high voltage transmission. Elsevier Publishing Company, 1956.
92. Wright, Sherwin, H.
Hall, C.F. - Characteristics of aerial lines Westinghouse, Pittsburg, Electrical Transmission and Distribution Reference Book, 1964.
93. x x x - Power System Protection, The Electricity Council, London, 1969.

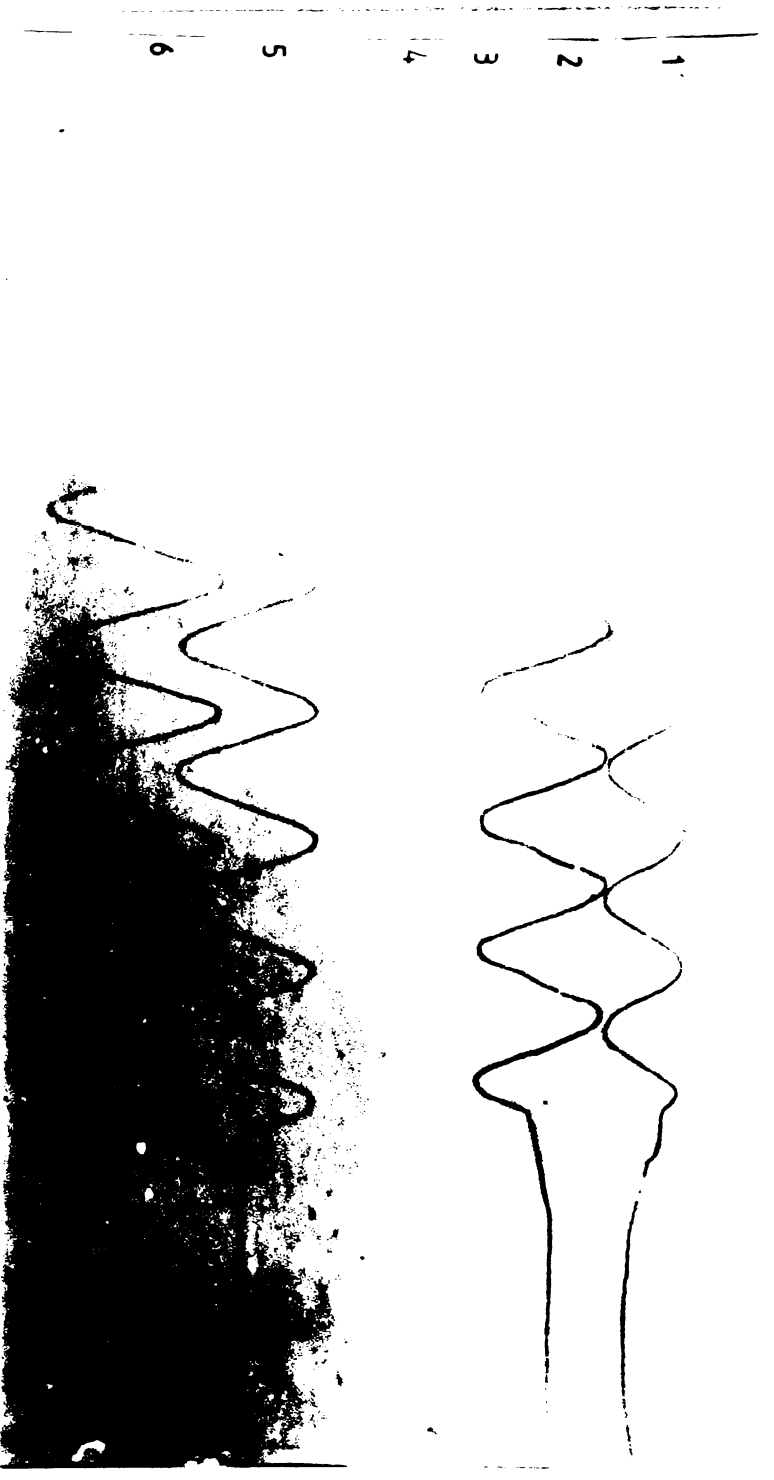
LISTA ANEXELOR

1. Planşa nr.1 - schema electrică a sectorului experimental de 20 kV .
2. Planşa nr.2 - schema electrică a staţiei de 110/20 kV - montarea oscilografelor -
3. Oscilograme.
 - 3.1. Scurtcircuit monofazat în PA Banatul faza T - priza experimentală (proba XI-1).
 - 3.1.1. Mărimi oscilografiate în staţia 110/20 kV Piteşti-Vest pe partea 20 kV (oscilograful OS-1).
 - 3.1.2. Mărimi oscilografiate în staţia 110/20 kV Piteşti-Vest pe partea de 20 kV (oscilograful OS-2).
 - 3.1.3. Mărimi oscilografiate în PA Banatul (oscilograful OS-3).
 - 3.1.4. Mărimi oscilografiate în PA Banatul (oscilograful OS-4).
 - 3.2. Scurtcircuit monofazat metalic în PA Banatul faza T - învelișurile metalice de plumb ale cablurilor liniei de alimentare din staţia Piteşti-Vest (proba III-2).
 - 3.2.1. Mărimi oscilografiate în staţia Piteşti-Vest pe partea de 20 kV (oscilograful OS-1).
 - 3.2.2. Mărimi oscilografiate în staţia Piteşti-Vest pe partea de 20 kV (oscilograful OS-2).
 - 3.2.3. Mărimi oscilografiate în PA 20 kV Banatul (oscilograful OS-3).
 - 3.2.4. Mărimi oscilografiate în PA 20 kV Banatul (oscilograful OS-4).
 - 3.3. Scurtcircuit monofazat în PA Banatul faza T - priza experimentală plus învelișurile cablurilor liniei de alimentare (proba V-1).
 - 3.3.1. Mărimi oscilografiate în staţia 110/20 kV Piteşti-Vest pe partea de 20 kV (oscilograful OS-1).
 - 3.3.2. Mărimi oscilografiate în staţia 110/20 kV Piteşti-Vest pe partea de 20 kV (oscilograful OS-2).

./.

- 3.3.3. Mărimi oscilografiate în PA 20 kV Banatul
(oscilograful OS-3).
- 3.3.4. Mărimi oscilografiate în PA 20 kV Banatul
(oscilograful OS-4).
- 3.4. Scurtcircuit monofazat metalic în PA Banatul - priza,
experimentală + învelișurile metalice ale liniei cu
întreaga rețea 20 kV a sectorului experimental în
funcțiune (proba II-2).
 - 3.4.1. Mărimi măsurate în stația 110/20 kV Pitești-
Vest pe partea de 20 kV (oscilograful OS-1).
 - 3.4.2. Mărimi măsurate în stația Pitești-Vest pe
partea de 20 kV (oscilograful OS-2).
 - 3.4.3. Mărimi oscilografiate în PA 20 kV Banatul
(oscilograful OS-3).
 - 3.4.4. Mărimi oscilografiate în PA 20 kV Banatul
(oscilograful OS-4).

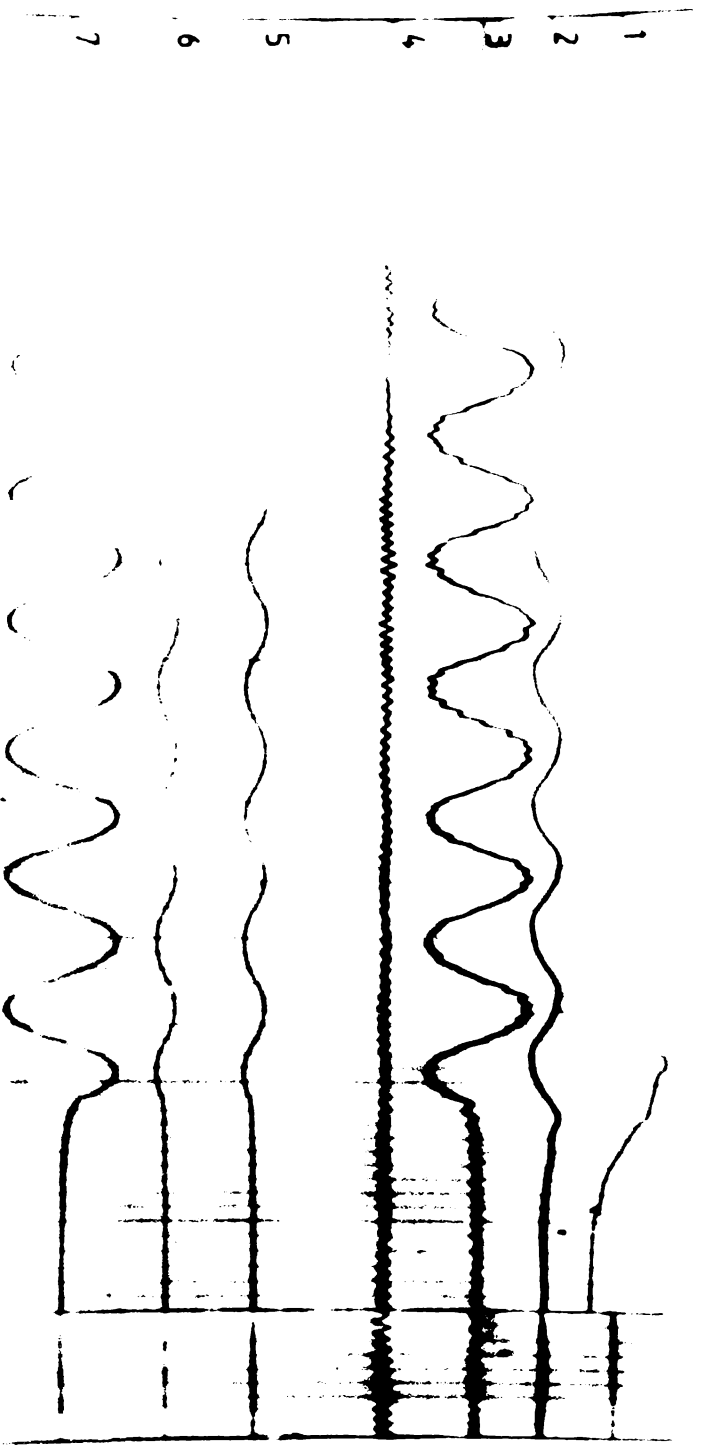
Forma oscilografate în PA 20kV Banatul (oscilografatul OS-3)



