

INSTITUTUL POLITEHNIC "TRAIAN VUIA" TIMIȘOARA
FACULTATEA DE ELECTROTEHNICA

Ing. Miron Laurențiu Gola

CERCETARI
TEORETICE SI EXPERIMENTALE
ASUPRA PRIZELOR DE PAMINT CU REFERIRE SPECIALA LA
PRIZELE DE PAMINT NATURALE

TEZĂ DE DOCTORAT

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

CONDUCATOR ȘTIINȚIFIC
Prof. dr. ing. CONSTANTIN SORA

- 1974 -

278.055
264 H

C U P R I N S

1. INTRODUCERE
 - 1.1. Generalități. Scopul lucrării
 - 1.2. Terminologie. Definiții
 - 1.2.1. Instalații de legare la pământ
 - 1.2.2. Tensiuni accidentale
 - 1.2.3. Rețele și instalații
2. PROBLEMELE GENERALE ALE CALCULULUI PRIZELOR
 - 2.1. Elemente de bază
 - 2.1.1. Considerații tehnico-economice
 - 2.1.2. Studiul cimpului din sol
 - 2.1.3. Soluțiile ecuației lui Laplace în solul cu stratificare
 - 2.2. Sondarea geoelectrică a solului. Parametrii stratului de sol
 - 2.2.1. Metoda geoelectrică (cei patru electrozi)
 - 2.2.2. Metoda electrodului auxiliar
 - 2.2.3. Verificări experimentale
 - 2.2.4. Erorile și limitele metodelor de sondaj
 - 2.3. Stabilitatea termică a prizelor de pământ
 - 2.3.1. Procesul tranzitoriu (adiabatic)
 - 2.3.2. Regimul termic staționar
 - 2.4. Parametrii prizelor la frecvențe înalte
 - 2.4.1. Procese fizice la trecerea curentului în sol
 - 2.4.2. Parametrii liniari ai electrozilor de priză
 - 2.4.3. Variația impedanței prizei în regim de impuls
3. PRIZELE DE PAMINT NATURALE ÎN REȚELE
 - 3.1. Calculul prizelor naturale
 - 3.1.1. Date generale
 - 3.1.2. Prize singulare
 - 3.1.3. Prize complexe
 - 3.2. Coeficienții de impuls și curenții de protecție ai prizelor naturale
 - 3.2.1. Descărcarea electrică în sol
 - 3.2.2. Coeficienții de impuls și curenții de protecție ai LEA
 - 3.3. Utilizarea practică a prizelor de pământ naturale la LEA peste 1 kV.
 - 3.3.1. Stâlpii de înaltă tensiune
 - 3.3.2. Stâlpii de medie tensiune
 - 3.4. Utilizarea prizelor naturale în rețelele de joasă tensiune
 - 3.4.1. Generalități
 - 3.4.2. Tensiunea pe nul în caz de defect
 - 3.4.3. Probe pe model și "in situ"
 - 3.5. Utilizarea prizelor naturale în stații și posturi
 - 3.5.1. Generalități
 - 3.5.2. Analiza diferitelor cazuri practice
 - 3.5.3. Probe în sistem
4. STUDIUL PE MODEL AL PRIZELOR DE PAMINT
 - 4.1. Generalități. Baia electrolytică
 - 4.2. Rezultate experimentale
 - 4.3. Modelarea în sol neomogen
 - 4.4. Rezistențele de dispersie și distribuția potențialului la prizele naturale
5. METODE ȘI APARATE UTILIZATE LA MĂSURAREA INSTALAȚIILOR DE LEGARE LA PAMINT
 - 5.1. Măsurarea parametrilor prizelor
 - 5.1.1. Generalități
 - 5.1.2. Practica măsurărilor
 - 5.1.3. Deficiențele metodelor actuale de măsurare
 - 5.2. Metodă și aparat propriu pentru măsurarea prizelor
 - 5.2.1. Metodă de măsurare
 - 5.2.2. Aparatul propriu
 - 5.2.3. Rezultate experimentale
 - 5.3. Termometru cu termistor
6. CONCLUZII GENERALE

CUVINT INAINTE

Doresc ca lucrarea de față să fie un modest omagiu adresat de subsemnatul dascălilor și profesorilor mei T.GROZESCU (L.B.Arad), P.ANDRONESCU, T.SĂLĂGEAN, E.POP (I.P.Timișoara) și în special prof. C.ȘORA ale cărui indicații mi-au fost de un deosebit ajutor.

Tin de asemenea, să aduc pe această cale mulțumiri colegilor de serviciu de la IRME care mi-au urmărit cu interes lucrările și au participat la realizarea practică a propunerilor mele cît și la experimentările făcute în Sistemul energetic național, uneori în condiții dificile.

Miron Laurențiu GOIA

1. INTRODUCERE

1.1. GENERALITĂȚI. SCOPUL LUCRĂRII

Dezvoltarea impetuoasă a consumului de energie electrică este legată de creșterea în ritm accelerat a instalațiilor electrice de producere, transport și distribuție a energiei. O parte importantă a acestora o constituie instalațiile de legare la pământ.

Acestea pot avea rol de protecție împotriva accidentelor de natură electrică (prin atingere indirectă) dar pot fi utilizate și în scopuri tehnologice - constituind elemente ale circuitelor de lucru. În primul caz se vorbește despre instalații de legare la pământ de protecție iar în al doilea caz de instalații de legare la pământ de exploatare. De cele mai multe ori însă, instalațiile de legare la pământ sînt folosite în comun, pentru ambele scopuri.

Creșterea masivă a puterilor instalate în centralele și stațiile electrice de transformare cît și sporirea gradului de interconexiune a acestora în cadrul sistemului energetic național, impun condiții mai severe de funcționare a instalațiilor de legare la pământ. În concret evoluțiile menționate conduc la majorarea secțiunilor transversale a electrozilor instalațiilor de legare la pământ, a suprafeței de teren ocupate de acestea, a numărului de instalații necesare etc., într-un cuvînt la sporirea deosebită a consumului de material feros utilizat la construcția inscalațiilor de legare la pământ și deci la reîngroparea fierului în pământ din interiorul cărui s-a scos cu atîta dificultate.

Aceste elemente au condus la intensificarea cercetărilor pe plan mondial în domeniile legate de trecerea curenților prin sol, de efectele periculoase ale curenților asupra omului, de perfecționarea și dezvoltarea mijloacelor celor mai economice de protecție împotriva accidentelor.

În contextul acestei analize generale se încadrează și preocupările autorului care, pe parcursul ultimilor ani în care a funcționat ca cercetător în cadrul IRME-MEE s-a preocupat de rezolvarea problemelor ridicate de dezvoltarea instalațiilor de legare la pământ în sistemul energetic din R.S.R., cu referire specială la inscalațiile de curent alternativ și frecvență industrială.

Partea esențială a instalațiilor de legare la pământ o constituie, după cum se va vedea, prizele de pământ. Acestea pot fi: prize artificiale în cazul cînd elementele lor componente sînt construite special pentru trecerea curenților de lucru sau de defect în sol (se interzice folosirea lor în alte scopuri) sau prize naturale cînd sînt elemente conductive în contact permanent cu pămîntul ale unor construcții sau instalații, destinate diferitelor scopuri, dar care pot fi folosite în același timp pentru trecerea curenților de defect.

Diminuarea consumului de metal și cheltuielilor de construire a prizelor de pământ, deziderat de mare actualitate pentru economia noastră națională, obiectiv principal al studiilor întreprinse a fost urmărit printr-o serie de metode și mijloace diverse dintre care se pot aminti:

- perfecționarea normativelor de protecție împotriva electrocutărilor și a altor accidente de natură electrică;
- perfecționarea metodelor de calcul, a aparatelor, metodelor și utilajelor de investigație a instalațiilor de legare la pământ;
- utilizarea, extinderea și perfecționarea prizelor naturale din instalațiile de legare la pământ.

În prezenta lucrare sînt prezentate unele din rezultatele mai importante obținute de autor în studierea prizelor de pământ din stațiile și liniile sistemului energetic național.

S-au inițiat cercetări aprofundate privind comportarea solului la diferite solicitări de exploatare, pentru stabilirea condițiilor în care prizele de pământ pot funcționa sigur și stabil în timp (stabilitatea termică a prizelor de pământ) și a criteriilor generale de calcul și proiectare a prizelor.

Un alt scop al cercetărilor întreprinse a fost acela de a preciza condițiile de utilizare a prizelor de pământ naturale în rețelele de înaltă tensiune (IT) medie tensiune (MT) și joasă tensiune (JT), efectul economic al aplicării acestora în sistemul energetic precum și alte probleme conexe extinderii prizelor naturale în stații și posturi de transformare.

În cadrul studiilor întreprinse s-au utilizat calculul analitic (calcula-toare cifrice) și măsurările pe modele similare (cuva electrolică) iar verifi-carea rezultatelor obținute s-a realizat în cadrul unor probe complete în sistem (în situ).

Măsurările în sistem s-au executat pe baza unor metodologii în general proprii, confirmate de date din literatură, cu ajutorul unor aparate și utilaje standard dar în special cu ajutorul unor instrumente și dispozitive construite în acest scop de autor.

Lucrarea nu abordează problemele efectului fiziologic al curentului electric asupra omului, considerând acceptabile aprecierile și riscurile de electrocutare stabilite de Dalziel /1.1/ și admise în normativele de protecție împotriva electrocutărilor din țările industriale. De asemenea, nu este evidențiată contribuția autorului la elaborarea și revizuirea normativelor de protecție din țara noastră, STAS 7334-70; STAS 8275-68; STAS 6516-89; STAS 6119-83; STAS 2612-72, /1.2//1.3/ puse în general de acord cu cele mai raționale și moderne prescripții străine.

Nu sînt studiate în lucrare soluțiile de ameliorare a rezistenței prizelor prin diverse metode (ganich-galuri, bentonit), sau cea a oscilațiilor sezoniere ale rezistivității solului /1.4/. Nu sînt abordate de asemenea, nici problema calculului cîmpului electrocinetic în zona instalațiilor de legare la pămînt de mai mare complexitate și nici problemele coroziunii prizelor, deși în toate aceste domenii autorul are contribuții numeroase.

Fondarea principală în preocupările autorului au avut-o prizele naturale ale stîlpilor liniilor electrice aeriene. Dacă înainte, prin termenul de priză naturală se înțelegea electrozii metalici cu alte funcții tehnologice, ce puteau fi folosiți și pentru legarea la pămînt, astăzi, această noțiune a primit un conținut nou, constituit în special de capacitatea obiectului în contact cu solul de a prelua și funcția tehnologică de dispersie a curentului în sol. În principal prizele naturale se utilizează ca prize de protecție. În instalațiile electroenergetice se utilizează cel mai adesea drept prize naturale, următoarele elemente metalice montate în sol:

- fundații armate și stâlpi metalici sau din beton armat;
- conducte metalice pentru transportul fluidelor;
- cablurile de energie electrică cu ranta conductoare (cu sau fără armătură, metalică de protecție);
- stălele cailor ferate neelectrificate;
- cablurile de telecomunicații (t.c.), fir pilot, semnalizare, etc. neintroduse în tuburi de protecție.

În afara beneficiilor economice substanțiale ce le aduc în construcția instalațiilor de legare la pămînt, prin economisirea prizelor artificiale și a volumului de muncă necesar execuției acestora, prizele naturale mai oferă următoarele avantaje:

- durată de viață practic nelimitată și în orice caz egală cu cea a instalațiilor ce trebuia protejate
- valori mici a rezistenței de dispersie
- capacitate termică importantă la trecerea curenților în sol
- rezistență sporită la coroziune
- rezistență mecanică deosebit de bună și siguranță ridicată în exploatare.

Fără de prizele artificiale construite în instalații, cele naturale au o fiabilitate mult superioară și extinderea lor asigură dezideratul reducerii consumului de fier în energetică.

Întrebuințarea practică a prizelor naturale în instalațiile de legare la pămînt este legată de verificarea condițiilor impuse în general în norme prizelor de pămînt, implicînd în mod obligatoriu rezolvarea următoarelor probleme principale:

- calculul prizelor de pămînt naturale
- aplicarea lor în diferite rețele și situații
- controlul și verificarea lor în exploatare.

Realizarea desideratelor menționate a implicat, evident perfecționări ale metodelor de calcul cunoscute, utilizarea pe scară largă a calculatoarelor electrice cifrice și a celor analogice (modelarea) precum și numeroase cercetări experimentale.

În concluzie și în esență, scopul urmărit în prezenta lucrare este acela de a contribui la realizarea în sistemul nostru energetic a unor prize de pămînt sigure, stabile termic, de mare eficiență și durată, realizabile în condiții economice cît mai avantajoase și cu un consum de metal cît mai redus.

1.2. TERMINOLOGIE. DEFINIȚII.

1.2.1. Instalații de legare la pămînt.

Legările la pămînt cu scopuri tehnologice (de exploatare) sau de protecție (pentru diminuarea tensiunilor accidentale) se realizează prin intermediul instalațiilor de legare la pămînt. Acestea sînt constituite de ansamblul de conductoare și electrozi prin care realizează legătura cu pămîntul /STAS 8275-68/. O instalație de legare la pămînt (fig.1.1.) se compune din /STAS 8275-80/:

$$K_{PAS} = \frac{U_{PAS}}{U_p}$$

Tensiunea de pas U_{PAS} este partea din tensiunea unei instalații de legătură la pământ U_p , la care este supus omul cînd atinge două puncte de pe sol (parado-seală) aflate la o distanță $S_{BC} = S_B - S_C = p = 0,8$ m între ele. În apropierea prizei (La măsurări se adoptă $S_{AB} = 0,1 = 0,1$ m).

Coefficientul de pas K_{PAS} este numărul arbitrar, adimensional, egal cu raportul între tensiunea de pas U_{PAS} și tensiunea prizei U_p .

$$K_{PAS} = \frac{U_{PAS}}{U_p}$$

Tensiunea raportată corespunde unui punct S; definită de autor este raportul arbitrar, adimensional, dintre tensiunea corespunzătoare unui punct de pe sol la distanța s de coborîrea la priză U_p sau U_s și tensiunea prizei U_p .

$$K_s = \frac{U_s}{U_p}; K_x = \frac{U_x}{U_p}$$

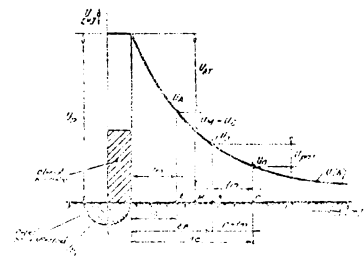


Fig. 1.2. Tensiunea de defect în prizele de pământ

În Normativele românești actuale de protecție împotriva electrocutărilor sînt prevăzute condițiile de creștere să le îndeplinească prizele de pământ de protecție.

Tendința desprinsă chiar din reglementările respective, la a săror alăturare a colaborat și autorul /STAS-urile 2034-70; 6119-69; 5119-68/ cu Realitel și din reglementările analogice din țări industriale avansate este trecerea de la tradiționala normare a "rezistenței de dispersie", la impunerea unor condiții de atingere și de pas admise, asigurîndu-se stabilitatea condițiilor prizei în condiții de defect. Această schimbare de optică reflectă mai real caracterul obiectiv al pericolului de accidentare prin atingere indirectă în instalații.

Tensiunile de atingere și de pas admise în normele românești sînt:

- Pentru stîlpii fără aparataj ai liniilor electrice externe (LEA) din zone cu circulație frecventă (noțiune ce se va defini în 1.2.3.);
- la joasă tensiune (J.T) 65 V, defectul trebuie eliminat în maximum 3 sec.
- la rețele izolate față de pămînt de medie tensiune (M.T) 125 V, cu condiția sensibilizării simplei puneri la pămînt, a declanșării dublei puneri la pămînt și a utilizării izolatorilor nestrăpungibili.
- la rețele cu neutrul legat la pămînt (MT sau înaltă tensiune IT) 250 V, (125 V în incinte industriale) cu condiția utilizării izolatorilor nestrăpungibili.

- La stîlpii din zone cu circulație redusă (definită în 1.2.3.) U_{AT} și U_{PAS}

nu se normează. În aceste zone condițiile ce se impun prizele sînt cele tehnice și în plus, cele legate de asigurarea unei căi calvarice sigure și stabile în timp pentru curenții de defect.

Curenții și simțul de calcul pentru calculul prizei:

- la J.T. - curenții de scurtcircuit monofazat; timpul sub 3 s.
- la M.T izolate față de pămînt - curenții de punere simplă la pămînt (la rețele compensate la A); simțul infinit. Pentru verificarea stabilității termice (adică a capacității prizei) se a supraea vizinului termic din cazul defectului se mai ia în considerare și dubla punere la pămînt, deconectata de protecție de bază.
- la IT și M.T cu neutrul legat la pămînt - curenții de scurtcircuit monofazat; timpul protecției de bază pentru tensiuni și cel al protecției de rezervă pentru stabilitatea termică.

Trebuie deci reținut că în Normativele MSR de protecție împotriva accidentelor prin atingere indirectă se acceptă, în concordanță cu modele din Normativele țărilor avansate, anumite riscuri de accidentare, evident reduse.

Se acceptă de asemenea, riscul deteriorării eventuale a prizei prin pierderea stabilității termice în cazul punerii la pămînt duble, nedecorate de protecție (cazuri extrem de rare în rețelele din MSR).

1.2.3. Rețele și instalații./STAS 7334-70: 8275-68/

Rețeaua electrică este ansamblul de conductori legați conductiv între ei. Rețeaua legată la pământ este cea care în regimul normal de funcționare are cel puțin un punct ce face parte din circuitele curenților de lucru, legat direct sau printr-o rezistență neglijeabilă la pământ. Rețeaua izolată față de pământ este aceea care în regim normal de funcționare, are toate punctele ce fac parte din circuitele curenților de lucru, izolate față de pământ. În această categorie intră și rețelele legate la pământ prin una sau mai multe bobine de compensare.

Echipamentele din zona cu circulație redusă sunt instalate în zonele din incinte îngrădite, în care are acces personalul de serviciu special instruit, posturile de transformare și stâlpii LTA aflate la o distanță mai mare de 15 m de marginea drumurilor, șoselelor sau îngrădirilor locuințelor.

Echipamentele din zona cu circulație frecventă sînt cele care nu se găsesc în incinte îngrădite și care se află la o distanță pînă la 15 m inclusiv de la marginea drumurilor, șoselelor sau îngrădirilor locuințelor și instalațiile nefîngrădite din incinte industriale sau agricole. Punerea la pământ (la masă) este contactul accidental (direct sau prin arc) a unui aparat din circuitul de lucru cu pământul (masă) sau cu corpuri conductive în contact cu pământul.

Legarea la pământ este racordarea unui element conductiv la o instalație de legare la pământ.

Restul instalațiilor ce se vor utiliza vor fi definite în alt.

În afara considerenților de siguranță a muncii în instalații, prizele de pământ trebuie să asigure și realizarea unor deziderate de ordin tehnologic, legate de funcționarea sigură a rețelelor. Se poate face în acest sens referire la cerințele de preîncălzire a consumărilor inverse a izolației la lovituri directe de trăsnet în suportii liniilor seriene de L.T. Din cauza tensiunii de ținere la izolație reduse a izolației de medie tensiune (max. 125 kV max. la $U_n = 20$ kV) această condiție nu poate fi realizată de prizele de medie tensiune decât cu cheltuieli excesive, ceea ce face ca ea să nu fie obligatorie în aceste rețele.

Bibliografie CAP.1.

- /1.1./ DALZIEL, C. Reevaluation of lethal electric currents. I.E.E.E. Trans. I.C.A.-77 nr.5, sept-oct 1968
- /1.2./ SUPRIM, M. Instrucțiuni pentru proiectarea și execuția instalațiilor de legare la pământ. București. CDE. 1972 PE-121.
- /1.3./ GOIA, L. Instrucțiuni pentru exploatarea și întreținerea instalațiilor de legare la pământ. IRNE. SCR - 1970. CRE-I-23.
- /1.4./ GOIA, L. Îmbunătățirea rezistenței prizelor de pământ cu ajutorul bentonitelor. In: Producerea, transportul și distribuția energiei electrice și termice. V.2, nr.4, tr.IV.1969, p.86-90.

2. PROBLEME GENERALE ALE CALCULULUI PRIZELOR DE PĂMÎNT

2.1. ELEMENTE DE BAZĂ

2.1.1. Considerații tehnico-economice

Calculul prizelor de pământ se referă obișnuit la următoarele elemente și aspecte:

- determinarea rezistenței de dispersie a prizei la solicitările ei de exploatare (I_0 și impuls de curent)

- tensiunile de atingere și de pas în zona prizei

- condițiile admise privind solicitările termice ale prizei de pământ.

În primele etape, în studiul curenților din sol s-au adoptat o serie de ipoteze simplificatoare, dovedite ulterior în multe situații departe de realitate. Dintre simplificările acceptate se pot menționa cele referitoare la omogenitatea și izotropia solului, la independența caracteristicilor electrice și termice ale solului de curent și timp, la constanța valorii efective a densității curenților electric într-un anumit punct din sol.

Simplificările menționate țin de domeniul unui anumit nivel al dezvoltării metodelor de investigație științifică și al evoluției mijloacelor de calcul, corespunzând unei anumite precizii dobândite în cunoașterea realității.

Actualmente, în urma cercetărilor lui Ollendorf și Koch continuata de Margolin și mai recent de Burgdorf, Ebin, Jacobs, Endreyai, Lascenz, Oslen, Brandolini, Bature, Pășcu, Reabrova și Veronina, Arakelian, Thapar etc. /2.1/... /2.19/, se pot considera rezolvate - principal - problemele generale principale - ale calculului prizelor de pământ în sol omogen și neomogen, de structuri diferite și naturi diverse.

După opinia autorului, fondul chestiunii s-a transferat din domeniul tehnic în cel economic.

Afirmarea aceasta este motivată în cele ce urmează și ea este justificată și de propunerii recente a lui Jacobs /2.20/ de a se utiliza calculul numeric în dimensionarea și proiectarea optimă a instalațiilor de legare la pământ în sol neomogen.

În principiu, în etapa actuală problemele calculului prizelor de pământ se pot rezolva dacă se cunosc aprioric următoarele elemente:

- structura solului.

- precizia dorită (tehnică) de calcul

- parametrii geometrici și electrice ai diverselor structuri din sol

Existând posibilități de simplificări acceptabile și verificate ale fenomenelor, în concordanță cu experiența practică, chiar problemele relativ complexe se pot rezolva pe calculator.

Timpul de lucru al calculatorului este influențat în special de precizia impusă calculului și de structura solului în locul considerat. În această situație, ridicarea preciziei calculului în special în cazul structurilor complicate de sol, este legată de cheltuieli considerabile de timp și fonduri materiale consumate pe calculator.

Rezolvarea optimă a problemelor nu se poate face clivind acest aspect. În general execuția practică a prizelor de pământ obișnuite nu consumă fonduri materiale deosebite și prețul a 10 minute de rulaj la calculator de capacitate medie (circa 500) lei este de același ordin de mărime cu costul de realizare a unei prize de pământ a unui stilp de înaltă tensiune în zonă locuind, în sol cu proprietăți medii (rezistivitate medie 100Ω.m). Evident că economiile ce s-ar putea obține la un calcul exact devin comparabile cu costul efectiv al calculului (1-2 minute).

Calculul prizelor de pământ trebuie considerat, după opinia autorului o problemă de analiză operațională (domeniu cu o dezvoltare deosebit de dinamică în ultimul timp), alegându-se din multitudinea de soluții aceea la care costul total al proiectării și execuției este minim.

În această situație, eficacitatea practică a perfecționării calculului prizelor nu este în toate cazurile semnificativă și evident importanța unui calcul foarte exact scade.

Un argument suplimentar în favoarea acestei afirmații provine din considerarea dificultăților obiective a măsurărilor practice în condiții de teren a prizelor de pământ. Erorile relative de măsurare depind de o serie de factori aleatorii, rezistivitatea solului variază în timp și chiar măsurările efectuate cu deosebită grijă, dau zori destul de importante ce depășesc clasele de precizie a aparatelor de măsură. În acest context, utilitatea unor perfecționări în domeniul calculului prizelor nu trebuie desprinsă din contextul economicității generale.

Din acest punct de vedere, în toate cazurile, în lucrarea de față precizia calculului s-a extins numai atât cât s-a justificat prin natura problemelor puse.

2.1.2. Studiul cîmpului din sol

Studiul cîmpului din sol se poate uşura mult dacă se utilizează analogia simplă ce există între cîmpul electrostatic şi electrocinetic.

Mărimile analoge din cele două cîmpuri sînt după cum se ştie:

$$V \rightleftharpoons \bar{V}; \quad \bar{D} \rightleftharpoons \bar{J}; \quad Q \rightleftharpoons i; \quad E \rightleftharpoons \bar{G}; \quad C \rightleftharpoons \frac{1}{R} \quad (C \rightleftharpoons G)$$

Cîmpul electric al curenţilor din solul omogen este un cîmp laplaccian.

Intr-un punct din sol, forma locală a legii conservării sarcinii electrice este (cu notaţiile cunoscute)

$$\operatorname{div} \bar{j} + \frac{\partial \bar{\rho}_v}{\partial t} = 0 \quad (2.1)$$

Care se poate scrie şi sub forma $\operatorname{div} \left\{ j + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \right\} = 0$. În regim staţionar sau cvasistaţionar ($\frac{\partial \bar{D}}{\partial t} = 0$) se obţine

$$\operatorname{div} j = \nabla \cdot (\bar{\sigma} \bar{E}) = \bar{\sigma} \nabla \cdot E + \bar{E} \nabla \cdot \bar{\sigma} = 0 \quad (2.2)$$

Dacă mediul este omogen ($\nabla \bar{\sigma} = 0$) şi ţinînd seama de faptul că $E = -\nabla V$ (cîmp potenţial) rezultă $\operatorname{div} \bar{j} = -\bar{\sigma} \nabla^2 V = 0$, respectiv

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (2.2.a)$$

reprezentînd ecuaţia lui Laplace în coordonate carteziene.

În coordonate cilindrice $(r, \varphi, z, 0)$ se obţine (2.2.b)

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (2.2.b)$$

Rezolvarea ecuaţiei lui Laplace în cazurile practice necesită precizarea condiţiilor de limită la suprafeţele de separaţie între mediile diferite din domeniu şi a condiţiilor pe frontiera domeniului considerat. În mod general acestea sînt:

- la infinit j şi V sînt nule; pe suprafaţa electrozilor metalici de priză $V = ct$

- potenţialele pe feţele suprafeţei de separaţie între mediile 1 şi 2 sînt egale $V_1 = V_2$;

- componentele tangenţiale ale cîmpului electric E sînt aceleaşi în ambele medii;

- componenta normală a densităţii curenţilor de conducţie se conservă:

$$j_{n_1} = j_{n_2}, \text{ respectiv } \bar{\sigma}_1 \frac{\partial V_1}{\partial n_1} = \bar{\sigma}_2 \frac{\partial V_2}{\partial n_2} \text{ sau } \frac{1}{\bar{\sigma}_1} \frac{\partial V}{\partial n_1} = \frac{1}{\bar{\sigma}_2} \frac{\partial V}{\partial n_2}$$

Ecuaţia Laplace se poate rezolva pentru cîteva cazuri şi configuraţii practice de instalaţii de legare la pămînt din mediul omogen şi izotrop, semispaţiul omogen, limitat de suprafaţa solului şi de asemenea şi pentru:

- mediu şi semispaţiu formate din straturi omogene orizontale şi verticale

- mediu general anizotrop, semispaţiu anizotrop

- semispaţiu conductor compus din medii cu frontiere înclinate.

2.1.3. Soluţiile ecuaţiei lui Laplace în cazul solului cu stratificări.

În cazul straturilor, orizontale, departajate prin suprafeţe plane în cazul unei surse punctiforme (fig. 2.1) ecuaţia lui Laplace devine (2.2.c) după Burgsdorf /2.1/,

ţinînd cont de simetria azimutală ($\frac{\partial V}{\partial \varphi} = 0$) în cazul cîmpului plan meridian ce apare:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (2.2.c)$$

Soluţia ecuaţiei (2.2.c) este de forma:

$$A J_0(\lambda, r) \left\{ \alpha \cdot e^{\lambda z} + e^{-\lambda z} \right\}$$

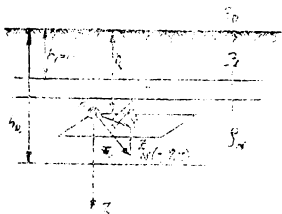
unde:

$\lambda, \lambda', \alpha, \beta$ sînt constante independente de coordonate, ce se determină din condițiile la limită menționate anterior
 $J_0(\lambda, z)$ - funcția Bessel de ordinul zero

O soluție particulară a ecuației (2.2.c.) are forma $\frac{A}{z}$, corespunzătoare soluției omogene. În acest caz, soluția generală a lui (2.2.c.) este

$$u = A \int_0^{\infty} J_0(\lambda z) \left[\alpha_0 \lambda z + \beta_0 e^{-\lambda' z} \right] \frac{d\lambda}{\lambda} \quad (2.3)$$

Ecuația (2.3) va fi valabilă pentru toate straturile de sol, coeficienții α și β avînd valori particulare pentru fiecare strat dar soluția fiind aceeași cu sursa. Pentru cazul a două straturi cu rezistivitățile ρ_1 și ρ_2 , notînd:



$K_{1,2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} = K$ - coeficient de reflexie sau de necoer-
 gență a solului
 z_0 - coordonata sursei de curent
 z - coordonata de calcul de la sursa S
 h_1, h_2 - grosimile primului strat și al celui de al doilea strat
 S - sursa în stratul superior, potențialul în stratul superior

Fig. 1.1. Schemă în secțiune a stratificării solului și a sursei punctiforme de dimensiuni neglijabile față de grosimea straturilor

$$V_{12} = \frac{1}{4\pi} \frac{\rho_1}{z_0} \left[\frac{1}{\sqrt{x^2 + (z-z_0)^2}} + \frac{1}{\sqrt{x^2 + (z+z_0)^2}} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{x^2 + [z - (2n+1)h_1]^2}} + \frac{K^{n+1}}{\sqrt{x^2 + [z - (2n+1)h_1]^2}} \right] \quad (2.3.a)$$

b. Sursa în stratul inferior, potențialul în stratul superior.

$$V_{12} = \frac{1}{4\pi} \frac{\rho_1}{z_0} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{K^n}{\sqrt{x^2 + [2nh_1 + z]^2}} + \frac{K^{n+1}}{\sqrt{x^2 + [z - (2nh_1 + h_2)]^2}} \right\} \quad (2.3.b)$$

c. Sursa în stratul superior, potențialul în stratul inferior.

$$V_{21} = \frac{1}{4\pi} \frac{\rho_1}{z_0} (1+K) \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{K^n}{\sqrt{x^2 + [z - (2nh_1 + h_2)]^2}} + \frac{K^{n+1}}{\sqrt{x^2 + [z - 2nh_1]^2}} \right\} \quad (2.3.c)$$

d. Sursa în stratul inferior, potențialul în stratul inferior

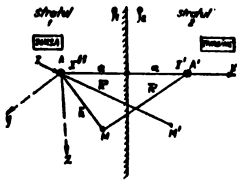
$$V_{21} = \frac{1}{4\pi} \frac{\rho_1}{z_0} \left[\frac{1+K}{1-K} \left(\frac{1}{\sqrt{x^2 + (z-z_0)^2}} + \frac{1}{\sqrt{x^2 + (z+z_0)^2}} \right) + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{x^2 + (z - (2n+1)h_1)^2}} + \frac{K^{n+1}}{\sqrt{x^2 + [2(n+1)h_2 - z]^2}} \right] \quad (2.3.d)$$

Cu ajutorul relațiilor (2.3) se pot determina constantele de atîngere și de pas în zona instalațiilor de legătură la pământ cit și rezistența de dispersie a acestora.

O rezolvare mai simplă și intuitivă a problemei, în cazul a două medii infinite cu suprafața de separație plană este dată de metoda imaginilor sau a reflexiilor multiple (Thompson).

Conform acesteia, ecuația lui Laplace (2.2.a) se rezolvă în acest caz considerînd V compus din două componente și are:

In stratul 1, cu sursă (A) (fig.2.2.) cîmpul e dat de sursa I și imaginea sa față de suprafața de separație I', situate într-un mediu cu aceeași rezistivitate ρ_1 (I' este simetria lui I față de planul de separație între straturi)



$$V_1 = \frac{I \rho_1}{4\pi r} + \frac{I' \rho_1}{4\pi r'}$$

In stratul 2, fără sursă, cîmpul este dat de sursa fictivă I'' situată tot în A, dar debitînd în mediul cu rezistivitate constantă ρ_2 .

$$V_2 = \frac{I'' \rho_2}{4\pi r''}$$

Fig.2.2. Metoda imaginilor electrice

Curenții I' și I'' trebuie astfel determinați încît ei să înlocuiască influența suprafeței de separație între cele două medii. De asemenea, V trebuie să verifice condițiile pe frontieră cunoscute și anume continuitatea potențialului și constanța componentei normale a densității curentului.

Curenții surselor fictive devin în acest caz:

$$I' = K_{12} I \quad I'' = (1 - K_{12}) I$$

După efectuarea calculelor se obține pentru V

$$\text{In stratul ce conține sursa} \quad V_1 = \frac{I \rho_1}{4\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{K_{12}}{r'} \right) \quad (2.4)$$

$$\text{In stratul fără sursă} \quad V_2 = \frac{I \rho_2}{4\pi} \cdot \frac{1 - K_{12}}{r''} \quad (2.4.a)$$

In acest mod, problema calculului cîmpului într-un mediu infinit cu stratificare plană se reduce la rezolvarea unor relații corespunzătoare unui sol omogen (două soluri unul cu rezistivitatea ρ_1 și altul cu ρ_2).