U₀ = 10150 V
 U = 16500 V
 I = 0

I_{sc1px} = 6 A
 I_{sc2px} = 70 A

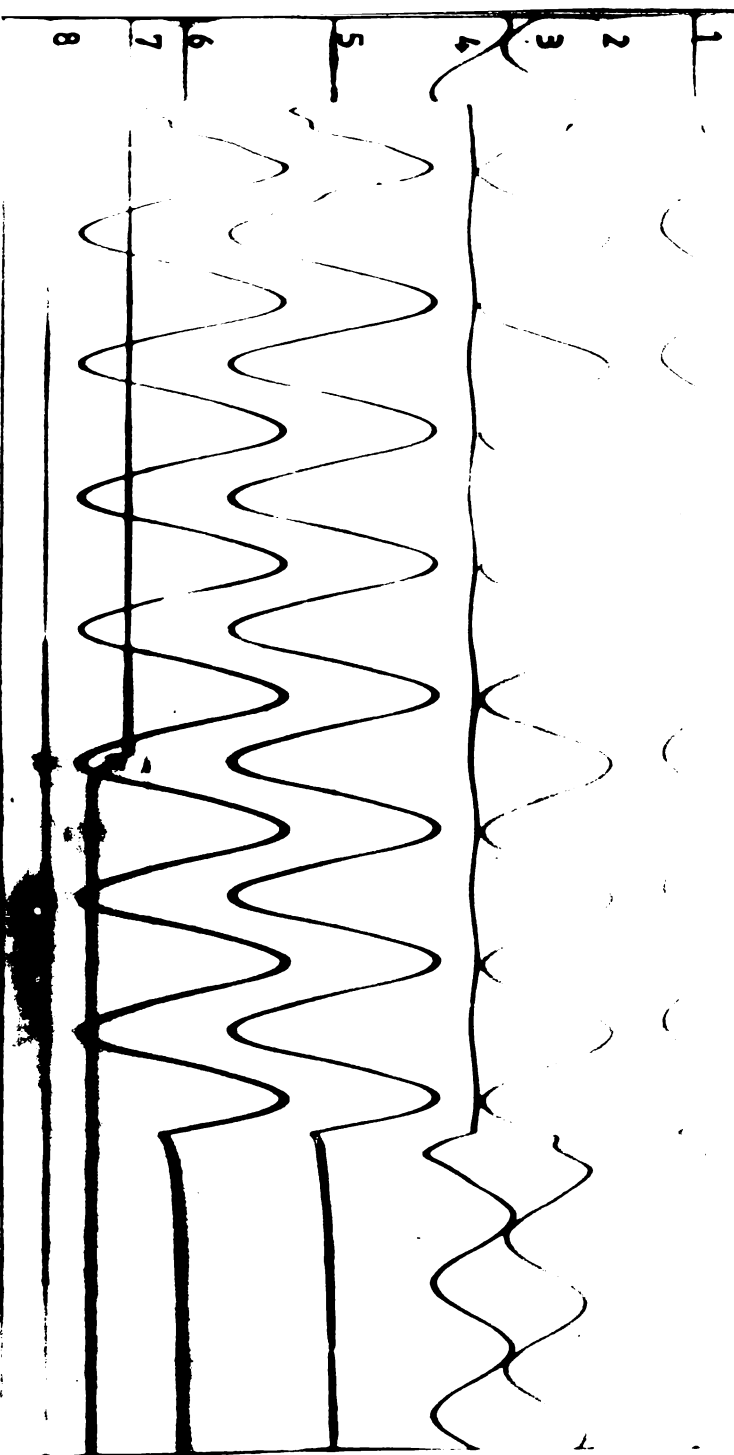
Forma oscilografate în PA 20kV Banatul (oscilografatul OS-4)



U₀ = 10170 V
 I_{sc1px} = 8 A
 I_{sc2px} = 105 A
 I_{sc3px} = 0

U_{pac} = 435 V

scurtcircuit monofazat metallic in PA Banatul-priza experimentală + nivelurile metalice ale liniei de întregă rețea 20kV a sectorului experimental în funcțiune (proba II-2)



Marimi masurate în stația 110/20kV Pitești-Vești pe partea de 20kV (oscilografid 05-1)

$$U_0 = 9920 \text{ V}$$

$$U_{R_0} = 15380 \text{ V}$$

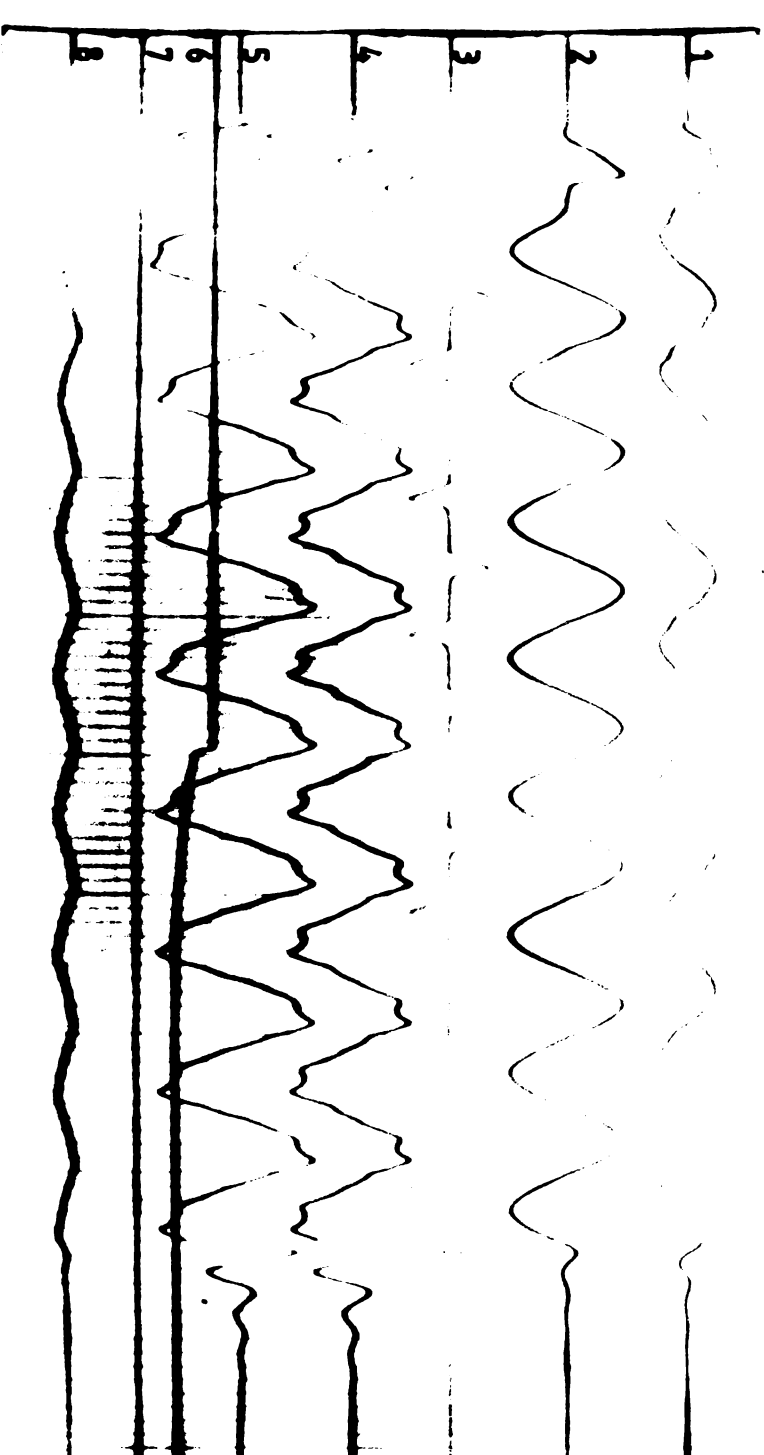
$$U_{S_0} = 17200 \text{ V}$$

$$U_{T_0} = 880 \text{ V}$$

$$I_{T_{sc}}^{(1)PV} = 760 \text{ A}$$

$$I_{sc}^{(1)PA} = 665 \text{ A}$$

$$\text{---}$$



Marimi masurate în stația Pitești-Vești pe partea de 20kV (oscilografid 05-2)

$$U_0 = 9900 \text{ V}$$

$$\left| I_{T_{sc}}^{(1)PV} + I_{T_{sc}}^{(1)PA} \right| = 830 \text{ A}$$

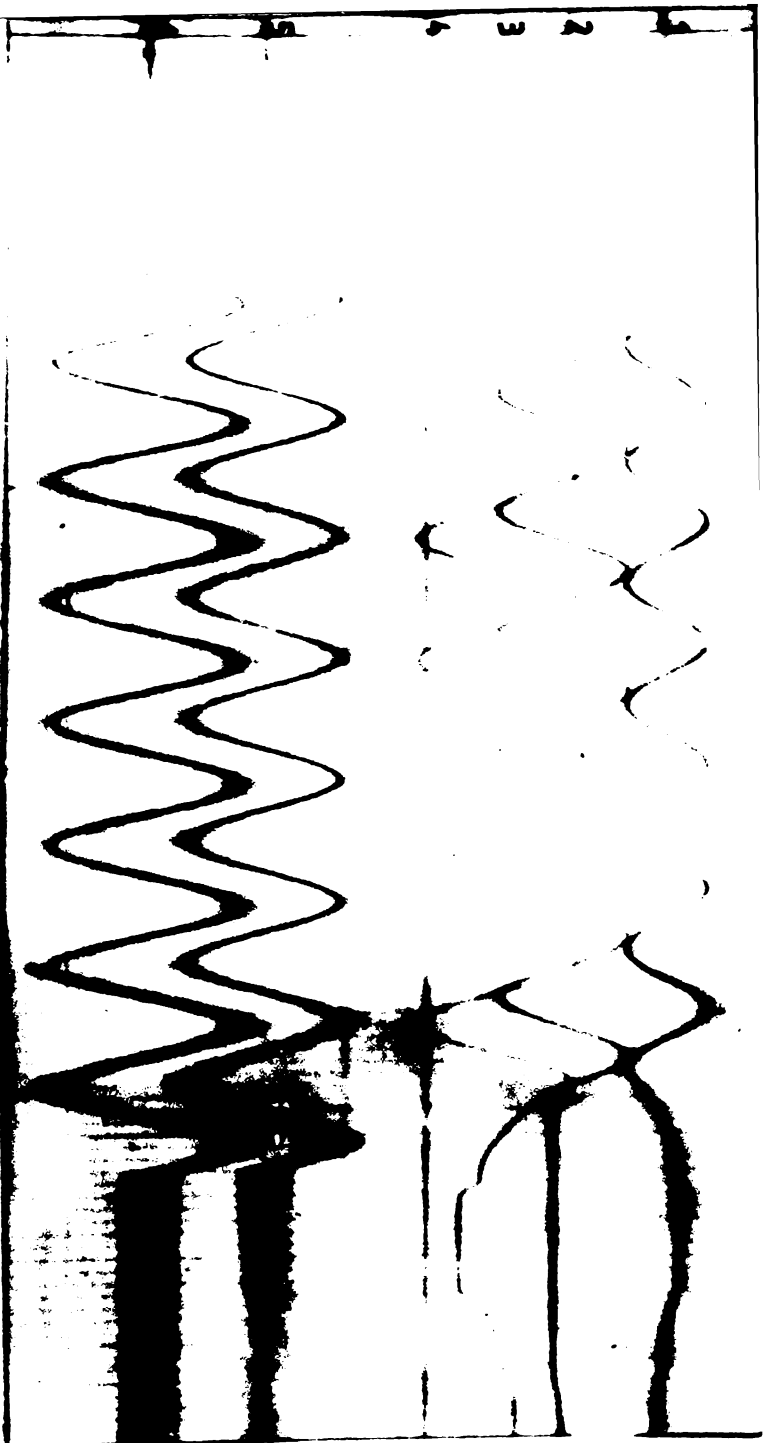
neconcludent

$$\left| I_{sc}^{(1)PA} \right|_{PA_{Sud}} = 31,7 \text{ A}$$

$$I_{sc}^{(1)PA_{Sud}} = 44 \text{ A}$$

$$\text{---}$$

$$I_{sc}^{(1)PV} + I_{sc}^{(1)PA_{Sud}} = 10 \text{ A}$$



Marimi oscilografate în PA.28 în sistemul de alimentare (gr. 2)

$U_0 = 10320 \text{ V}$

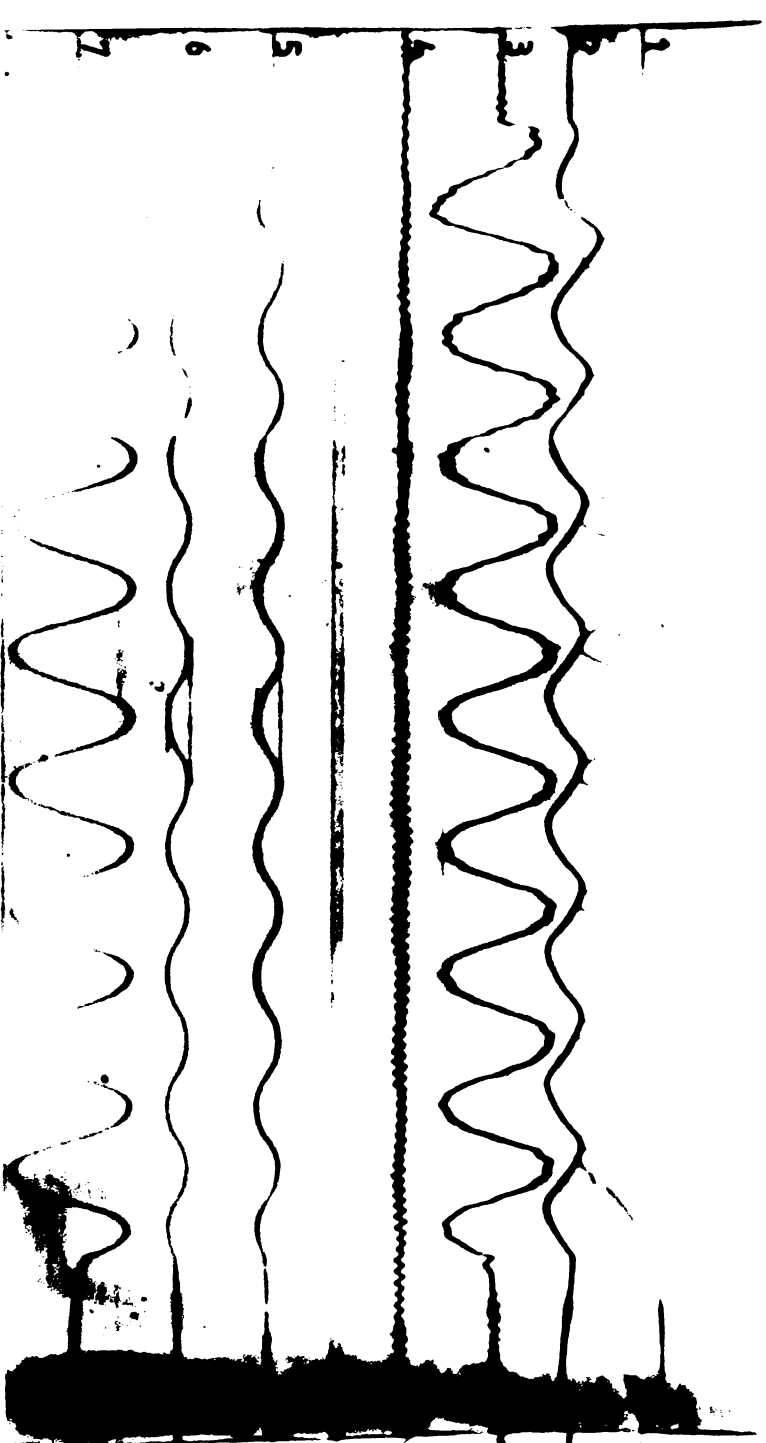
$U_{R_0} = 16840 \text{ V}$

$U_{S_0} = 19060 \text{ V}$

$U_{T_0} = 0$

$I_{T_{RC}}^{(1)pa} = 780 \text{ A}$

$I_{T_{SCPV}}^{(1)pa} = 700 \text{ A}$



Marimi oscilografate în PA. 20 kV Banatul (oscilograf 05-6)