Pe baza acestor relații se poate determina valoarea cîmpului pentru diferite cazuri practice. Pentru cazurile $\rho_1 = \frac{1}{5} \rho_2$ și $\rho_1 = 5 \rho_2$ sînt prezentate calitativ în fig.2.3. liniile de cîmp și liniile echipotențiale.

Pe baza relațiilor clasice (2.4) și (2.4.a), /2.33/ autorul a dedus expresiile pentru V_{11} , V_{12} , V_{21} , V_{22} , analoge cu relațiile date de Burgsdorf /2.3/. Pentru exemplificare, se dă în cele ce urmează calculul potențialului V_{11} produs în stratul 1 de sursa situată în acest strat.

Notațiile utilizate se pot urmări în fig.2.4 a și b.

Pentru început, sursa A se reflectă în suprafața de separație sol-aer. Frontiera sol-aer se echivalează cu apariția sursei fictive I'_0 situată în punctul A_0 și a sursei I din punctul A (liniile întrerupte notate cu 1).

$$\text{Ținînd cont că } K_{10} = \frac{\rho_0 - \rho_1}{\rho_0 + \rho_1} = 1, \quad I'_0 = I$$

Reflectînd acum sursa A în frontiera dintre straturile 1 și 2 se obține

$$\text{sursa fictivă } I'_1 \text{ în punctul } A_1. \text{ Deoarece } K_{12} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}, \quad I'_1 = K_{12} I$$

In acest caz în prima etapă V_{11} este

$$V_{11}^1 = \frac{I \rho_1}{4\pi} \frac{1}{MA} + \frac{I'_0 \rho_1}{MA_0} + \frac{I'_1 \rho_1}{MA_1} = \frac{I \rho_1}{4\pi} \left(\frac{1}{\sqrt{r^2 + (\eta - z)^2}} + \frac{1}{\sqrt{r^2 + (\eta + z)^2}} + \frac{K_{12}}{\sqrt{r^2 + (2\eta - z)^2}} \right)$$

Trecînd la etapa următoare, trebuie considerată influența suprafeței strat 1 - strat 2 (suprafața II) asupra sursei I'_0 din A_0 și a suprafeței sol-aer (I) asupra sursei I'_1 din A_1 (liniile întrerupte 2) și așa mai departe.

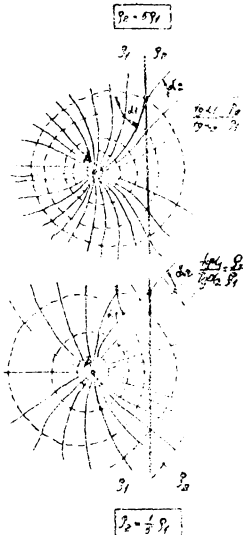


Fig. 2.3. Câmpul în sol neomogen

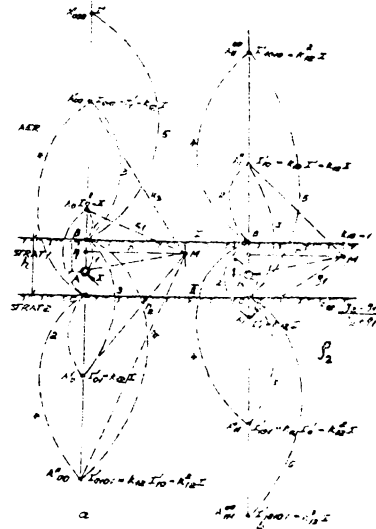


Fig. 2.4. Metoda reflexiilor multiple

- a) Reflexii în suprafața sol-aer
- b) Reflexii în suprafața strat 1-strat 2.

Continuând calculele din aproape în aproape și grupînd termenii în mod convenabil, metoda imaginilor succesive dă următoarea expresie pentru V_{11} :

$$V_{11} = \lim_{N \rightarrow \infty} V_{11}^N = \frac{I_0}{4\pi} \left[\frac{1}{\sqrt{r^2 + (z - \eta)^2}} + \frac{1}{\sqrt{r^2 + (z + \eta)^2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_{12}^n}{\sqrt{r^2 + (z - 2nh - \eta)^2}} + \frac{k_{12}^n}{\sqrt{r^2 + (z - 2nh + \eta)^2}} + \frac{k_{12}^n}{\sqrt{r^2 + (z + 2nh + \eta)^2}} + \frac{k_{12}^n}{\sqrt{r^2 + (z + 2nh - \eta)^2}} \right] \quad (2.5)$$

Relațiile (2.3.a) și (2.5) sînt după cum se vede identice

Termenii scriși în cifră de sub semnul \sum nu sînt în general rapid

descrescătora. Din acest motiv deter. valoarea termenilor V_{11}, V_{22} se poate face numai cu ajutorul calculatoarelui electronic de capacitate medie sau mare.

Metoda imaginilor succesive este din punct de vedere cel mai intuitivă decât cea bazată pe introducerea funcțiilor Bessel.

2.2. SONDAREA GEOELECTRICĂ A SOLULUI. PARAMETRII STRATURILOR DE SOL

Calculul prizelor de pămînt implică evident cunoașterea parametrilor geometrici și electrici ai straturilor de sol în care sînt plantați electrozii metalici (h, ρ_1, ρ_2).

Determinarea lor se poate face prin sondare geoelectrică /2.21/, /2.26/, /2.33/ după metoda celor patru puncte sau prin aceea a electrodului auxiliar sau de control /2.24/, /2.25/, /2.27/, /2.28/.

Conform experienței autorului, pînă la adîncimea de 4 - 5 m în care se construiesc în mod curent instalațiile de legare la pămînt, apar cel mai adesea două straturi orizontale (vezi 2.2.3). În această situație pare interesantă aplica

reă sondajului pentru astfel de configurație a solului.

2.2.1. Metoda geoelectrică (celi patru electrozi)

Dacă sursa A_1 emisferică și punctul $M(x, z)$ sînt la suprafața solului, din (2.5) se obține ($z=0 \cdot \eta=0$) /2.25/

$$V_{11} = V_M = \frac{\rho \pi}{2\pi} \left\{ \frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} K_{12}^n \frac{1}{\sqrt{r^2 + (2nh)^2}} \right\} \quad (2.5.a.)$$

unde $r = \overline{AM}$ - este distanța dintre punctele A și M pe suprafața solului (fig.2.5)
Pentru cazul solului omogen cu rezistivitatea ρ_H

$$V_M = \frac{\rho_H I}{2\pi r} \quad (2.5.b.)$$

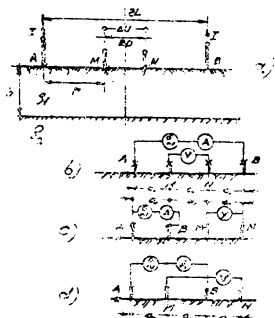


Fig.2.5. Metoda celor patru electrozi

Așezînd electrozii AMNB în linie și trecînd curentul I prin electrozii A,B, între M și N se va culege o diferență de potențial MN. După principiul suprapunerii efectelor:

$$V_M = V_M^A + V_M^B; \quad V_N = V_N^A + V_N^B$$

$$U_{MN} = V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} - \frac{1}{BM} \right] \quad (2.6.)$$

Notînd paranteza dreaptă din (2.6) cu $\frac{2K}{K}$ se obține

$$\rho_H = K \frac{U_{MN}}{I} \quad (2.7)$$

K este o constantă de configurație a electrozilor avînd valorile

- Pentru amplasarea după Schlumberger (S): AB=2L; MN=2D (fig.2.5.a.)

$$K = \frac{\pi}{2D} (L^2 - D^2) \quad (2.7.a.)$$

- Pentru amplasarea după Wenner (W): (AM=MN=NB=a) (fig.2.5.b.)

$$K = 2\pi a \quad (2.7.b.)$$

- Pentru amplasarea după fig.2.5.c.

$$K = 6\pi a \quad (2.7.c.)$$

- Pentru amplasarea după fig.2.5.d.

$$K = 3\pi a \quad (2.7.d.)$$

Cu relația (2.7) se determină o rezistivitate medie a solului omogen sau neomogen. În cazul unei structuri omogene a solului, valorile lui obținute din (2.7.a....d) pentru a variabil sînt constante și egale între ele. În cazul cînd acest lucru nu se verifică, la locul măsurării, solul nu e omogen. În această situație, cu metoda celor patru electrozi se va determina o rezistivitate medie ρ_m care este funcție de ρ_1 și ρ_2 după cum indică (2.8) și (2.9) /2.26/. Raportul $\frac{U_{MN}}{I}$ se determină prin metoda voltamperometrică sau mai simplu cu ajutorul oricărui aparat de măsurat prize de pămînt MS-07, MS-08, NORMA, APP-IRME, ATAP-IRME (Modul cum se poate determina rezistivitatea solului cu ajutorul aparatului ATAP construit de autor este prezentat în cap.5.2). Valoarea raportului $\frac{U_{MN}}{I}$ este dată de relația (2.8) și (2.9)

$$\frac{\rho_m}{\rho_2} = 1 + \frac{L^2 - D^2}{L \cdot D} \sum_{n=1}^{\infty} K_{12}^n \left\{ \frac{1}{\sqrt{(1 - \frac{D}{L})^2 + (\frac{2nh}{L})^2}} - \frac{1}{\sqrt{(1 + \frac{D}{L})^2 + (\frac{2nh}{L})^2}} \right\} \quad (2.8)$$

(amplasarea electrozilor după Schlumberger S);

$$\frac{\rho_m}{\rho_1} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} K_{12}^n \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 + (\frac{3nh}{L})^2}} - \frac{1}{\sqrt{4 + (\frac{3nh}{L})^2}} \right\} \quad (2.9)$$

(La amplasarea electrozilor după Wenner W. În realitate metoda W este un caz particular al metodei S când $D = \frac{L}{2}$)

Fiind rapoarților $\lambda_1 = \frac{L}{L_1}$, $\lambda_2 = \frac{L}{L_2}$ diferite valori, se pot obține curbele etalon (model) ce servesc la sondarea solului în cazul metodelor W sau S. Valorile pentru rapoarțele $\frac{\rho_m}{\rho_1}$ obținute prin calcul la calculatorul IRIS-50 al ISPE-București pentru relația (2.8) sînt prezentate în tabelul 2.1.

În fig. 2.6 și 2.7 sînt prezentate curbele model $\frac{\rho_m}{\rho_1} = f(\frac{L}{L_1}, \frac{L}{L_2})$ pentru me-

toda W și S. Se observă că cele două metode prezintă curbe sensibile diferite în special în domeniul valorilor $y < 1$.

Din acest motiv se impune ca la aplicarea practică a metodei geoelectrice să se utilizeze curbele precalculate corespunzătoare metodei de măsură utilizată (W sau S).

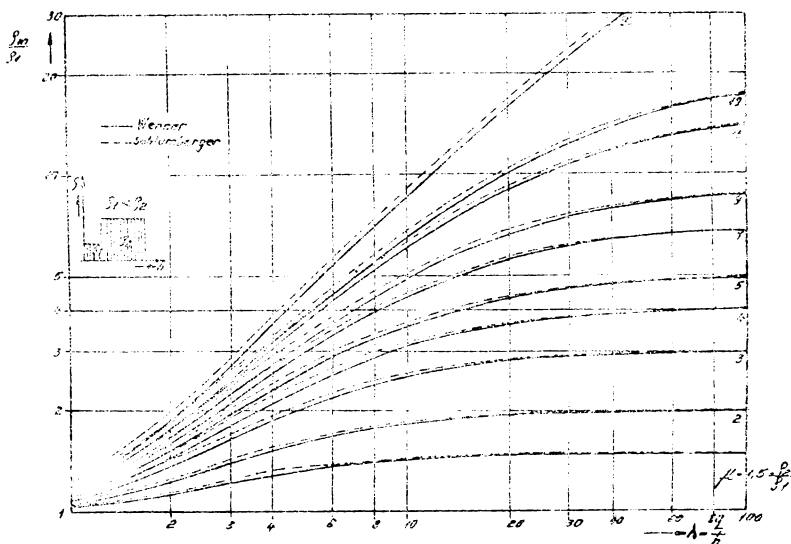


Fig.2.6. Curbele model pentru două straturi $\rho_2 > \rho_1$

Se menționează că în literatură [2.20...2.24] se utilizează curbe precalculate conform unei relații simplificată (2.8.a) care se deduce din (2.5.a) și (2.5.b.) când $r = L$.

$$\frac{\rho_m}{\rho_1} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} K_{12}^n \frac{1}{\sqrt{1 + (\frac{2nh}{L})^2}} \quad (2.8.a.)$$

Acstea corespund destul de bine cu curbele calculate după (2.8) dacă $\frac{D}{L} < 0,33$ (erori neglijabile practic mai ales pentru $\frac{L}{D} > 1$). Diferențele între valorile $\frac{\rho_m}{\rho_1}$ după (2.8), (2.9) calculate la calculatorul IRIS-50 și după (2.8.a) calculate la calculatorul Elliott4120 DSE [2.24] se pot urmări în tabelul 2.1.

Din curbele etalon precalculate și diagrama $\rho_m(L)$ pentru L variabil obținută măsurând pe $\rho_m(\rho_H)$ conform relației (2.7) se pot determina cu exactitate suficientă parametrii geometrice și electrice ai straturilor de sol. În acest sens, curbele model și diagrama $\rho_m(L)$ denumită paletă [2.24] se desenează în coordonate bilogaritmice cu aceeași scară (unitatea pentru λ , de lungime egală cu unitatea pentru L). Aplicarea practică a metodei se prezintă detaliat în [2.21...2.23] și

Abateri între valorile $\frac{e_m}{p_1}$ calculate cu (2.6), (2.9) și (2.8.a)

K ₀ %	D/L	L/H								
		1	2	3	4	6	8	10	20	
1,5	0,1	1,0366	1,1475	1,2471	1,3155	1,3925	1,4308	1,4522	1,4664	
	0,33	1,0323	1,1308	1,2248	1,2934	1,3751	1,4178	1,4423	1,4530	
	E	1,0369	1,1430	1,2491	1,3175	1,3939	1,4317	1,4527	1,4665	
2	0,1	1,0624	1,2554	1,4360	1,5670	1,7269	1,8143	1,8666	1,9086	
	0,33	1,0531	1,2266	1,3960	1,5235	1,6910	1,7858	1,8439	1,8901	
	E	1,0633	1,2582	1,4397	1,5709	1,7299	1,8168	1,8695	1,9108	
3	0,1	1,0968	1,4040	1,7074	1,9438	2,2632	2,4605	2,5900	2,6521	
	0,33	1,0856	1,3884	1,6410	1,8709	2,1921	2,3965	2,5337	2,5833	
	E	1,0977	1,4080	1,7133	1,9504	2,2695	2,4655	2,5947	2,6567	
4	0,1	1,1198	1,5021	1,8941	2,2135	2,6034	2,8795	3,1029	3,2684	
	0,33	1,103	1,4454	1,8091	2,1166	2,5718	2,862	3,1025	3,2618	
	E	1,1195	1,5072	1,9016	2,2222	2,6324	2,9088	3,2024	3,3680	
5	0,1	1,1342	1,572	2,0309	2,4167	2,9068	3,4034	3,6986	4,1222	
	0,33	1,1188	1,5074	1,9321	2,3012	2,8594	3,2772	3,5890	4,0423	
	E	1,1333	1,5773	2,0398	2,4274	2,905	3,4173	3,7149	4,1477	
9	0,1	1,1667	1,7254	2,3424	2,8961	3,8081	4,5369	5,1184	6,8454	
	0,33	1,1474	1,6434	2,2116	2,7349	3,6198	4,3242	4,8993	6,6405	
	E	1,1675	1,7327	2,3554	2,9134	3,8374	4,5660	5,1525	6,8921	
15	0,1	1,1864	1,8214	2,5456	3,2213	4,4160	5,4331	6,3094	9,2916	
	0,33	1,1649	1,7287	2,3937	3,034	4,1736	5,1507	5,9950	8,9258	
	E	1,1876	1,8300	2,5625	3,2487	4,4569	5,4807	6,3294	9,3573	
19	0,1	1,1933	1,8553	2,6189	3,3409	4,6541	5,7969	6,8054	10,4504	
	0,33	1,1710	1,7388	2,4613	3,1458	4,3915	5,4853	6,4527	9,2967	
	E	1,1943	1,8641	2,6386	3,3742	4,6983	5,8528	6,8496	10,5286	
99	0,1	1,2162	1,9714	2,8757	3,7905	5,5867	7,3272	9,0969	16,684	
	0,33	1,113	1,8618	2,6999	3,56	5,248	6,8821	8,4669	15,718	
	E	1,2164	1,9841	2,9108	3,8422	5,6619	7,4189	9,1220	16,8832	

Notă: D/L = 0,1 - Metoda Schürberger
 D/L = 0,33 - Metoda Wenner
 E = Metoda simplificată - relația (2.8.a.)

44
 În lucrarea autorului /2.24/ în care se utilizează curbele precalculate după (2.8.a.).

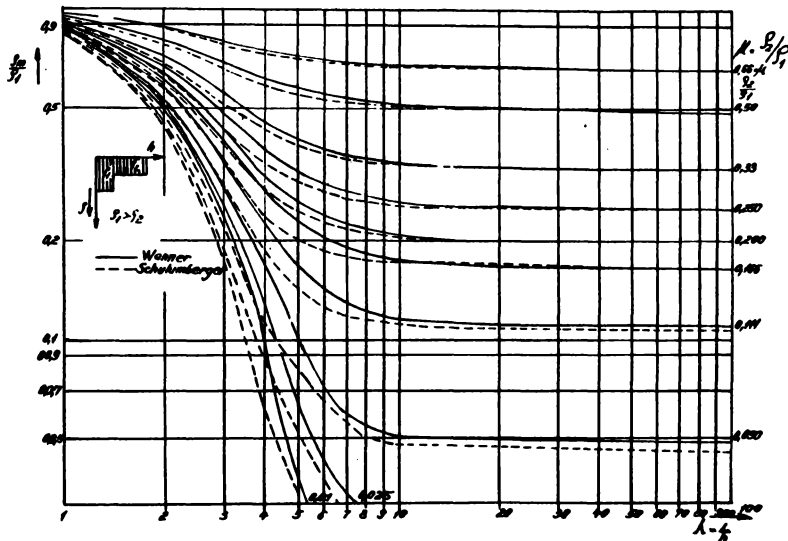


Fig.2.7. Curbele model pentru două straturi $\rho_2 < \rho_1$

La măsurări se poate considera preferabilă metoda W deoarece ea oferă cu înnoașterea unui volum de sol mai complet ca metoda S (fig.2.8).

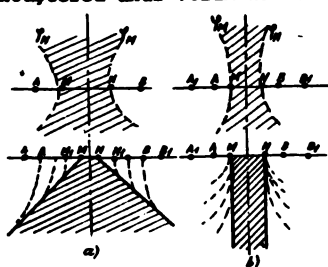


Fig.2.8. Comparatie între metoda Wenner (a) și Schlumberger (b) solul cercetat este hașu-rat

Aplicarea practică a sondajului geoelectric pe unele teritorii ocupate de stații de înaltă tensiune în R.S.R. (în construcție sau în exploatare) au condus la rezultatele prezentate în fig.2.11 în care se prezintă paletetele $\rho_m(L)$ determinate cu aparatul ATAP-IRME.

2.2.2. Metoda electrodului auxiliar

Se bazează pe măsurarea rezistenței unui electrod cilindric vertical de dimensiuni cunoscute. Ea se pretează și la studierea solului cu stratificări /2.27...2.29/. Se consideră rezistența de dispersie a electrodului auxiliar de lungime L și diametru d (fig.2.9).

$$\text{După Koch /2.28/: } R = \frac{\rho_m}{2\pi L} \cdot \ln \frac{4L}{d} \quad (2.10)$$

$$\text{După Brandolini /2.27/: } R = \frac{\rho_m}{2\pi L} \cdot \ln \left(\frac{4L}{a} - 1 \right) \quad (2.11)$$

$$R = \frac{\rho_m}{2\pi L} \cdot \ln \frac{L+a}{a} \quad (2.12)$$

În relațiile (2.10...2.12) ρ_m este rezistivitatea medie a solului pînă la adîncimea L. Relația (2.11) e considerată de Brandolini /2.27/ ca fiind cea mai bună aproximație de calcul pentru R; față de aceasta (2.10) are erori pozitive de acelaș ordin ca cele date de (2.12) care sînt însă negative. Relația (2.11) se obține considerînd suprafețele echipotențiale ale prizei (fig.2.10) cilindri coaxiali terminați cu semi-sfere în partea inferioară iar (2.10) le consideră elipsoizi de rotație confocali. Pentru a ușura calculele de determinare a lui ρ_m în

Fig.2.10 se dă o diagramă originală a autorului ce exprimă funcția $\frac{\rho}{R} = f(L)$ pentru diferite diametre de electrod.

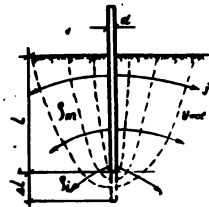


Fig.2.9. Metoda electrodului auxiliar
L-lungimea; d-Diametrul
(d=2a) (d=2r)

Cunoscând la adâncimea L valoarea R și diametrul d al electrodului se poate calcula ușor raportul $\frac{\rho}{R}$ și deci ρ_m -ul respectiv.

Considerând că electrodul se infundă suplimentar cu lungimea ΔL , într-un strat de sol cu rezistivitatea ρ_1 se cere determinarea acestuia din variabilele ΔR și ΔL (unde cu Δ s-a notat variația mărimii).

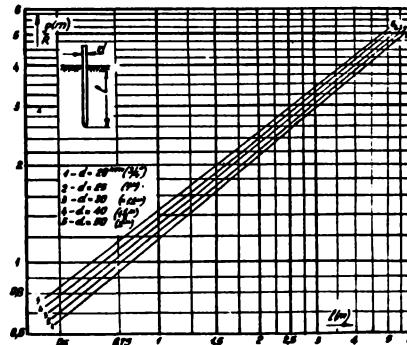


Fig.2.10. Nomogramă pentru calculul rezistivității

Conductanța electrodului cilindric este după (2.10)

$$G = \frac{1}{R} = \frac{2 \pi L}{\rho_m \cdot \ln \frac{4L}{d}}$$

Îngropînd suplimentar electrodul, conductanța electrodului va crește ca efect a următoarelor cauze (ce pot avea efecte contrare):

- creșterea lungimii plantate
- variația rezistivității straturilor

Considerînd, prin simplificare, că $\ln \frac{4L + \Delta L}{d} = \ln \frac{4L}{d}$ deoarece $\Delta L \ll L$ și trecînd la limită se obține

$$\begin{aligned} dG &= \frac{\partial G}{\partial \rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial L} \cdot dL + \frac{\partial G}{\partial L} \cdot dL \\ dG &= \left[- \frac{2 \pi L}{\rho^2} \cdot \frac{1}{\ln \frac{4L}{d}} \cdot \frac{d\rho}{dL} + \frac{2 \pi}{\rho} \cdot \frac{1}{\ln \frac{4L}{d}} \right] dL \\ \frac{dR}{R^2} &= \left\{ \frac{2 \pi dL}{\rho} - \frac{2 \pi L}{\rho^2} \cdot \frac{d\rho}{dL} \right\} \ln \frac{d}{4L} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Ecuția (2.14) se poate rezolva grafoanalitic, simplificînd datele probei. Pentru o rezolvare analitică se presupune o variație discretă a rezistivității care la suprafața de la adâncime L trece de la valoarea ρ_m la ρ_1 și se păstrează apoi constantă (pe lungimea ΔL) În acest caz $\frac{d\rho}{dL} = 0$ și

$$\begin{aligned} \frac{dR}{R^2} &= \frac{2 \pi}{\rho_1} dL \ln \frac{d}{4L} \quad \text{sau} \\ \rho_1 &= \frac{2 \pi R^2}{\frac{dR}{dL} \ln \frac{4L}{d}} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Relația (2.15) a autorului este de aceeași formă cu cea indicată de Chvatal /2.29/ cu deosebirea că acesta obține pe ρ_1 prin două simplificări succesive, ce conduc la erori de sensuri contrare.

După unele transformări se obține

$$\rho_1 = \rho_m \cdot \frac{R \cdot \Delta L}{L \cdot \Delta R} \quad (2.16)$$

Eoch /2.28/ propune o altă rezolvare a relației /2.14/.

Îngropînd electrodul suplimentar cu lungimea ΔL , dacă rezistivitatea ar fi constantă între L și L + ΔL s-ar obține:

$$\Delta R_F^* = R_m - R_{if}^*$$

unde ΔR_F^* și R_{if}^* sînt mărimi fictive (de calcul).

Deoarece rezistivitatea se modifică în realitate de la ρ_m la ρ_1 pentru stratul de grosime ΔL , apare un alt ΔR și la adîncimea totală $L + \Delta L$ rezistența R_1 . Dacă $\rho_1 < \rho_m$, ΔR va crește în proporția $\frac{\rho_1}{\rho_m}$. Dacă $\rho_1 > \rho_m$, solul conduce mai prost și ΔR va fi mai mic.

În acest caz:

$$\Delta R = R_m - R_1 = \Delta R_{if}^* \cdot \frac{\rho_m}{\rho_1}$$

$$\rho_1 = \rho_m \cdot \frac{R_m - R_{if}^*}{R_m - R_1} \quad (2.17)$$

În (2.27) Brandolini prezintă o altă metodă de determinare a rezistivității straturilor succesive de sol. Metoda este aplicabilă numai dacă se pot realiza experimental două operații de derivare. Metoda este mult mai complicată decît cele prezentate anterior și unele lucrări mai recente chiar ale autorului menționat o consideră necompetitivă pentru moment.

Metodele de sondare cu ajutorul electrodului auxiliar sînt foarte laborioase, necesitînd multe calcule. Din acest punct de vedere și pentru complicațiile privind plantarea și scoaterea electrodului de măsură pentru adîncimi de sondare peste 2 m trebuie preferată metoda celor patru electrozi.

2.2.3. Verificări experimentale

Metodele de sondaj menționate au fost verificate practic în diferite zone de pe teritoriul țării. Rezultatele obținute la sondajul cu metoda W sînt prezentate în fig.2.11. Confruntînd curbele obținute cu cele etalon indicate în fig.2.6 și 2.7, se trage concluzia că în marea majoritate a cazurilor (90% din cazuri - curbele 2...10 din fig.2.7) solul pe teritoriul stațiilor respective prezintă două straturi. De asemenea, în cele mai multe situații (70% curbele 2,3,4,6,7,9,10) rezistivitatea scade cu adîncimea. Acest element este un argument serios în avantajul utilizării prizelor naturale care ating de obicei straturile inferioare de sol care pe lîngă o rezistivitate de obicei mai redusă oferă și oscilații sezoniere mult diminuate prin variația mai mică a umidității și temperaturii în straturile profunde. Alura curbelor din fig.2.11, justifică pe deplin, interesul pentru studiul solului "dubl strat" și deci pentru simplificarea menționată în rezoluva rea ecuației Laplace (relația 2.4).

Metoda sondării solului cu ajutorul electrodului auxiliar a fost comparată prin măsurări efective în teren - cu metoda Wenner. Dacă în cazul solului omogen rezultatele obținute cu cele două metode se suprapun bine (în limita erorilor de clasă a aparatelor de măsură), în cazul solurilor cu stratificări și anizotropie pe orizontală cele două metode dau rezultate sensibil diferite (fig.2.12.). În cazul prezentat în figură, abaterile între rezultatele obținute cu cele două metode pentru ρ_m ajung pînă la 20%, metoda Wenner oferind însă rezultate acoperitoare (ρ mai mare derivă din faptul că metoda Wenner dă rezultate

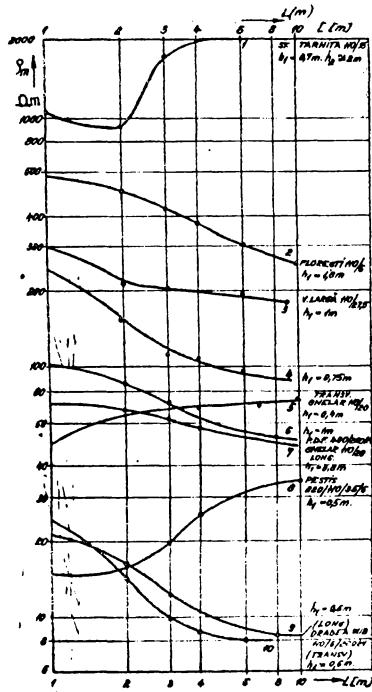


Fig.2.11. Măsurarea rezistivității pe teritoriul diferitelor stații din R.S.R.
 ρ_m - rezistivitatea măsurată cu metoda Wenner. L - semidistanța între electrozii extremi.
 $(\frac{3a}{2})$. h - adîncimea la care apare stratificația

Diferențele între cele două metode derivă din faptul că metoda Wenner dă rezultate

Utilizabile pentru solul din planul vertical al electrozilor pe cînd electrodul auxiliar oferă un sondaj în toate direcțiile în jurul electrozidului îngropat. De asemenea, profunzimea de pătrundere a celor două metode nu este absolut identică în cazul solului stratificat.

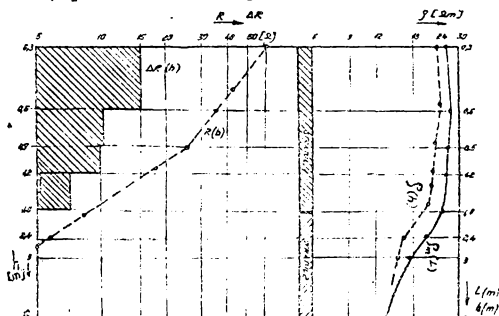


Fig. 2.12. Compararea metodelor de sondaj într-un caz practic

Un alt motiv pentru care cele două metode nu dau rezultate identice poate proveni din însăși principiul metodei geoelectrice care consideră suprafața de separație între straturi plană (ideală) ceea ce nu este valabil în totdeauna, de multe ori existînd o plajă de difuziune a straturilor cu rezistivități diferite. Datele practice obținute indică însă un lucru deosebit. Măsurările executate în condiții de teren sînt mult influențate de factori aleatorii: felul suprafeței de separație a straturilor, anizotropia pe orizontală, a solului, factorii climatici, modul de execuție a măsurărilor așa că chiar măsurări efectuate în condiții de deosebită acuratețe (ca în cazul menționat) nu sînt întodeauna reproductibile.

Este deci neinteresant din punct de vedere practic să se impună o precizie deosebită calculului prizelor de pămînt în sol deoarece consumul de "ore-calculator" pentru această operație este nejustificat de eficiența practică a acestei exactități.

2.2.4. Erorile și limitele metodelor de sondaj

Interesul pentru cunoașterea parametrilor straturilor de sol este justificat de faptul că toate calculele de dimensionare a prizelor de pămînt se bazează pe cunoașterea acestora (ρ_1, ρ_2, h). De asemenea atît comportarea la solicitările termice cît și la frecvențele înalte sînt în mod deosebit influențate de rezistivitatea solului.

Evident, precizia de măsurare a parametrilor geometrici și electrici ai straturilor de sol, depinde de clasa aparatelor și utilajelor utilizate dar și de calitatea curbelor precalculate, în plus, trebuie avuți în atenție și erorile de paralaxă sau observator ce pot apare la trasarea și interpretarea curbelor sondajului geoelectric (a paletelor) și curbelor model, precalculate.

Se menționează în acest sens că metodele de sondaj respective au anumite limite de precizie, determinate în special de ipotezele făcute la calcularea curbelor model. După cum s-a arătat, curbele model au fost construite în ipoteza unei suprafețe nete, plane, de separație între straturile adiacente și a utilizării la sondaj a unor electrozi semisferici, situați la suprafața solului. În realitate există aproape întotdeauna între două straturi o zonă intermediară mai mult sau mai puțin groasă, deci o trecere treptată spre stratul inferior și electrozii utilizați sînt conici. Această realitate are o influență negativă asupra preciziei sondajului, în special în cazul unui număr mare de straturi de grosimi mici. Din evaluarea curbelor $\rho(L)$ cu ajutorul curbelor precalculate pentru dublu strat se pot obține rezultate corespunzătoare și pentru mai multe straturi (prin interpretări succesive) dar deobicei numai atunci cînd grosimea straturilor crește cu adîncimea de sondare.

Din aceste motive și ținînd cont de dificultățile majore ale utilizării unor aparate etalon în condițiile măsurărilor în teren, nu se impune o precizie de măsurare mult mai mare decît cea a evaluării cu ajutorul curbelor model precalculate. Aceasta depinde evident de grija și specializarea persoanei ce execută interpretarea rezultatelor sondajului dar nu se poate aștepta ca în condițiile obișnuite precizia de determinare din curbele precalculate a lui h, ρ_1 și ρ_2 ale straturilor să poată fi coborîte sub 5...6%. În concluzie este deci lipsit de interes să se execute măsurători cu aparate foarte precise și calcule deosebit de exacte pe baza unor sonde care au limitele lor.

Erorile de măsurare a parametrilor straturilor se exprimă prin relațiile:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta R}{R} + \Delta_{\text{relativ Paralaxă}}$$

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta D}{D} + \Delta_{\text{relativ Paralaxă}}$$

18 notațiile L,D,R, fiind definite anterior iar Δ relativ Parallaxă este eroarea de interpretare la interpretarea curbelor sondajului geoelectric.