$U_0 = 10350 \text{ V}$

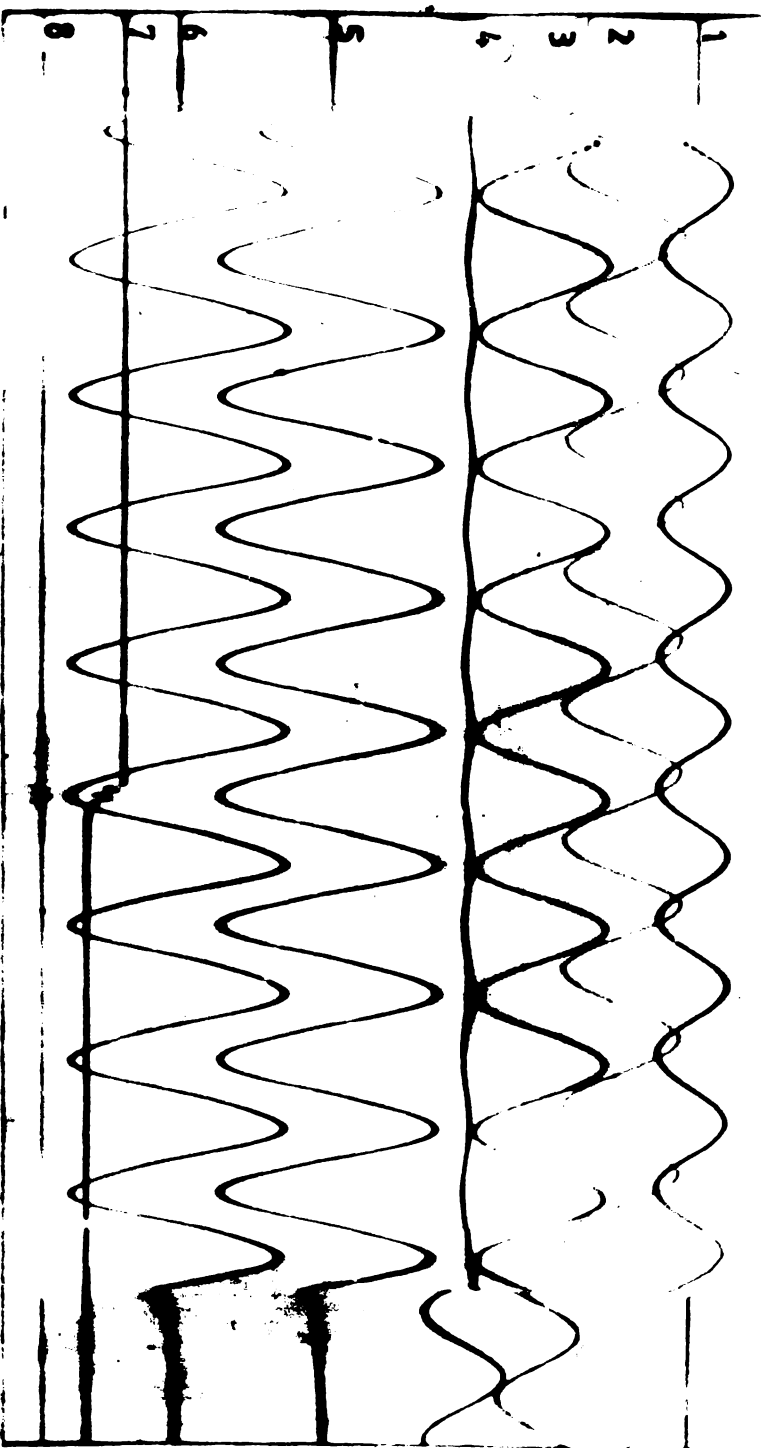
$I_{T_{SCIX}}^{(1)pa} = 9.4 \text{ A}$

$I_{T_{SCQX}}^{(1)pa} = 115 \text{ A}$

$I_{T_{SCPF}}^{(1)pa} = 0$

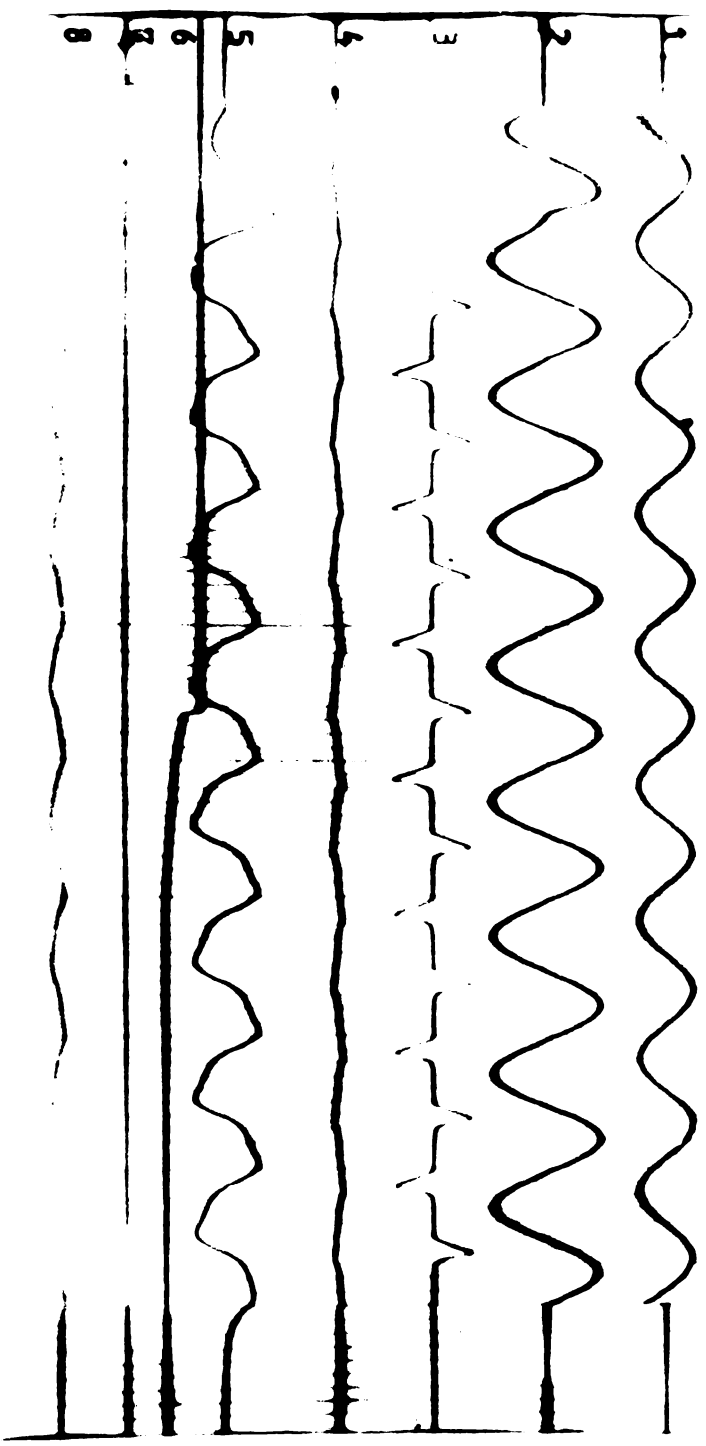
$U_{P_{ex}} = 475 \text{ V}$

Scurtcircuit monofazat în P.A. Banatul faza I- prize experimentată plus învelsurile caburilor linei de alimentare (proba V-1)



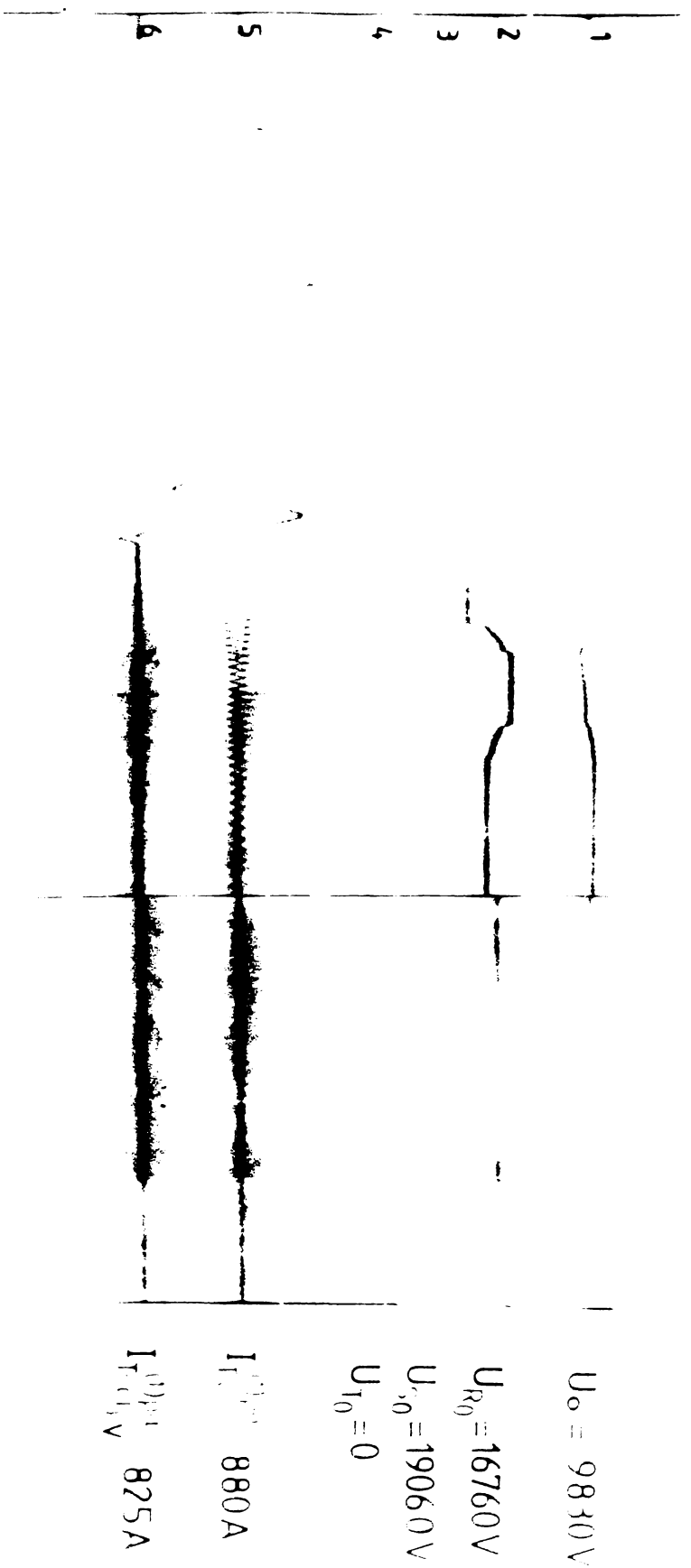
$U_0 = 9888 \text{ V.}$
 $U_{R_0} = 15200 \text{ V}$
 $U_{S_0} = 17280 \text{ V}$
 $U_{T_0} = 880 \text{ V.}$
 $I_{TC}^{(1)PV} = 780 \text{ A.}$
 $I_{Tcdpa}^{(1)PV} = 695 \text{ A.}$