Utilizând aparate de clasă corespunzătoare (2.5...3 % la punctele de curent alternativ pentru măsurarea lui R), măsurând cu atenție distanțele, și interpretând cu grijă și minuțios rezultatele obținute erorile în cazul utilizării acestei metode sondaj pot fi sub 8..10% ceea ce se poate considera întrutotul acceptabil pentru scopurile practice și proiectării.

În orice caz însă, posibilitățile de sondare a solului utilizând punți de curent alternativ la măsurarea rezistenței de dispersie se limitează la adâncimi pînă la 18...20 m, peste care se consideră necesare aparate de curent continuu deosebit de sensibile.

2.3. STABILITATEA TERMICĂ A PRIZELOR DE PĂMÎNT

Prin stabilitate termică se înțelege în general capacitatea prizei de a suporta solicitările termice la care este supusă în exploatare ca efect al trecerii curentului și de a-și păstra nealterate proprietățile de conducere a curentului în sol. În acest sens studiul stabilității constituie un domeniu conex electrotehnicii și termotehnicii.

În ultimul timp rezultate deosebite ale cercetărilor științifice s-au obținut în domeniile de conexiune ale diferitelor discipline științifice. Se pot menționa în acest sens aplicațiile teoriei grafurilor în energetică a electronicii în medicină, a matematicii în arheologie, etc. Un domeniu de mare actualitate și de real interes este și cel al calculului termic al prizelor de pămînt.

Pentru a cunoaște complet fenomenele ce se produc la funcționarea prizelor de pămînt naturale sau artificiale se impun studierea dispersiei curentului dar și aspectul termic al problemei - distribuția temperaturilor în vecinătatea și pe suprafața electrozilor.

Ecuția transferului de căldură în elementele de volum din sol se poate scrie pe baza principiului conservării energiei care exprimă faptul că suma cantităților de căldură produsă evacuată și înmagazinată este în mod necesar nulă.

- Căldura produsă prin efect Joule - Len : în elementul de volum dV de sol, în timpul dt

$$dQ_p = \rho_j^2 dv \cdot dt \quad (2.19)$$

- Căldura înmagazinată în elementul dV care face să crească temperatura

cu $d\theta$:

$$dQ_e = -cdV \cdot d\theta$$

- Căldura evacuată spre elementele vecine, în același timp dt :

$$dQ_e = \lambda \cdot \Delta\theta dV \cdot dt$$

- Considerînd: $\sum dQ = dQ_p + dQ_1 + dQ_e = 0$,

Se obține după anumite transformări o ecuație diferențială de tip Fourier

(2.21)

$$\rho_j^2 = c \frac{d\theta}{dt} - \lambda \Delta\theta \quad (2.21)$$

unde în afara notațiilor cunoscute:

j - densitatea curentului (A/m^2)

c - căldura specifică medie a solului. Se consideră

$$c(\theta) = ct = C_{med} = 1,75 \cdot 10^6 \text{ W/m}^3\text{ }^\circ\text{C} \quad /2.28/$$

λ - conductivitatea termică medie a solului. Se consideră

$$\lambda(\theta) = ct = \lambda_{med} = 1,2 \text{ W/m}^\circ\text{C} \quad /2.28/$$

Fenomenele termice sînt în general procese cu inerție. Din acest motiv pentru simplificarea problemei se obișnuiește ca (2.21) să se rezolve în două etape - procesul tranzitoriu și procesul staționar. În cadrul procesului tranzitoriu se neglijează transmisia de căldură în exterior, considerîndu-se că toată energia disipată prin efect Joule se înmagazinează în elementul de volum, fapt ce conduce la creșterea temperaturii.

Pentru regimul permanent, se consideră temperatura constantă, căldura produsă în elementul de volum se transferă în exterior.

Cu aceste departajări, ecuația (2.21) se rezolvă mai simplu.

2.3.1. Procesul tranzitoriu (adiabatic)

Considerînd neglijabilă transmisia căldurii spre exterior, $\Delta\theta=0$

$$\rho_j^2 = c \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad \text{sau} \quad \frac{E^2}{\rho} = c \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (2.22)$$

Ecuția (2.22) se integrează simplu, considerînd $\rho = \rho_0 = \text{constant}$ -

nedepinzînd de temperatură. In acest caz

$$t_L = \frac{C \int \theta}{j^2 \cdot \rho_0} \quad (2.23)$$

unde $\int \theta$ - creșterea de temperatură corespunzătoare duratei t_L a defectului

t_L - timpul calculat în literatură corespunzător creșterii $\int \theta$ a temperaturii în straturile vecine electrozilor metalici.

Admițînd o creștere $\int \theta$ a temperaturii, rezultă timpul t_L cit poate trece un curent de densitate j prin sol fără să se depășească creșterea de temperatură respectivă. In realitate, timpul t_L va fi cu ceva mai lung decît cel calculat cu (2.23) deoarece chiar în timpul procesului tranzitoriu se cedează căldură în spre straturile vecine de sol, fapt ce face ca temperatura să crească mai încet.

După Dolgov, care împreună cu Iacobs au studiat proprietățile fizice ale solului /2.32/ rezistivitatea ρ depinde de temperatură avînd un coeficient de temperatură negativ - caracteristic tuturor soluțiilor electrolitice. Expresia analitică a acestei variații

$$\rho = e^{a+b\theta} \cdot w^e \quad (2.24)$$

unde a, b, e - sînt coeficienți ce depind de natura solului și adîncime iar $w(\%)$ umiditatea procentuală conținută în sol.

In cazul procesului tranzitoriu, considerat ca avînd durate de ordinul secundelor, umiditatea solului nu se modifică practic și în acest caz se poate considera

$$\rho = A e^{b\theta} \quad (2.24.a)$$

Caracterul descrescător al rezistivității (cu temperatura) s-a evidențiat și în cadrul probelor repetate executat de autor în diferite categorii de sol.

Pentru solurile cele mai răspîndite - cele argiloase și nisipo-argiloase sau podzolice la umidități obișnuite de sol ($w=10...30\%$) și la adîncimi de îngroșare mai mari ca 60...80 cm coeficientul A și b au valorile $A = 29...44 (\Omega \cdot m)$ $b = -0,0249...-0,0296 (1/^\circ C)$

Ca valori medii de calcul se pot lua $A = 35 \Omega \cdot m$, $b = -0,027$.

In acest mod ecuația (2.22) devine, după calculele autorului

$$\frac{C d\theta}{dt} = \frac{E^2}{A e^{b\theta}} ; \text{ sau } C \frac{d\theta}{dt} = A e^{b\theta} \cdot j^2$$

Integrînd, se obține timpul în care temperatura în straturile de sol vecine electrozilor crește cu $\int \theta = \theta - \theta_0$; (θ_0 - temperatura inițială a solului;

ρ_0 - rezistivitatea inițială: $\rho_0 = A e^{b\theta_0}$)

$$t = \frac{C(e^{b\theta_0} - e^{-b\theta})}{j^2 \cdot b \cdot A} = \frac{C}{j^2 \cdot b \cdot \rho_0} (1 - e^{-b \int \theta}) \quad (2.25)$$

Relația (2.25) obținută de autor e mai exactă decît cea din literatură (2.24), fiind confirmată de rezultatele practice obținute la probe. Trebuie subliniat că t din (2.24) și (2.25) este calculat în ipoteza că densitatea de curent j nu depinde de rezistivitatea solului ceea ce este perfect adevărat în cazul probelor tranzitorii (scurtcircuite) al căror curent este determinat de parametrii circuitului parcurs de curenții de defect (generatoare, transformatoare, conducători, arc, traseu de întoarcere prin pămînt) și este foarte puțin influențat de rezistența straturilor subțiri a căror rezistivitate se modifică cu θ .

Raportul $\frac{t}{t_L}$ - între timpul calculat de autor - (necesar ca temperatura să crească cu $\int \theta$) și cel din literatura actuală este indicat în fig.2.13. Se observă că timpul real este în domeniul supra temperaturilor obișnuite $\int \theta = 40-80^\circ C$ de 2...3 ori mai lung decît cel din literatură

$$\frac{t}{t_L} = \frac{1 - e^{-b \int \theta}}{-b \int \theta}$$

Din (2.25) se deduce densitatea maxim admisibilă pe suprafața electrozului

de priză, pentru un timp t_f dat al scurtcircuitului (pe suprafața de contact între electrod și sol).

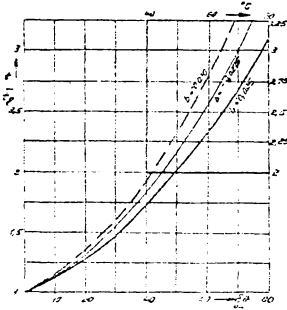


Fig. 2.13. Raportul între real și cel indicat în literatură

zează pe interpretarea fizică

și cel indicat în literatură rezistivitatea solului scade și deci la un curent constant efectul termic al curentului se diminuează față de cazul $\rho = \text{ct}$. În acest mod creșterea temperaturii se va produce mai lent și temperatura admisibilă ($\theta = 100^\circ\text{C} - \Delta\theta = 65^\circ\text{C}$) se va atinge la o densitate de curent superioară celei valabile pentru cazul cînd se consideră rezistivitatea solului constantă.

Se subliniază că în realitate chiar timpul calculat de autor este cu ceva mai mic decît cel real deoarece chiar în procesul tranzitoriu se transmite căldura spre exterior, aceasta face calculele efectuate acoperitoare.

2.3.2. Regimul termic staționar (permanent)

Se consideră că temperatura s-a stabilizat și toată căldura produsă în elementul de volum se transferă în exterior. Atunci (2.21) devine (2.28)

$$\Delta\theta = -\frac{\rho_j^2}{\lambda} = -\frac{E^2}{\rho\lambda} \quad (2.28)$$

$$\text{sau: } \Delta\theta = -\frac{1}{\rho\lambda} \left[\frac{\Delta V^2}{2} - V\Delta V \right] \quad \text{sau} \quad \Delta\left(\theta + \frac{1}{2\lambda\rho} V^2\right) = \frac{V\Delta V}{\lambda\rho}$$

Deoarece $\Delta U = 0$:

$$\Delta\left(\theta + \frac{1}{2} V^2\right) = 0$$

Condițiile la limită pentru rezolvarea acestei ecuații sînt:

- Pentru punctul de la infinit $V = 0$; $\theta = \theta_0$
- Pentru suprafața electrozului $V = V_0 = U_0$; $\nabla\theta = \mathbf{e}$; ($\theta = \theta_{\text{max}}$)

U_0 - tensiunea pe priză față de punctul de la infinit

(electrodul metalic are conductibilitate termică mult mai bună ca solul și gradientul de temperatură la suprafața sa e nul).

Soluția ecuației (2.28) cu condițiile la limită menționate, este după /2.31/ în care se consideră $\rho = \text{constant}$ cu θ și potențialul unui punct egal cu tensiunea lui față de punctul de la infinit $U = V$

$$\theta + \frac{U^2}{2\lambda\rho} = \theta_0 + U_0 \frac{U}{\lambda\rho} \quad (2.29)$$

Se observă că după (2.29) suprafețele echipotențiale din zona învecinată prizei sînt și suprafețe izoterme (Pentru $U = \text{ct}$; $\theta = \text{ct}$).

În funcționarea normală a prizei din cauza umidității solului, difuziunea curentului se realizează prin deplasarea ionilor în electrolitul sol-apă. Prin creșterea temperaturii, difuziunea ionilor poate fi accelerată prin aportul diferenței de temperatură între punctele din apropierea prizei și cele mai depărtate care sînt mai reci.

$$J_{\text{max}} \leq \sqrt{\frac{C(1 - e^{-b\sigma\theta})}{t_f \cdot b \cdot \rho_0}} \quad (2.26)$$

Față de relația indicată în literatură (2.27), /2.30/, /2.31/ densitatea din (2.26)

$$J_{\text{max}}^L \leq \sqrt{\frac{C\sigma\theta}{t_f \cdot \rho_0}} \quad (2.27)$$

este în raportul:

$$\frac{J_{\text{max}}}{J_{\text{max}}^L} = \sqrt{\frac{t}{t_L}} = 1,58 \dots 1,75$$

pentru $\sigma\theta = 65^\circ\text{C}$ majorarea reprezintă deci 58-75% ceea ce reprezintă o valoare semnificativă ce permite o economie importantă de metal la dimensiunile instalațiilor de legare la pămînt.

Explicația fenomenologică a datelor obținute se bazează pe ecuația (2.24). Cu creșterea temperaturii rezistivitatea solului scade și deci la un curent constant efectul termic al curentului se diminuează față de cazul $\rho = \text{ct}$. În acest mod creșterea temperaturii se va produce mai lent și temperatura admisibilă ($\theta = 100^\circ\text{C} - \Delta\theta = 65^\circ\text{C}$) se va atinge la o densitate de curent superioară celei valabile pentru cazul cînd se consideră rezistivitatea solului constantă.

Se subliniază că în realitate chiar timpul calculat de autor este cu ceva mai mic decît cel real deoarece chiar în procesul tranzitoriu se transmite căldura spre exterior, aceasta face calculele efectuate acoperitoare.

2.3.2. Regimul termic staționar (permanent)

Se consideră că temperatura s-a stabilizat și toată căldura produsă în elementul de volum se transferă în exterior. Atunci (2.21) devine (2.28)

$$\Delta\theta = -\frac{\rho_j^2}{\lambda} = -\frac{E^2}{\rho\lambda} \quad (2.28)$$

$$\text{sau: } \Delta\theta = -\frac{1}{\rho\lambda} \left[\frac{\Delta V^2}{2} - V\Delta V \right] \quad \text{sau} \quad \Delta\left(\theta + \frac{1}{2\lambda\rho} V^2\right) = \frac{V\Delta V}{\lambda\rho}$$

Deoarece $\Delta U = 0$:

$$\Delta\left(\theta + \frac{1}{2} V^2\right) = 0$$

Condițiile la limită pentru rezolvarea acestei ecuații sînt:

- Pentru punctul de la infinit $V = 0$; $\theta = \theta_0$
- Pentru suprafața electrozului $V = V_0 = U_0$; $\nabla\theta = \mathbf{e}$; ($\theta = \theta_{\text{max}}$)

U_0 - tensiunea pe priză față de punctul de la infinit

(electrodul metalic are conductibilitate termică mult mai bună ca solul și gradientul de temperatură la suprafața sa e nul).

Soluția ecuației (2.28) cu condițiile la limită menționate, este după /2.31/ în care se consideră $\rho = \text{constant}$ cu θ și potențialul unui punct egal cu tensiunea lui față de punctul de la infinit $U = V$

$$\theta + \frac{U^2}{2\lambda\rho} = \theta_0 + U_0 \frac{U}{\lambda\rho} \quad (2.29)$$

Se observă că după (2.29) suprafețele echipotențiale din zona învecinată prizei sînt și suprafețe izoterme (Pentru $U = \text{ct}$; $\theta = \text{ct}$).

În funcționarea normală a prizei din cauza umidității solului, difuziunea curentului se realizează prin deplasarea ionilor în electrolitul sol-apă. Prin creșterea temperaturii, difuziunea ionilor poate fi accelerată prin aportul diferenței de temperatură între punctele din apropierea prizei și cele mai depărtate care sînt mai reci.

Dacă temperatura crește prea mult (peste $95-100^{\circ}\text{C}$) conductivitatea solului poate fi pierdută prin evaporare, pământul uscat devenind izolant. Uneori se poate petrece strângerea straturilor de sol vecine prizei (cu gradientii maximi de potențial) cu urmările respective - topirea electrodului metallic, verificarea pământului etc. În consecință pentru ca prizea să funcționeze stabil, trebuie limitată încălzirea solului la $90-95^{\circ}\text{C}$.

În imediata vecinătate a suprafeței electrodului se obține pentru $U = U_0 = U_{\text{limită}}$ valoarea maximă a tensiunii admise pe priză fără aceasta să-și piardă stabilitatea:

$$U_0 = \sqrt{2 \lambda \rho \theta_{\text{max}} - \theta_0} = U_{\text{lim}} \quad (2.30)$$

Această ecuație are importanță în studiul stabilității termice a prizelor de pământ în regim staționar. Prin stabilitatea termică se înțelege menținerea valorii rezistenței de dispersia a prizei în limite admisibile, necesare în explica-tare, pentru anumite solicitări de curent ce trece prin priză, sau de tensiune aplicată prizei.

Aceasta se poate obține cu condiția ca tensiunea aplicată prizei în regim de durată $U_0 \ll U_{\text{lim}}$ deci să nu depășească valoarea din (2.30). Pentru valorile cunoscute ale lui $\theta_{\text{max}} - \theta_0 = 95-90 = 5^{\circ}\text{C}$; $\lambda = 1,2 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ și un coeficient de siguranță 1,05 se obține

$$U_0 = 10,5 \sqrt{\rho} \quad (2.31)$$

Waninow (2.35; 2.36) rezolvă problema încălzirii în regim de durată considerând cazul prizelor din electrozi orizontali la care, după opinia sa apare cedarea căldurii dinspre sol spre aer.