Mărimi oscilografiate în stația 110/20 kV Pitești-Vest pe partea de 20 kV (oscilograful OS-1)

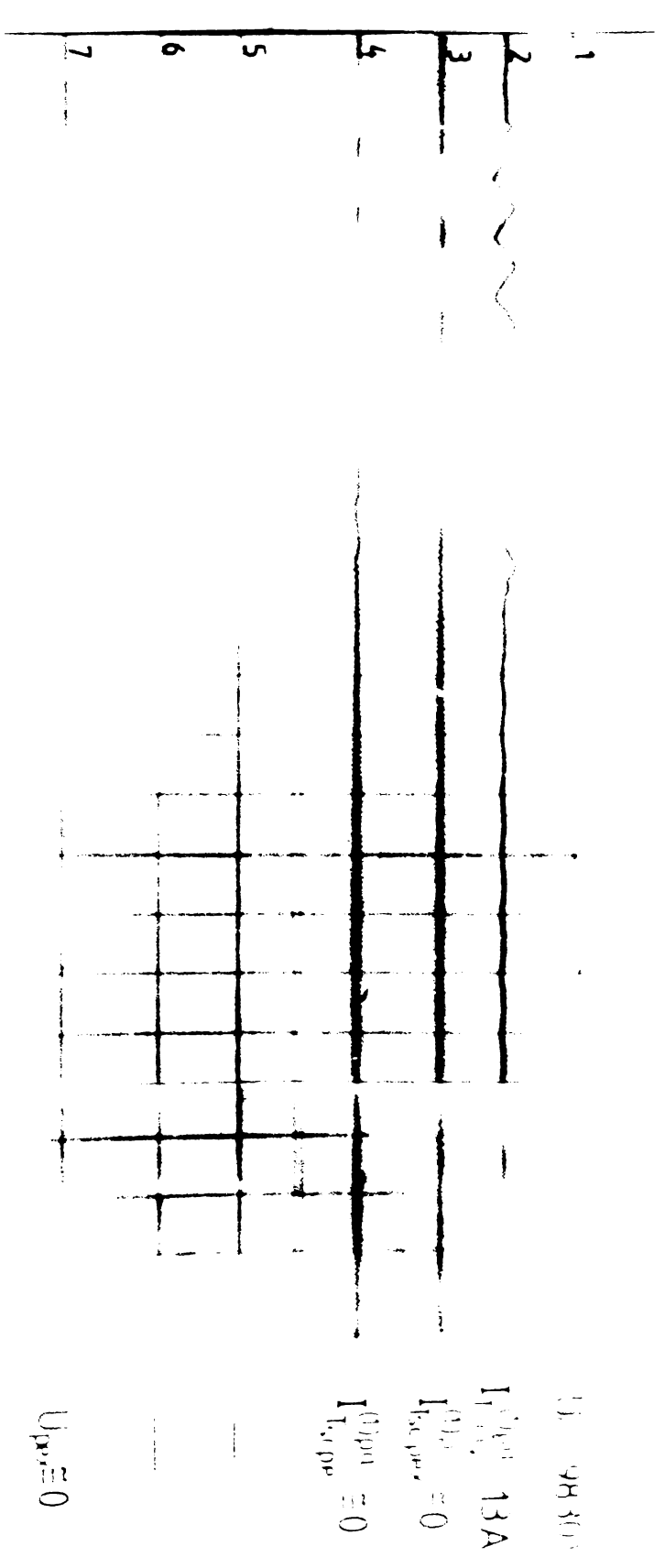


$U_0 = 9870 \text{ V.}$
 $I_{Tcd}^{(1)PV} + I_{Tcd}^{(1)PA} = 796 \text{ A. (prin reconductori)}$
 $I_{CR} + I_{CS} = 3,1 \text{ A.}$
 $I_{TcdPA\text{ sud}}^{(1)PV} = 36 \text{ A.}$
 $I_{TcdPT\text{ exercitiu}}^{(1)PV} = 12 \text{ A.}$

Mărimi oscilografiate în stația 110/20 kV Pitești-Vest pe partea de 20 kV (oscilograful OS-2)

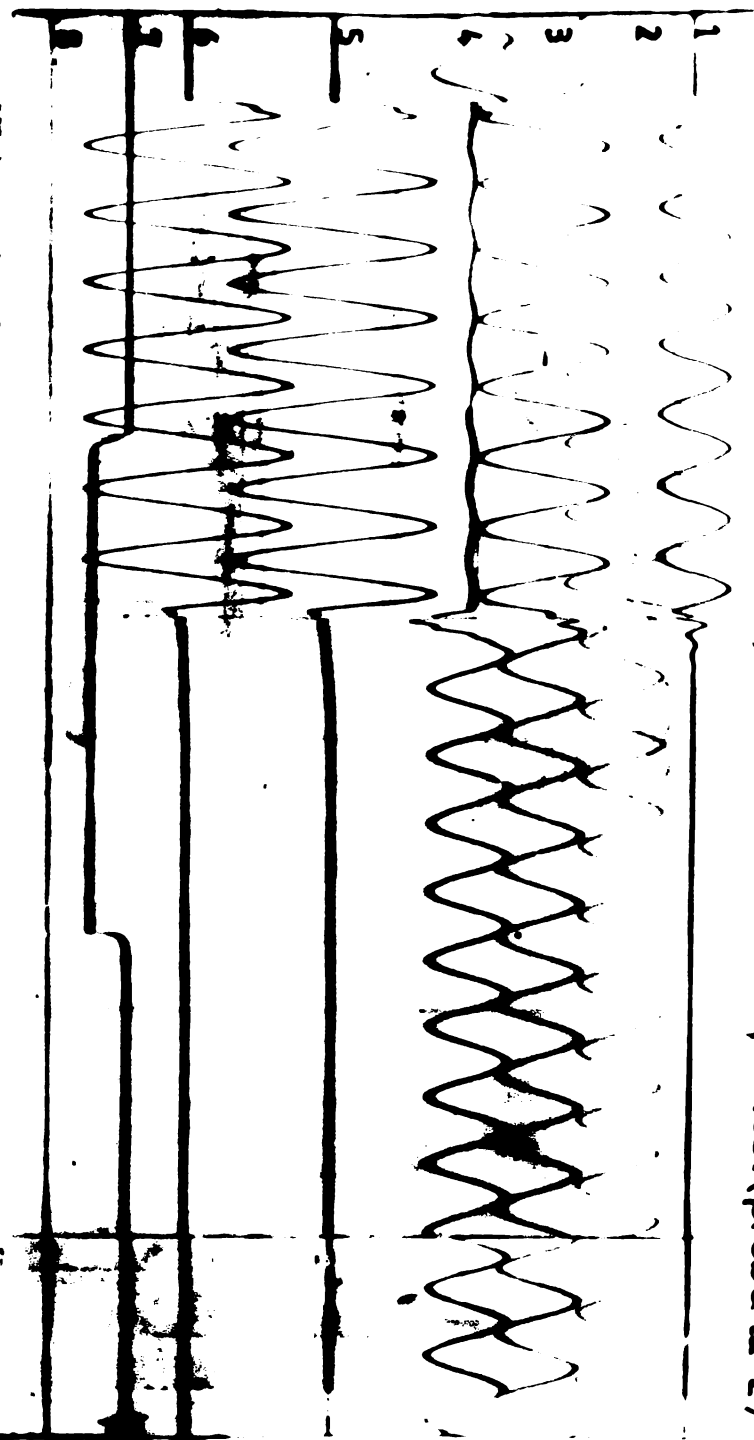


Marimi oscilografate în PA 20k V Bandă (oscilograful OS-3)



Marimi oscilografate în PA 20k V Bandă (oscilograful OS-4)

Scurtcircuit monofazat metallic în PA Banatul faza T - Invelsurile metalice de plumb ale cablurilor liniei de alimentare din stafia Pitești - Vest (proba III-2)

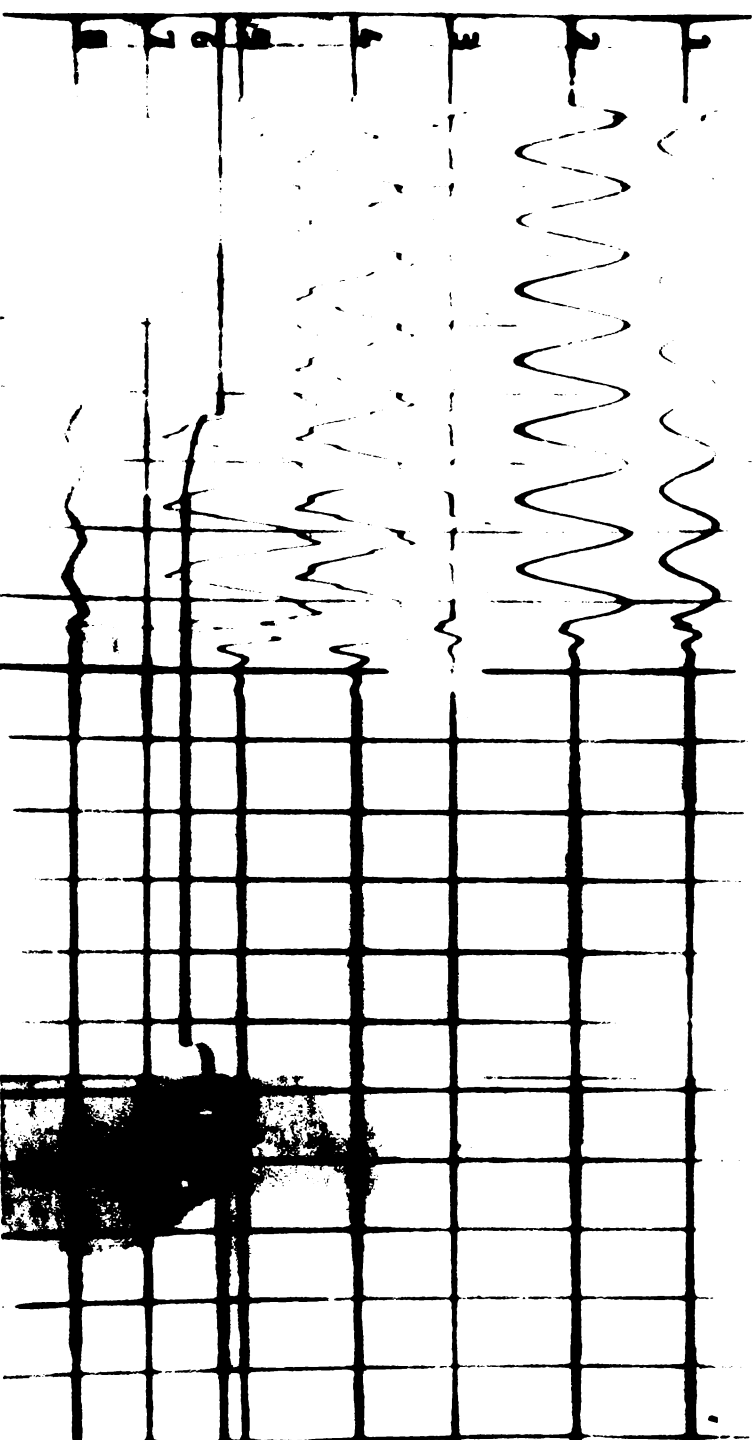


Mărimi oscilografate în stafia Pitești - Vest pe partea de 20 kV (oscilograful OS-1)

$U_0 = 9680 \text{ V}$
 $U_{R0} = 15300 \text{ V}$
 $U_{S0} = 17200 \text{ V}$
 $U_{T0} = 880 \text{ V}$