În acest caz, tensiunea maximă admisibilă pe electrozi (față de pământ de la infinit) este dată de relația (2.32)

$$U_0 = \sqrt{\frac{f(\xi)}{G(\xi)}} \cdot 2 \lambda \rho (\theta_{\text{max}} - \theta_0) \quad (2.32)$$

unde $f(\xi) = \ln \frac{L^2}{4h^2}$;

$$G(\xi) = \ln \frac{4L-h}{L}$$

cu L - lungimea electrodului orizontal

h - adâncimea de plantare

d - diametrul electrodului menționat.

Ecuația (2.32) dă pentru U_0 valori superioare lui (2.31)

Neajunsul principal al soluțiilor (2.30) și (2.32) a ecuației încălzirii în regim permanent, constă în faptul că rezolvarea ei nu ține cont de caracterul nelinier al rezistivității solului, a cărei valoare scade cu creșterea temperaturii. Efectul modificării rezistivității cu temperatura constă în diminuarea puterii disipate în elementul de volum și deci, pentru obținerea aceluiaș efect termic se poate admite o creștere a curentului sau o majorare a tensiunilor admisibile pe priză U_0 față de valorile din (2.30) și (2.32).

Experimentări multiple ale autorului, executate asupra unor prize de pământ de diferite configurații, plantate în soluri diferite au permis să se deducă faptul că tensiunile limită U_0 din (2.30) și (2.32) trebuie corectate. Tensiuni aplicate prizei de 2-3 ori mai mari ca cele din relațiile menționate nu conduc la pierderea stabilității prizelor. Explicația acestui fenomen se bazează după o opinie a autorului, pe caracterul nelinier al rezistivității solului.

Considerând cazul prizei sferice de rezistență de dispersie R_p situată în sol infinit cu rezistivitatea ρ având diametrul D_0 , tensiunea U_x la distanța x de centrul sferei și disipând curentul I :

$$U_x = \frac{I \rho}{4\pi x} \quad U_p = U_x \quad x = \frac{D_0}{2} = \frac{D_0}{4} \cdot \frac{D_0}{2} \quad R_p = \frac{\rho}{2\pi \cdot \frac{D_0}{2}}$$

Ținând cont că $I = \frac{U_p}{R_p} = \frac{U_p}{\frac{\rho}{2\pi \cdot \frac{D_0}{2}}}$ (2.33), ecuația (2.33) devine

$$\frac{\lambda}{x} \frac{\partial^2(x\theta)}{\partial x^2} + \rho \left(\frac{I}{4\pi x} \right)^2 = 0 \quad \text{sau} \quad \frac{d^2}{dx^2}(x\theta) + \frac{\rho}{\lambda x^3} \left[\frac{I}{4\pi} \right]^2 = 0 \quad (2.34)$$

Ecuatia (2.34) pentru $\rho = \rho[\theta(x)]$ nu are o rezolvare analitică cunoscută în etapa actuală. Din acest motiv rezolvarea se va da în două etape.

Pentru început, considerind ρ constant cu θ și x se obține /2.30/

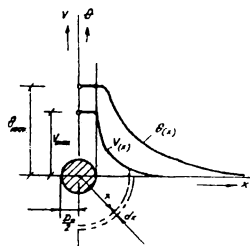
$$\theta = \theta_0 + \frac{\rho}{\lambda} \left[\frac{I}{4\pi} \right]^2 \cdot \frac{1}{x} \left[\frac{2}{D_0} - \frac{1}{2x} \right] \quad (2.35)$$

Pentru $x = \frac{D_0}{2}$; $\theta = \theta_{\max} = 90 \dots 95^\circ\text{C}$ și în acest caz

$$\theta_{\max} - \theta_0 = \frac{\rho}{2\lambda} \left[\frac{I}{2\pi D_0} \right]^2 \quad \text{sau deoarece } U_p = \frac{I\rho}{2\pi D_0} \text{ se obține (2.30)}$$

$$U_0 = U_p^{\text{lim}} = \sqrt{2\lambda(\theta_{\max} - \theta_0)\rho} \quad (2.30)$$

Variația temperaturii solului în jurul electrodului (fig.2.14) conduce la modificarea lui ρ - schimbînd esențial condițiile privind stabilitatea termică a prizei. Din cauza conductivității termice reduse a solului căderea de temperatură $\theta_{\max} - \theta_0$ are loc în imediata vecinătate a electrodului (5-6 cm). Aceasta este valabilă și în cazul prizelor ce-și păstrează stabilitatea cit și în cazul celor instabile termic.



Fenomenele de pierdere a umidității prin creșterea temperaturii peste $90-95^\circ$ și debutul fenomenului de pierdere a stabilității apare întotdeauna în straturile din imediata vecinătate a electrozilor (1-2 cm).

Ridicarea temperaturii stratului de sol vecin cu electrodul, nu modifică practic rezistența prizei R_p , dacă creșterea temperaturii nu depășește temperatura de pierdere a umidității.

În acest caz, pentru prizele stabile, rezistența corespunzătoare temperaturii θ_0

$$R_p = \frac{\rho_{\theta_0}}{2\pi D_0} = \frac{U_p}{I}$$

Fig.2.14. Priza sferică în sol omogen

Din (2.35) rezultă că la $x = \frac{D_0}{2}$; $\theta = \theta_{\max}$ și $\rho_{\theta_{\max}} = \rho_{\theta_0} \cdot e^{-(\theta_{\max} - \theta_0)b}$. (2.32)

$$\theta_{\max} - \theta_0 = \frac{\rho_{\theta_{\max}}}{2\lambda} \left[\frac{I}{2\pi D_0} \right]^2$$

$$\frac{I}{2\pi D_0} = \sqrt{2\lambda(\theta_{\max} - \theta_0) \cdot \frac{1}{\rho_{\theta_{\max}}}}; \quad U_p = \frac{I \rho_{\theta_0}}{2\pi D_0} = \sqrt{2\lambda(\theta_{\max} - \theta_0) \frac{\rho_{\theta_0}^2}{\rho_{\theta_{\max}}}} \quad (2.36)$$

Dacă notăm valoarea U_0 din (2.30) cu U_0^L - (valoarea admisă de literatură) și ținînd cont că $\theta_{\max} - \theta_0 = 65^\circ\text{C}$; $b_{\text{med}} = -0,027$

$$U_0 = U_0^L \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\theta_0}}{\rho_{\theta_{\max}}}} = U_0^L \sqrt{e^{b(\theta - \theta_{\max})}} = U_0^L \sqrt{5,68} = 2,35 U_0^L \quad (2.37)$$

Se observă că valoarea lui U_0 determinată pentru cazul $\rho = \rho[\theta(x)]$ este de circa 2 ori mai mare ca cea indicată în literatură.

Verificarea practică a valorilor U_0 obținute din (2.37) s-a făcut în cadrul experimentărilor prezentate parțial anterior. Un tabel sinoptic al încercărilor efectuate este tabelul 2.3. Schema utilizată la probe și rezultatele experi-

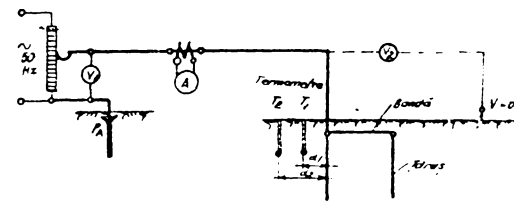
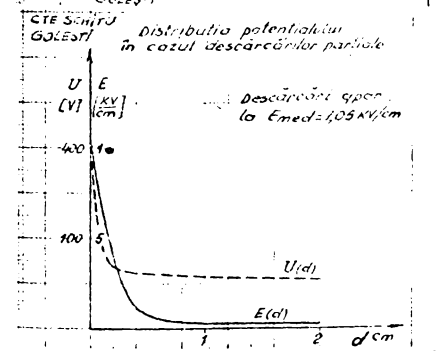
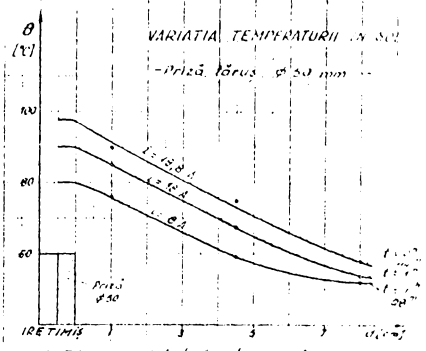
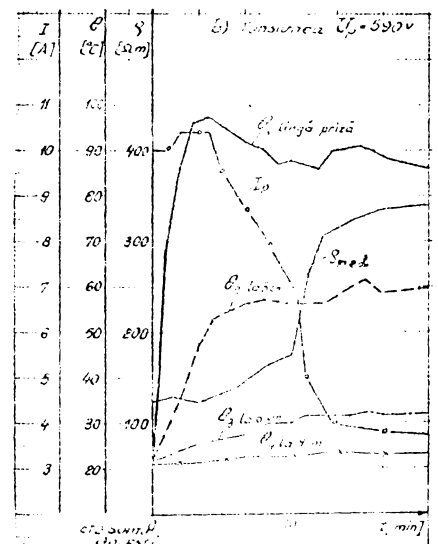
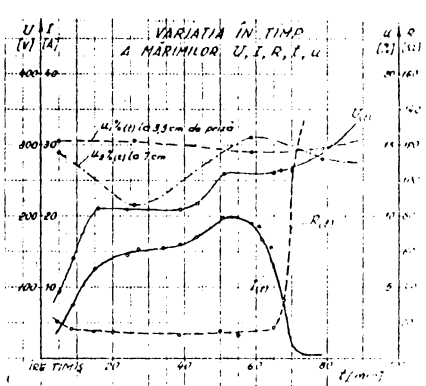
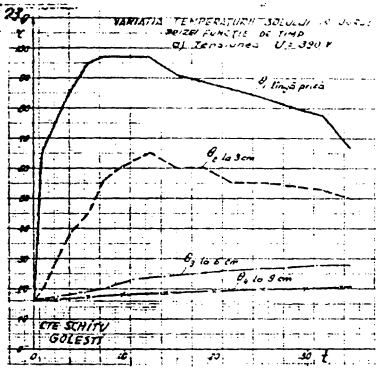


Fig. 2.15. Schema de principiu a încercărilor efectuate și rezultatele experimentale obținute; θ - temperatura; t - timpul; R - rezistivitatea; U - tensiunea; E - intensitatea cimpului; (u %) - umiditatea solului.

mentale sînt prezentate în fig.2.15. Se observă că în toate cazurile la $U < U_{lim}$ (37) priza rămîne stabilă termic.

Tabelul 2.3.

Incercările prizelor simple la stabilitate termică

Nr. crt.	Rezistivitatea solului Ω_m	Tensiunea limită U_0 din (2.37) (V)	Tensiunea limită U_0 din literatură (V)	Tensiunea aplicată prizei (V)	Observații
1	43	205	37	260	Instabilă
2	65	255	130	390	Stabilă
3	94	300	128	290	Stabilă
4	96	306	130	280	Stabilă
5	120	328	140	590	Stabilă
6	143	375	160	620	Stabilă
7	69	245	105	750	Instabilă
8	72	252	107	750	Instabilă

Duratele efective ale solicitărilor s-au calculat din relația (2.25) pentru $\theta_{max} - \theta_0 = 65^\circ C$, controlul temperaturii de regim realizîndu-se cu ajutorul termometrelor T_1 și T_2 din fig.2.15.

2.4. PARAMETRII PRIZELOR LA FRECVENTE INALTE

2.3.1. Procese fizice la trecerea curentului în sol

Solul este un conductor neliniar. Acest caracter al solului s-a pus mai mult în evidență în cazul rezistivităților mari și a cîmpurilor puternice (mai ales în cazul solurilor uscate). Experimentările repetate ale autorului au permis să se tragă concluzia că betonul posedă un puternic caracter neliniar, mult mai semnificativ decît cel al solului.

Incercările s-au făcut atît asupra unor probe paralelipipedice de beton și de sol 70 x 70 x 10 mm; 70 x 70 x 8 mm cu conținut diferit de umiditate, cît și asupra unor stîlpi de beton plantați în sol.

În cazul acestora s-a constatat că aplicarea unei tensiuni sinusoidale epruvetei sau stîlpului, face să treacă prin acestea un curent nesinusoidal, apărînd o puternică armonică de ordinul 3 în curba curentului.

În fig.2.16. se prezintă schema de principiu a încercărilor efectuate iar în fig.2.17 aspectul sinusoidal curentului și tensiunii la probele respective. Se observă că aplicarea unei tensiuni sinusoidale mari stîlpului, dă naștere prin aceasta unui curent nesinusoidal. Aici rezistența neliniară este cea a stratului de beton între armături și sol. Trecerea acestui curent prin rezistențele liniare R_{12} , R_{20} provoacă pe acestea o cădere de tensiune nesinusoidală.

În cazul armăturilor plantate direct în sol, (fără strat de beton) fenomenul de neliniaritate apare la umidități mai scăzute a solului sau la densități mai mari a curentului.

Se poate trage concluzia că betonul stîlpilor plantați în sol nu conține aceiași umiditate ca solul învecinat.

Fenomenele neliniare au apărut practic la toate probele efectuate în sistem - atît la punerile simple și duble la pămînt în rețelele cu neutrul izolat cît și la scurtcircuitate monofazice în rețelele cu neutrul legat la pămînt.

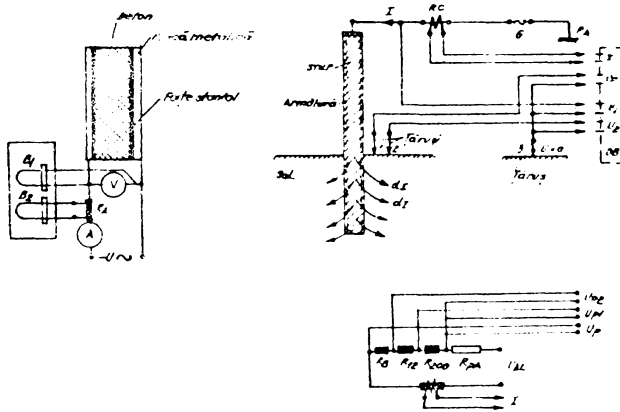


Fig.2.16. Schemele de principiu a încercărilor efectuate

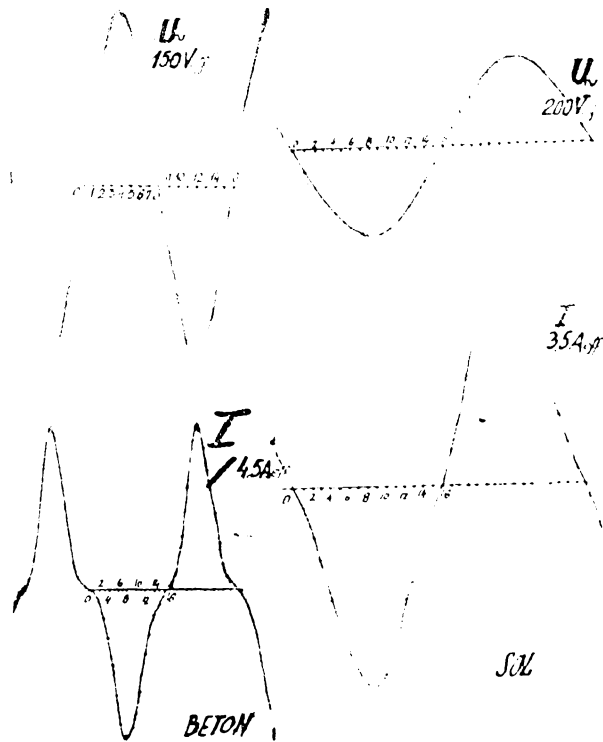
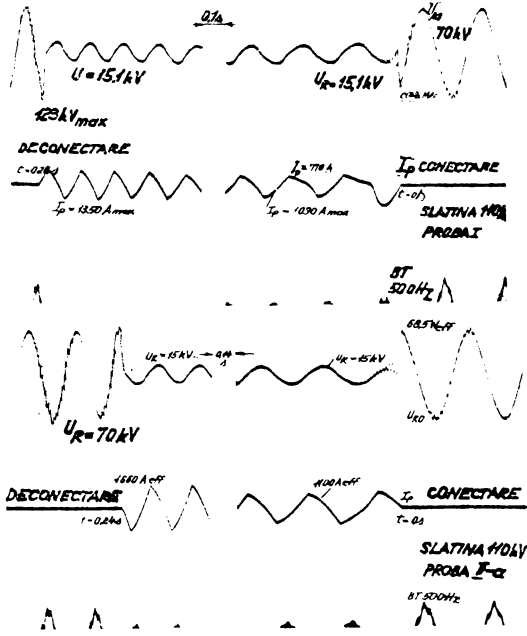
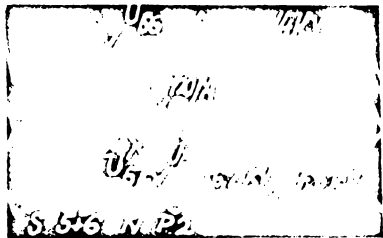
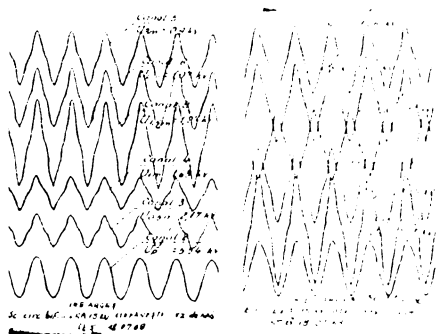


Fig.2.17. Aspectul sinusoidelor obținute la încercările epruvetelor de beton și sol.

In fig.2.18 se indică oscilogramele tensiunilor și curenților la unele probe în sistem efectuate de autor. Armonica 3-a apare atât în cazul rețelelor de MT cât și în cele de IT, după cum se poate remarca și din oscilogramele prezentate în cap.3 al lucrării.



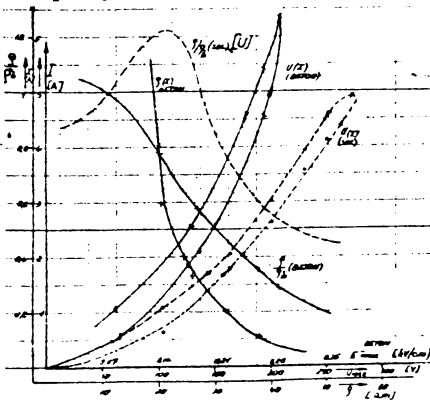
Rețea 110 kV St.Slatina



Rețea 15 kV St.Ștefănești

Fig.2.18. Oscilogramele tensiunilor și curenților la probele în sistem efectuate

Autorul consideră că acest caracter nelinier al solului și betonului favorizează apariția armonicii 3-a în curenții de punere la pământ din sistemele electroenergetice.



In cazul scurtcircuitelor în rețelele cu neutrul legat la pământ efectul neliniarității solului se poate combina cu cel

Fig.2.19. Caracteristicile $U(I)$, $\varphi(U)$, $\varphi(J)$ pentru datele din fig.2.17.

Analiza armonică a curbelor din fig.4.2 pentru proba de sol (1) și beton (2) este prezentată în tabelul 4.1. Calculele s-au executat după un program IRME (testat în repetate rânduri) pe calculatorul IRIS-50 al ISPE.

al saturației miezului magnetic al transformatoarelor.

Caracteristicile dinamice $U(I)$, $\varphi(U)$ și $\varphi(J)$ pentru cazul epruvetelor de beton

și sol dedusă din porțiunile crescătoare și descrescătoare ale sinusoidelor tensiunii și curentului din fig.2.17 sînt prezentate în fig.2.19. Se remarcă apariția unui fenomen asemănător saturației miezului de fier la cîmpuri mari (U-B; I-H).

Atît din curbele din fig.2.19 cît și din oscilogramele din fig.2.18 se poate remarcă apariția unui fenomen contrar fenomenului de histereză; la scăderea tensiunii curentul scade mai mult. Cu titlu informativ, se menționează că în unele probe asupra unor prize care și-au pierdut stabilitatea apar fenomene de genul histerezei; la scăderea tensiunii curentul crește.

Din tabelul 2.4. se observă că în aceleași condiții solul prezintă o neliniaritate mai slabă decît betonul la care distorsiunea curbei curentului atinge 34 %.

Explicația neliniarității provine după opinia autorului din modificarea rezistenței de contact între particulele constitutive ale solului și betonului cu tensiunea aplicată contactelor.

Tabelul 2.4.

Analiza armonică a sinusoidelor tensiunii și curenților în probleme de beton și sol

Ordinul armonicii	Tensiunea aplicată			Curentul prin proba 1 sol			Curentul prin proba 2 beton			Obs.
	Amplit.	Cota	Faza	Amplitudine	Cota	Faza	Amplitudine	Cota	Faza	
1	19,131	100,000	10GR55M	40,493	100,000	7GR22M	24,728	100,000	8GR15M	
2	0,150	0,735	187GR56M	2,321	5,732	193GR61M	5,777	23,363	20GR17M	x
3	0,247	1,293	191GR31M	4,572	11,291	183GR58M	5,955	24,080	191GR25M	
4	0,09	0,470	128GR40M	0,439	1,086	298GR86M	2,794	11,392	205GR37M	x
5	0,112	0,516	74GR19M	0,646	1,596	262GR2M	0,896	3,626	231GR4M	
6	0,032	0,167	28GR26M	0,583	1,440	21GR50M	0,992	4,012	219GR25M	x
7	0,122	0,636	89GR39M	0,257	0,636	81GR45M	0,880	3,559	40GR18M	
8	0,055	0,282	116GR32M	0,239	0,590	236GR44M	0,286	1,159	78GR41M	
9	0,093	0,489	305GR12M	0,174	0,431	218GR24M	0,168	0,681	277GR28M	
10	0,005	0,025	331GR45M	0,422	1,044	252GR36M	0,124	0,501	264GR29M	
11	0,055	0,291	328GR4M	0,250	0,617	273GR19M	0,268	1,087	299GR33M	
12	0,058	0,307	17GR1M	0,111	0,276	145GR46M	0,179	0,724	276GR7M	
13	0,169	0,885	151GR49M	0,126	0,311	264GR43M	0,069	0,280	170GR8M	
14	0,011	0,062	86GR44M	0,241	0,597	137GR31M	0,196	0,794	164GR42M	
15	0,085	0,448	169GR36M	0,355	0,878	241GR27M	0,056	0,229	334GR28M	
Valoare efectivă	19,136			40,836			26,287			
Distorsiune		0,0226=2,26%			0,129=13%			0,339=34%		

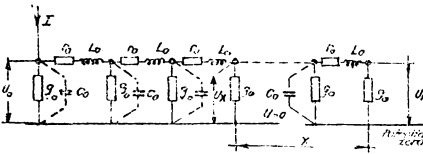
Notă : Factorul de distorsiune s-a definit ca raport între valoarea efectivă a armonicilor și valoarea efectivă totală.

2.4.2. Parametrii lineici ai electrozilor de priză

La frecvențele înalte ce caracterizează regimul de impuls valoarea parametrilor electrici (r_0, L_0) ai electrozilor nu mai poate fi neglijată față de rezistența pămîntului. Priza de pămînt trebuie astfel considerată ca un lanț de cuadripoli a căror schemă este prezentată în fig.2.20.

În acest caz în locul rezistenței de dispersie, priza prezintă o impedanță.

In schema din fig.2.20 r_0 și L_0 sînt rezistența și inductivitatea specifică pe unitatea de lungime a electrodului iar g_0 conductanța specifică transversală a acestuia (inversul rezistenței de dispersie) pe unitatea de lungime.



Datorită impedanței longitudinale mari și atenuării produse de conductanța spre sol a electrodului, tensiunea electrodului prizei (față de punctul de la infinit, cu potențialul zero) în cazul unei solicitări de înaltă frecvență variază de la valoarea U_0 la intrarea în sol, la valoarea U_f la capătul electrodului.

Unda de impuls normalizată are durata frontului 1,2 μ s. Cele mai frecvente descărcări atmosferice au durate ale frontului undei sub 4...5 μ s. Din acest motiv, calculele se vor efectua pentru durată frontului de 1,2...5 μ s corespunzător unei solicitări de înaltă frecvență cu perioada $T = 4 t_f = 5...20 \mu$ s respectiv frecvența

Fig.2.20. Schema prizelor de pământ la solicitările de impuls (parametrii repartizați)

recomandă diferite relații de calcul

$$f = \frac{1}{T} = \frac{10^6}{5} = \frac{10^6}{20} = 200 \text{ kHz} \dots 50 \text{ kHz}$$

a) Conductanța spre sol a elementelor prizei (Rezistența de dispersie)

Pentru rezistența de dispersie a electrozilor orizontali în literatură se recomandă diferite relații de calcul

Margolin /2.37/ indică pentru banda la adîncimea t

$$R_b = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{dt} \tag{2.38}$$

Pentru aceeași configurație Koch /2.28/ propune

$$R_b = \frac{\rho}{2\pi l} \left\{ \ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{\sqrt{(2t)^2 + \frac{l^2}{4} + \frac{l}{2}}}{\sqrt{(2t)^2 + \frac{l^2}{4} - \frac{l}{2}}} \right\} \tag{2.39}$$

Comitetul electrotehnic italian indică relația:

$$R_b = \frac{\rho}{\pi l} \left\{ \ln \frac{2l}{\sqrt{dt}} - 1 \right\} \tag{2.40}$$

In(2.28...2.40) -l- lungimea electrodului orizontal; d - diametrul electrodului; t - adîncimea de plantare; ρ - rezistivitatea solului.

Valorile rezistenței de dispersie specifice pe unitatea de lungime diferă între ele după lungimea prizei luată în calcul dar și după autorul considerat. În tabelul 2.5 se pot urmări valorile rezistențelor de dispersie specifice pentru lungimile de 1,10,100 și 200 m. calculate pentru prize orizontale cu diametrul de 20 mm, plantate la adîncimea de 1 m.

Pentru electrozii verticali relația de calcul a rezistenței este (2.41)

$$R_e = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} \tag{2.41}$$

l - fiind lungimea electrodului vertical, restul notațiilor fiind cunoscute.

Rezistența de dispersie specifică pe unitatea de lungime R_e^* este dată de (2.42).

$$R_e^* = R_e \cdot l = \frac{\rho}{2\pi} \ln \frac{4l}{d} \tag{2.42}$$

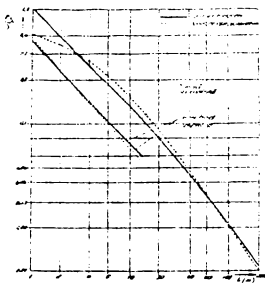
În tabelul 4.2. se observă că în cazul prizelor de întindere redusă (sub 10 m) valorile pentru R_b^* după Margolin și Koch, apropiate între ele, diferă substanțial de cele indicate de CEE, motiv pentru care, în calculele ulterioare se vor utiliza primele relații (2.38 și 2.39). Valorile specifice pentru rezistența de dispersie diferă mult în funcție de lungimea de calcul, datorită efectului de capăt al prizei, zonă în care conducția curentului se efectuează mai ușor.

Rezistența de dispersie specifică pentru electrozii orizontali

Nr. crt.	Autorul	Lungimea electrodului Mărimea considerată	1 m	10 m	100 m	200 m
1	Margolin /2.37/	R_b	0,62 φ	0,135 φ	0,021 φ	0,0115 φ
		$R_b \cdot L = R_b^*$	0,62 φ	1,35 φ	2,1 φ	2,30 φ
2	Koch /2.23/	R_b	0,765 φ	0,137 φ	0,021 φ	0,011 φ
		$R_b \cdot L = R_b^*$	0,765 φ	1,37 φ	2,1 φ	2,30 φ
3	CBI /2.39/	R_b	0,365 φ	0,127 φ	0,020 φ	0,011 φ
		$R_b \cdot L = R_b^*$	0,365 φ	1,27 φ	2,00 φ	2,20 φ

La prizele verticale cu diametrul echivalent $d = 0,4$ m și lungimi între 1...10 m (prize naturale) rezistența specifică liniară variază între 0,367 φ ... 0,735 φ . Pentru a putea face calculele cu mărimi specifice constante se va utiliza și în acest caz o schemă echivalentă cu o rezistență concentrată la un capăt.

Pentru benzile orizontale, schema echivalentă conține rezistențe concentrate la ambele capete. Echivalențele menționate conțin oarecare erori, dar reflectă corect caracterul real al fenomenelor. Interpretarea fizică a acestor echivalențe s-ar putea baza pe considerarea elementelor de priză, terminate cu emisfere metalice ce contribuie la dispersia curenților în sol. Eroarea ce apare în privința liniilor de câmp și a suprafețelor echipotențiale este după aprecierile făcute de Brandolini /2.27/ neimportantă.



Din punctul de vedere al rezistenței de dispersie considerând pentru prizele orizontale $R_b^* = 2,1 \varphi$ și pentru cele verticale $R_b^* = 0,765 \varphi$ diferențele între valorile calculate cu relațiile /2.38/ și /2.41/ și cele aproximative cu schema autorului sînt prezentate în fig. 2.21. Se observă că pentru prizele verticale de 1...10 m coincidența este foarte bună iar pentru cele orizontale cu lungimi peste 2m erorile sînt practic neglijabile.

Conductanța spre sol a elementelor prizelor se determină din relațiile $g_o^* = \frac{1}{R_b^*} / \text{s/m}$; $g_v^* = \frac{1}{R_b^*} / \text{s/m}$.

b) Rezistența electrozilor

Rezistența în curent alternativ de înaltă frecvență diferă substanțial față de cea în curent continuu, datorită efectului pelicular.

Pentru benzile de oțel zincat 40 x 4 mm cel mai frecvent

Fig. 2.21. Echivalența prizelor verticale utilizate la construcția legăturilor între electrozi, zecilor cu elemente în lanț, adîncimea de pătrundere a cimpului în metal (δ) rezultă cu constante g_o^* și g_v^* ;

$d_o = 8$ cm, $dv = 40$ cm, $L = 1...$

200 m, $l = 1...10$ m

$$\delta = \frac{1}{[\pi f \mu \sigma]^{1/2}} = 0,063...0,030 \text{ mm}$$

unde:

f - frecvența impulsului de descărcare (50 kHz...200 kHz);

μ - permeabilitatea oțelului ($\mu = \mu_o \mu_r = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 200$ H/m)

σ - conductibilitatea oțelului (10^7 s/m).

Rezistența în curent de înaltă frecvență devine

$$R_1^* = \frac{l}{\sigma \cdot s \cdot \delta} = \frac{1}{10^7 \cdot 88 \cdot 10^{-3} \cdot [0,063 \cdot 0,030 \cdot 10^{-3}]^{1/2}} = 0,028...0,018 \text{ } \varphi/\text{m}$$

unde: s - secțiunea corespunzătoare adîncimii de pătrundere în oțel (se determină din perimetrul benzii înmulțit cu adîncimea de pătrundere) δ .

Pentru prizele naturale verticale, datorită dimensiunilor mari ale carcăsei de armătură și a apropiierilor relative între toroanele de armătură și axiștenței etrierelor horizontale, secțiunea efectivă a electrodului se poate considera egală cu perimetrul carcăsei de armătură înmulțit cu abținimea de pătrundere δ . În acest caz, rezistența ohmică unitară a "electrodului" carcăsa

$$r_{lc}^* = \frac{1}{\sigma \cdot s_{if}} = \frac{1}{10^7 \cdot 1,6(0,030 \dots 0,063) \cdot 10^{-3}} = 1 \dots 2 \text{ m}\Omega/\text{m}$$

La valoarea obținută pentru r^* trebuie adăugată într-un calcul exact al proceselor stabilizate, rezistența de pierdere în pământ pe calea de întoarcere a circuitului spre infinit. După /2.39/ și /2.40/ aceasta are valoarea

$$r_2^* = \pi^2 f \cdot 10^{-7} \Omega/\text{m} = 0,2 \dots 0,05 \Omega/\text{m}$$

Acest factor nu este luat în considerare în cazul procesului tranzitoriu de descărcare /4.6/.

c) Inductivitatea benzilor horizontale și a electrozilor verticali.

După Kalantarov, inductivitatea liniară L a benzii de oțel zincat 40×1 mm, la curent de foarte înaltă frecvență se determină cu relația în care se neglijează inductivitatea internă.

$$L = L_e = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left\{ \ln \frac{2l}{g} - 1 \right\}$$

unde: g - distanța medie geometrică a perimetrului benzii (m)

l - lungimea benzii (m)

μ_0 - permitivitatea solului, considerată egală cu cea a mediului vid ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m)

Valorile specifice ale lui $L^* = \frac{L}{l}$ variază în funcție de lungimea la care se referă calculele.

Pentru lungimi între 10...100 m L^* variază între 1,36 $\mu\text{H}/\text{m}$ și 1,78 $\mu\text{H}/\text{m}$.