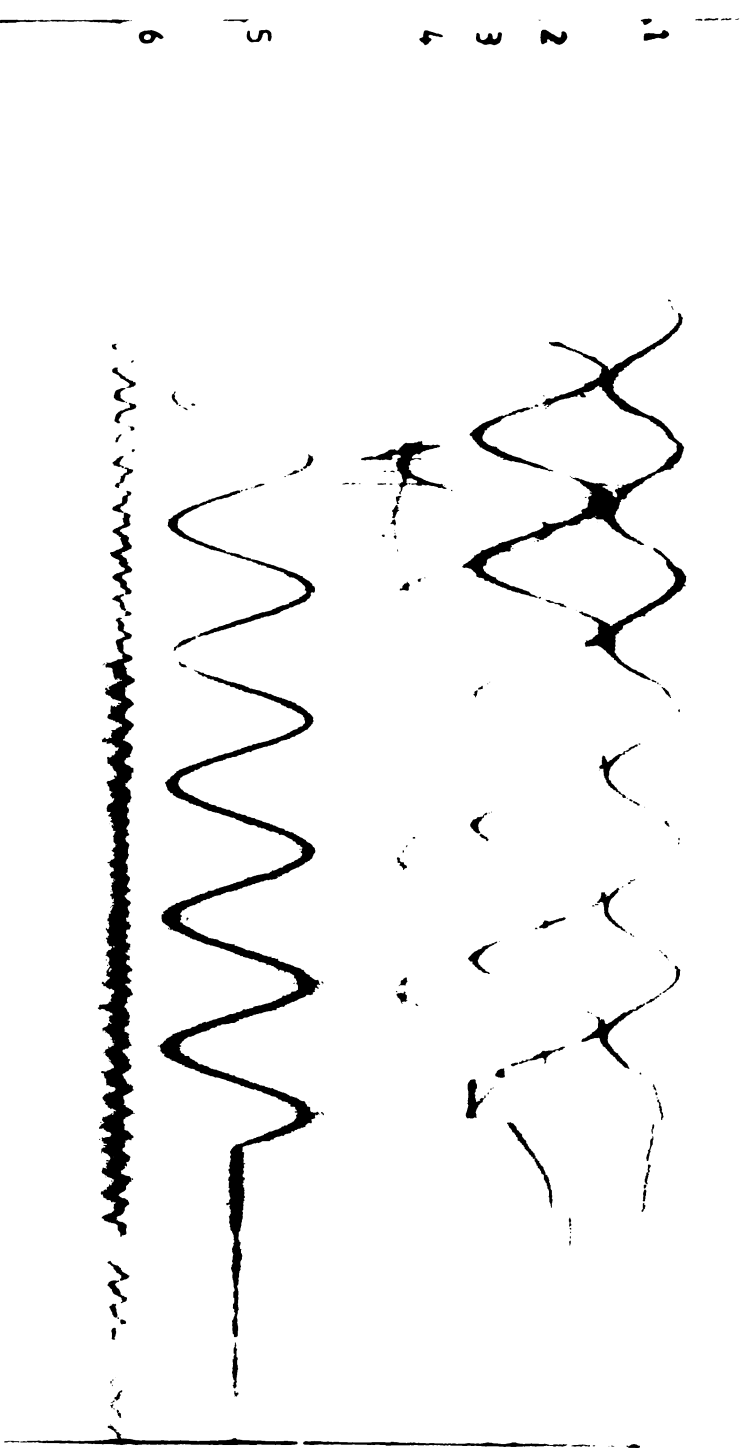
$I_{Tsc}^{(1)PV} = 886 \text{ A}$

$I_{Tscipa}^{(1)PV} = 815 \text{ A}$



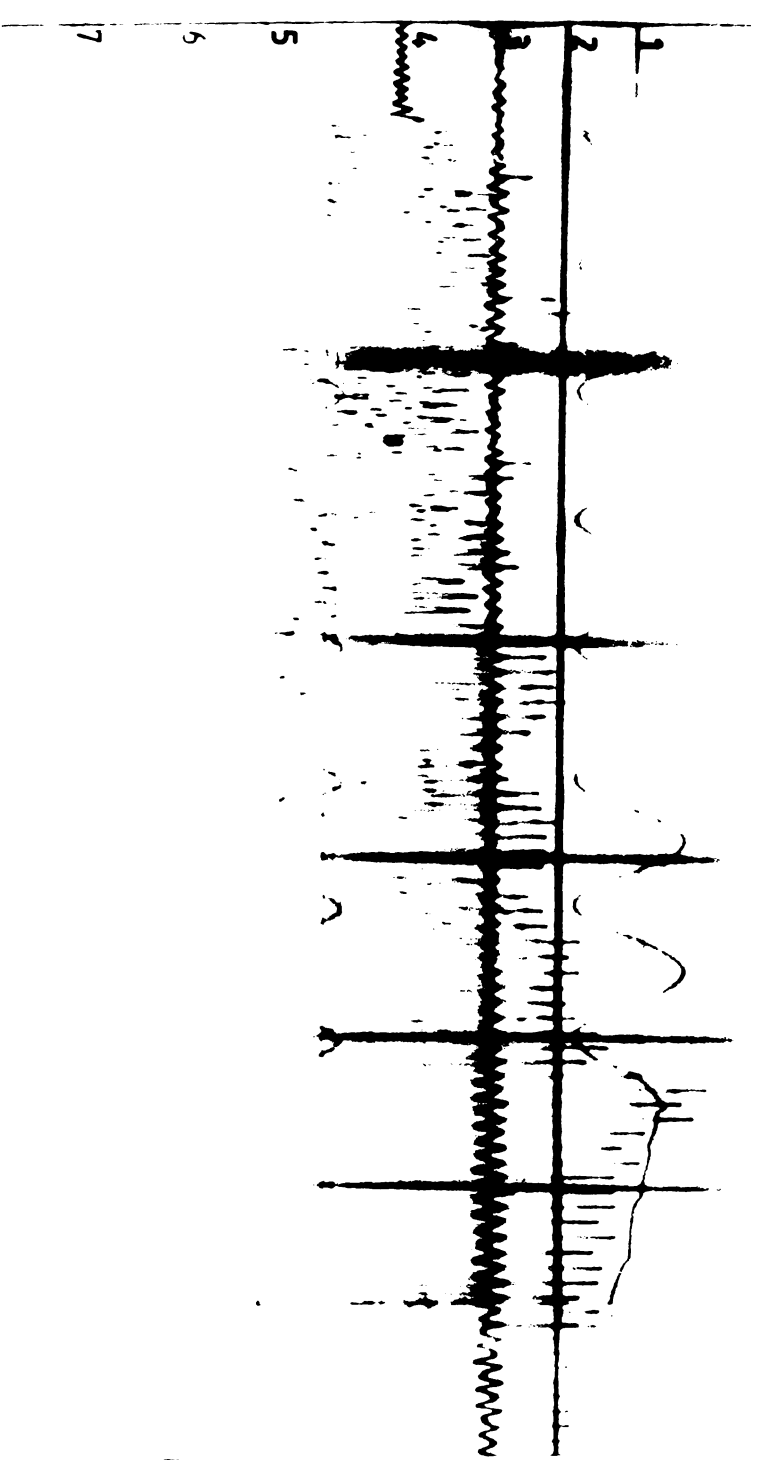
Mărimi oscilografate în stafia Pitești - Vest pe partea de 20 kV (oscilograful OS-2)

$U_0 = 9685 \text{ V}$
 $|I_{Tsci}^{(1)PV} + I_{Tscip}^{(1)pa}| = 900 \text{ A}$
 $I_{Tsci}^{(1)PV} + I_{Tscip}^{(1)pa}$ neconcluzant
 $I_{CR} + I_{CS} |_{PASud}$ neconcluzant
 $I_{Tsci}^{(1)PV} = 44,9 \text{ A}$
 $I_{Tscip}^{(1)PV} = 10,59 \text{ A}$



Mărimi oscilografiate în P.A. Banatul (oscilografuŃ 05-3)

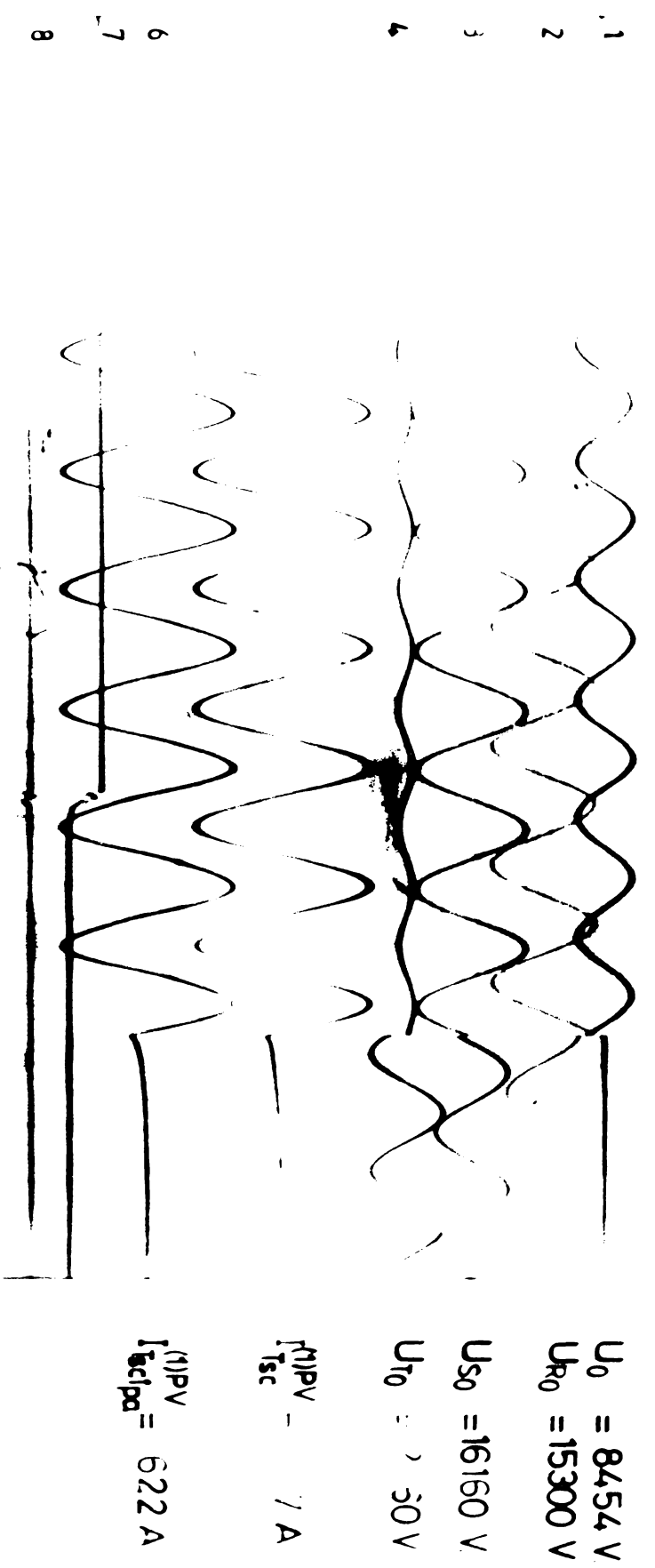
$U_0 = 9613 \text{ V.}$
 $U_{R_0} = 16740 \text{ V.}$
 $U_{S_0} = 17940 \text{ V.}$
 $U_{T_0} = 1640 \text{ V.}$
 $I_{T_{sc}}^{(1)pa} = 706 \text{ A.}$
 $I_{T_{sc}pv}^{(1)pa} \cong 0$



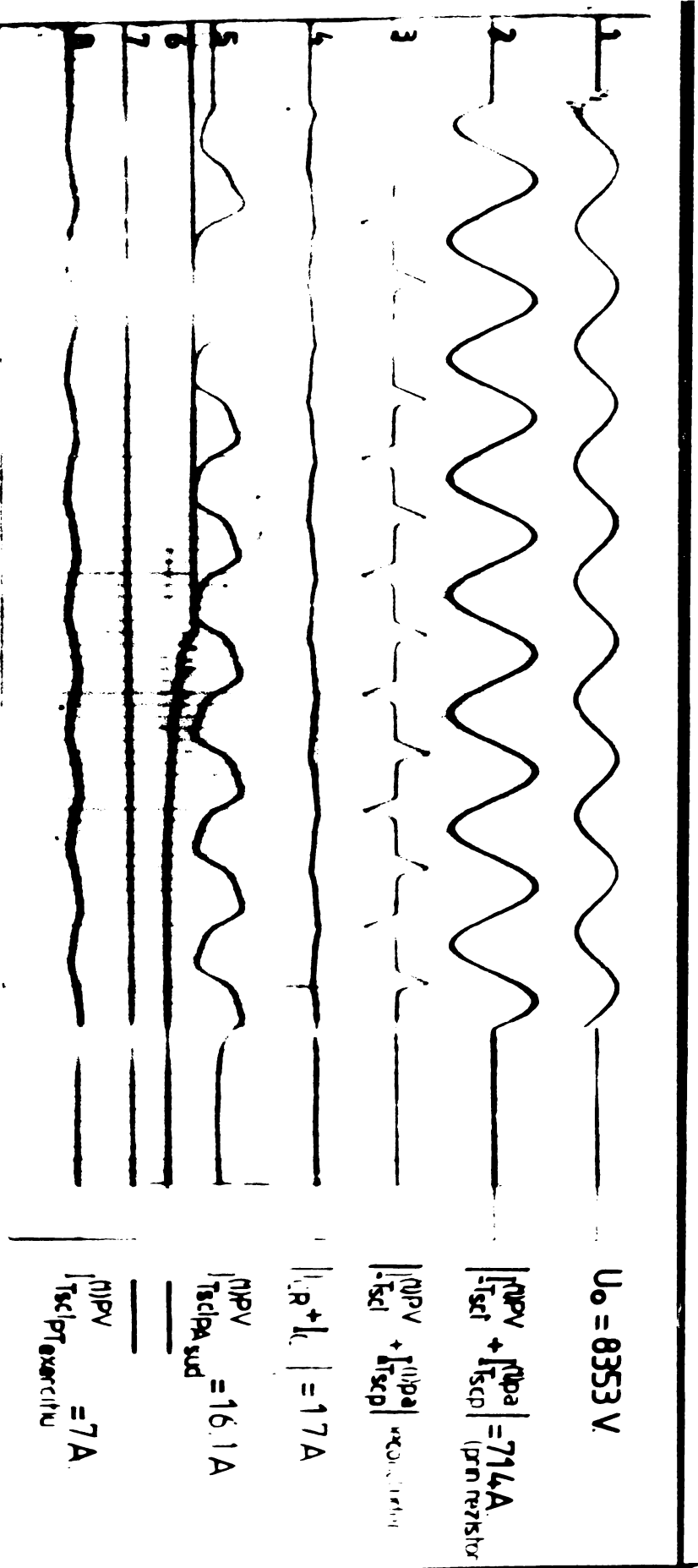
Mărimi oscilografiate în P.A. Banatul (oscilografuŃ 05-4)

$U_0 = 9685 \text{ V.}$
 $I_{T_{sc}ix}^{(1)pa} \cong 0$
 $I_{T_{sc}pex}^{(1)pa}$ neconcludent
 $I_{T_{sc}pex}^{(1)pa}$ neconcludent
 $I_{T_{sc}pex}^{(1)pa}$ neconcludent
 $U_{p_{ex}} = 638 \text{ V}$

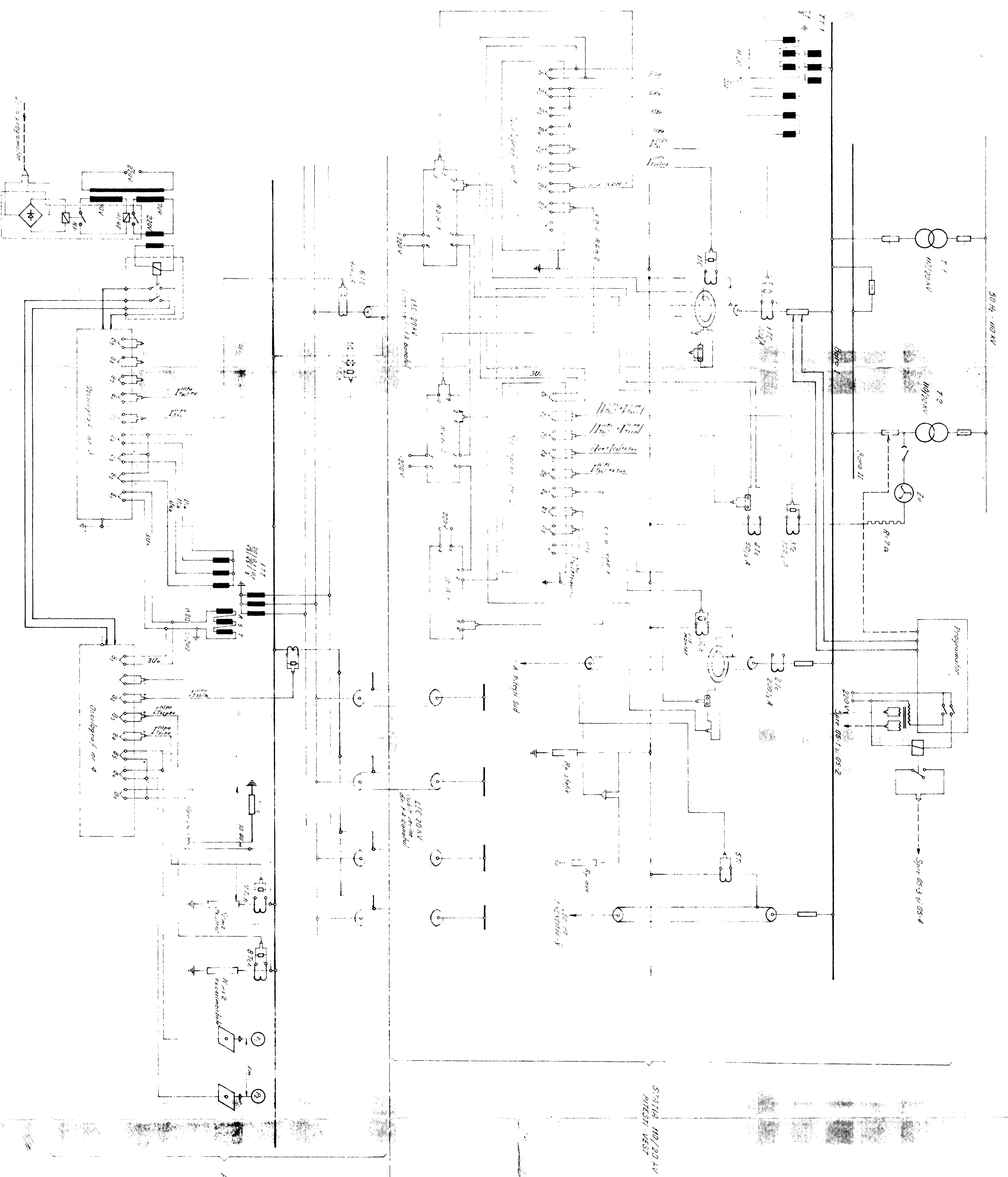
Scurtcircuit monofazat metalic în PA Banatul faza T-priza experimentală (proba XI-1)



Mărimi oscilografiate în stația 110/20 kV Pitești-Vest pe partea de 20 kV (oscilografu OS-1)



Mărimi oscilografiate în stația 110/20 kV Pitești-Vest pe partea de 20 kV (oscilografu OS-2)

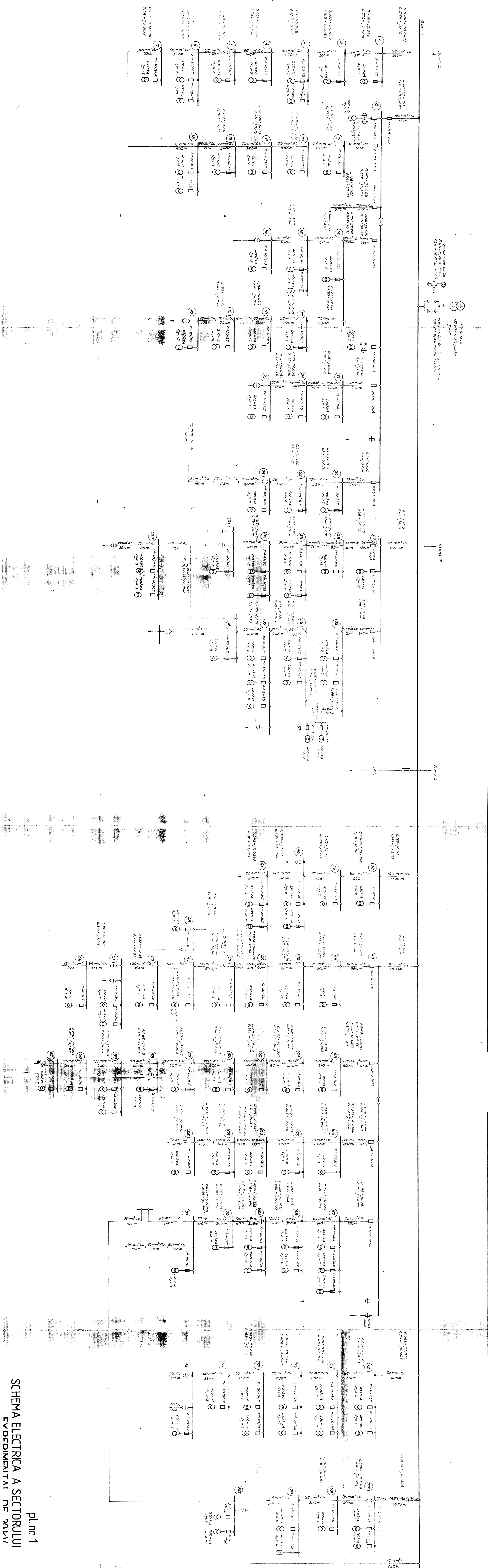


LEGENDA

NRORU - Elementele instalatelor în care se face
 poate înlocuiți grupurile și înlocuiți
 ALIASIOR - Grupurile instalatelor care se înlocuiesc
 9020V - Grupurile, grupurile și impulsion
 programator

PLANȘA Nr. 2

**SCHEMA ELECTRICA A STANȚEI DE 110/20kV
 - MONTAREA OSCILOGRAFELOR -**



PL. nr 1
 SCHEMA ELECTRICA A SECTORULUI
 EVDIMENTALAI NF 20LV