Considerând electrozi rotunzi (raza $r_0 = 7$ mm) se obține pentru $l=10 \dots 100$ m (Secțiunea echivalentă cu a benzii de 400×4 mm)

$$L_1^* = 1,4 \dots 1,87 \mu\text{H}/\text{m}$$

După Mihailov /2.39/ considerînd de asemenea inductivitatea internă nulă ca urmare a efectului pelicular, pentru conducte lungi

$$L_1^* = L_e = 2 \ln \frac{2,1,85}{d_0 \left[\frac{4\pi\sigma \cdot 10^{-7}}{\rho} \right]^{1/2}} \cdot 10^{-7} \text{ H}/\text{m}$$

d_0 - fiind diametrul exterior al conductei [m]

ρ - rezistivitatea solului [$\Omega \cdot \text{m}$]

Pentru rezistivități ale solului între 50...500 $\Omega \cdot \text{m}$ valoarea L_1^* variază între 1,66 $\mu\text{H}/\text{m}$ și 1,90 $\mu\text{H}/\text{m}$, L_1^* variază între 1,66 $\mu\text{H}/\text{m}$ și 1,90 $\mu\text{H}/\text{m}$.

Se poate remarca și aici faptul că apar diferențe sensibile între valorile de calcul indicate de diferiți autori.

d) Capacitatea electrozilor față de sol

Acest element a fost mai puțin studiat în literatură. Valorile capacităților electrozilor față de pământ variază mult cu natura și granulația elementelor de sol, cu umiditatea solului și cu dimensiunile electrodului. O importanță mare o au evident și modul de tratare al suprafeței metalice și presiunea exercitată de sol asupra electrodului.

Din cauza multitudinii acestor influențe și datorită dificultăților de efectuare a unor măsurări reproductibile, valoarea capacității specifice C^* a electrozilor față de sol s-a luat după datele din /2.41/

$$C^* = 40 \text{ pF}/\text{m} = 40 \cdot 10^{12} \text{ F}/\text{m}$$

2.4.3. Variația impedanței prizelor în regim de impuls

Fiecare priză de pământ solicitată la impuls poate fi deci reprezentată printr-un lanț de cuadripol cu constante liniare uniforme repartizate, ca în fig.2.29. Ținînd cont de faptul că parametrii de calcul indicați în literatură variază destul

3/

de mult, calculele se vor efectua pe baza unei scheme echivalente cu parametrii $r_0 = 2...40 \text{ m}\Omega/\text{m}$, $L_0 = 1,5...2 \text{ }\mu\text{H}/\text{m}$, $g_0 = \frac{\sigma_0^5}{\rho_0^5} \dots \frac{1}{\rho_0^5} \text{ s}/\text{m}$, $C_0 = 40 \text{ pF}/\text{m}$.

Rezolvînd, după metodele cunoscute lanțul de cuadripoli /2.41/ se pot scrie următoarele relații cu notațiile din fig.2.20.

$$U_x = U_0 \cdot \frac{\text{ch } \gamma x}{\text{ch } \gamma l}; \quad I_x = I_0 \cdot \frac{\text{sh } \gamma x}{\text{ch } \gamma l} \quad (2.41)$$

$$Z_0 = \frac{U_0}{I_0} = Z_c \text{cth } \gamma L \quad (2.42)$$

$$U_F = \frac{U_0}{\text{ch } \gamma L} \quad (2.43)$$

În (2.41)...(2.43) s-a notat, conform uzanțelor

$$Z_c = \sqrt{\frac{r_0 + j\omega L_0}{g_0 + j\omega C_0}} = \sqrt{\frac{r_0^2 + \omega^2 L_0^2}{g_0^2 + \omega^2 C_0^2}} \cdot e^{j\varphi_c}$$

$$\gamma = \sqrt{(r_0 + j\omega L_0)(g_0 + j\omega C_0)} = \sqrt{(r_0^2 + \omega^2 L_0^2)(g_0^2 + \omega^2 C_0^2)} e^{j\varphi_\gamma} = \alpha + j\beta$$

Pentru elementele din schema în domeniul frecvențelor de 50-200 kHz se poate considera $r_0 \ll \omega L_0$ și $g_0 \gg \omega C_0$. În acest caz Z_c și γ se pot obține din relațiile

$$Z_c = \sqrt{\frac{j\omega L_0}{g_0}}; \quad \gamma = \sqrt{j\omega L_0 g_0}$$

Calculul se vor efectua însă cu valorile exacte ale mărimilor Z_c și γ dezvoltînd în serie $\text{ch } \gamma L$ și $\text{sh } \gamma L$ sau obținut valorile

$$\frac{U_F}{U_0} = f_1(\varphi, l, \omega) \text{ și } Z_e = f_2(\varphi, L, \omega)$$

Calculul s-a executat la calculatorul IRIS - al ISPE București. Rezultatele principale ale calculului s-au dat în fig.2.22.

Valorile calculate pentru Z_c și U_F/U_0 sînt valabile pentru cazul densității lor de curent ce nu conduc la descărcări electrice în sol sub formă de scînteie.

Concluziile principale ce se pot trage din analiza rezultatelor calculului sînt următoarele:

- La frecvențele de 50 Hz și 300 Hz valorile pentru Z_c sînt identice cu cele obținute pentru cazul curentului continuu.

- La frecvențele înalte 50-200 kHz apare o lungime limită de conductor peste care influența lungimii asupra impedanței devine negativă, cu creșterea lui l , impedanța de dispersie crește. Acest rezultat deosebit de important permite să se decidă ca la construirea prizelor pe pământ de protecție împotriva supratensiunilor atmosferice să se utilizeze numai prize de mică extindere (sub 10 m pe orizontală la soluri conductoare).

- Lungimea limită crește mult cu rezistivitatea solului după cum indică fig.2.22.

- Prizele naturale ale LEA a căror lungime nu depășește 5-6 m situate în soluri cu conductivitate normală ($\rho \gg 50...100 \Omega\text{-m}$) pot fi considerate în toate cazurile elemente concentrate, calculul lor se poate face neglijîndu-se atenuarea tensiunii provocată de elementele liniare ale prizei ($\frac{U_F}{U_0} > 0,95$).

- Rezultatele obținute de autor cu metoda exactă, confirmă valorile lui Z_c

obținute de Noack /2.42/ pe baza unui lanț de cuadripoli din 5 elemente (pentru 200 kHz). Față de metoda numitului, cea a autorului este mai expeditivă și mai simplă, permițînd în plus, obținerea valorilor atenuării pe electrozii prizei. Atenuarea de-a lungul electrozilor de priză, definită ca raport între

tensiunea la capătul electrodului și cea la începutul acestuia $\frac{U_F}{U_0}$ este neglijabilă pentru prizele sub 40 m lungime la frecvențe pînă la 300 Hz chiar în soluri foarte bune conductoare (0,96 la sol cu $\rho < 50 \Omega m$).

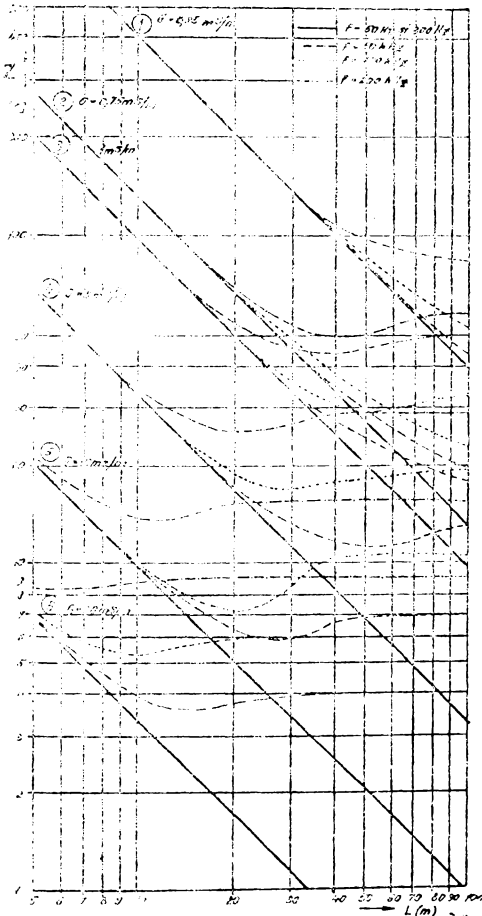


Fig. 2.22. Variația impedanței de dispersie a prizei cu lungimea și frecvența la prizele orizontale și verticale

Bibliografie cap.2

- In: Energie - Technik 17, nr.1, ian.1967, p.22-27.
- /2.15/ REIST, K.H. - Optimale Bemessung von Erdungsanlagen. In: ETZ (A) 97, nr.11, mai 1966, p.376-380.
- /2.14/ REABCOVA, E.I. - Vlianie constructivnih parametrov zamezmiteliei na ix soprotivlenie. In: Electricieshie Stanții 38, nr.3, martie 1967, p.67-72.
- /2.15/ REABCOVA, G.I. - Das stationäre Verhalten von Erdern in Hochspannungsanlagen. In: Energie technik 19, nr.3 martie 1969, p.128-130.
- /2.16/ VORONINA, A.A. - Napriajenia pricosnovenia i potencial slojnih zamezmiteliah vodnorodnoi zemle. In: Elektricesstvo, 90 nr.7 iul.1969, p.52-52.
- /2.1/ BURGSDORF, V.V. - Rasciot zamezmiteliei v neodnorodnih gruntah. In: Elektricesstvo 75 nr.1, ian.1954, p.15-25.
- /2.2/ BURGSDORF, V.V. - Rasciot Slojnih zamezmiteliei v neodnorodnih gruntah In: Elektricesstvo 85, nr.9, sept. 1964, p.7-14
- /2.3/ ESIN, L.E. - Primenenie metoda nave-dennih potencialov pri rascete Slojnih zamezmiteliei v neodno - rocnih gruntah. In: Elektricesstvo 85 nr.9 Sept. 1964, p.1-6.
- /2.4/ IACOBS, I.A. O metodah rasceta slojnih zamezmiteliah raspolojennih v neodnorodnih gruntah. In: Elek - tricesstvo 88 nr.5 Mai 1967, p.24-26.
- /2.5/ IACOBS, I.A. - Rasciot slojnih zamez - liteliei s pomosciu ETVM. In: Elek - tricesvo 88 nr.2 aug.1967, p.21-28.
- /2.6/ ENDRENYI, I. - Evaluation of resist - ivity tests of design of stations grounds in nonuniform soil. In: I.E.E.E. Trans. P.A.S. 69, dec.1963, p.966-970.
- /2.7/ LAURENT, P.G. - Les bases generales des mises a la terre. Bull.S.F.E. nr.7, iul.1957, p.367-402.
- /2.8/ LAURENT, P.G. - Guide pour le calcul, l'execution et le mesurement des prises de terre. In: R.G.E. nr.8 aug.1972, p.453-467.
- /2.9/ BRANDOLINI, A. - Il calcolo di pro - getto di una messa a la terra. In: Elettrotecnica 52, nr.3, mart.1955.
- /2.10/ OSLOM, A.V. Analiticeschii rasciot slojnih zamezmiteliei. In: Elektricesstvo 88, nr.2, febr.1962, p.30-33.
- /2.11/ OSLOM, A.V. - Rasciot priamolineinih zamezmiteliei v mnogosloinoim grunte. In: Izvestia VUZ, nr.2, febr.1970, p.29-33.
- /2.12/ SATTKEL, R. - Berechnung von Masche - nardern in inhomogenem Erdreich

- /2.17/ VORONINA, A.A. - Soprotivlenie rastecaniu slojnih zazemlitatei i napriajenija pricosnoventa v neodnorodnoi zemle . In: Elektricesstvo 90 nr.8 aug. 1969, p.43-46.
- /2.18/ VORONINA, A.A. Soprotivlenie iscustvennih zazemlitatei opor linii elektro - poredaci v neodnorodnoi zemle. In: Elektricesstvo 91 nr.10 oct.1970, p.58-62
- /2.19/ ARAKELIAN, A.M. Rascet soprotivlenia koltevih electrodiv raspolojennih v neodnorodnoi srede. In: Elektricesstvo, 91, nr.10 oct.1970, p.52-57.
- /2.20/ IACOBS, A.I. Statistschii metod rasceta slojnih zazemlitatei v neodnorodnih electriceschih strukturah. In: Elektricesstvo, 90, nr.4, apr.1969, p.49-54.
- /2.21/ IACOBS, A.I. Opredelenie udelnovo soprotivlenia gruntov pri soorujenii zazemliaušchih ustroistv. In: Elektriceschie Stanšii 36 nr.8, aug.1965, p.54-59.
- /2.22/ MULLER, R. Geoelectrische Messungen, eine neue Methode zur Bestimmung der Erdwiderstandes. In: Elektropraktiker 18, nr.6 iun.1964, p.183-191, nr.7, iul.1964, p.243-248.
- /2.23/ ILLNER, G. Geoelektrische Messungen als Grundlage zur Projectierung von Erdungsanlagen. In: Energietechnik, 14 nr.4, apr.1964 p.161-165
- /2.24/ GOIA, L. Metode moderne de determinare a rezistivităţii straturilor de sol. In: Energetica 19 nr.5 mai 1968, p.215-218
- /2.25/ SCHNEIDER, D. Geoelectrische Messverfahren. In: Energietechnik 17 nr.1 ian. 1967 p.3-7
- /2.26/ KAMPFHENKEL, K. Neuberechnete und uberarbeitete zweischiht und Hilfspunkte kurven zur Avswertung geoelektrischer Sondierung. In: Energie technik 18 nr.1 ian.1968, p.18-22
- /2.27/ BRANDOLINI, A. Misure di rezistivi ta in terreno non omogeneo prove au modello. In: Elettrotechnica 60 nr.5 Mai, 1973 p.301-310.
- /2.28/ KOCH, W. Erdungen für Wechselstromanlagen über 1 kV. Berlin, Springer Verlag 1961. ed.III.
- /2.29/ CHVATAL, J. Merni odpor pudy a jeho mereni. In: Energetica 20 nr.6 ian.1970 p.256-270.
- /2.30/ RUDEMBERG, R. Procese tranzitorii in sistemele electroenergetice. Bucureşti, Editura tehnică 1957. Traducere din limba engleză.
- /2.31/ PAVEL, E. Cercetări experimentale privind comportarea in exploatare a pri - zelor de pământ. In: Energetica XIII. nr.3, mart.1965. p.101-112.
- /2.32/ DOLGOV, S.I. Issledovanie zavisimosti, udelnih electriceschih soprotivlenii povii i gruntov ot vlahnosti i temperaturi. In: Vestnik Selisko - hoziaistvennoi nauki. nr.2, febr,1964, p.129-136.
- /2.33/ IACUBOVSKI, I.E. Elektrorazvedka. Moscova. Ed.Nedra. 1964.
- /2.34/ MIHAILOV, M.I. Zazemliauschie ustroistva v ustanovkah elektrosviazi. Moscova. Ed.Sviazi 1971.
- /2.35/ RAHMINOV, K.R. O teplovom rascete rabocih zazemlitatei. In: Elektricesstvo 89, nr.10 oct.1969, p.23-26.
- /2.36/ RAHIMOV, K.R. O termicescoi ustoičivosti zazemliauschih ŷstroistv. In: Elektricesstvo 91 nr.10 oct.1971, p.75-77.
- /2.37/ MARGOLIN, M.I. Toki v zemle. Gosenergoizdat. Moskva.1953.
- /2.38/ RIELLO, G. Impianti di mesa a la terra in basa tensione. Udine Del Bianco 1963.
- /2.39/ MIHAILOV, M.I. Electriceschie parametri podzemnih metaliceschih truboprovodov. Elektricesstvo 84 nr.5 mai 1963, p.60-65.
- /2.40/ OEDING, D. Erdung von Hochspannungsfreileitungsmasten. In BBC Nachrichten 44 nr.10 oct.1962 p.367-394.
- /2.41/ SORA, C. Cuadripolul electric. Editura tehnică, Bucureşti 1963.
- /2.42/ NOACK, F. Berechnung des Wirksamen Widerstand Langestreckter in vertical geschichten Böden. In: Elektrie, R.D.G. nr.5 mai 1968 p.189-191.
- /2.43/ SUFRIN, M. Construcţia şi exploatarea instalaţiilor de legare la pământ. Bucureşti, Editura tehnică 1970.

3. PRIZELE DE PĂMÎNT NATURALE ÎN REȚELELE ELECTRICE

3.1. CALCULUL PRIZELOR DE PĂMÎNT NATURALE

3.1.1. Date generale

În cele ce urmează se vor studia prizele de pământ naturale ale liniilor electrice aeriene (LEA) de înaltă tensiune (IT), medie tensiune (MT) și joasă tensiune (JT), acestea fiind elemente ce contribuie în mod esențial la reducerea costului execuției liniilor electrice.

Calculul prizelor naturale se efectuează pe baza concluziilor din literatură /3.1, 3.2, 3.3/ dar luându-se în considerare rezultatele confirmate practic în multiplele probe efectuate de autor /3.5/.

Principalele indicații din literatură, confirmate de studiile IRME sînt următoarele:

- Betonul uscat este izolanț. Rezistivitatea sa depinde de compoziție și variază între $4,4 \dots 60 \cdot 10^4 \Omega \cdot m$. Străbătut de curenți de mare intensitate, el se distruge devenind sfărîmicios.
- Betonul armat folosit ca electrod, fiind îngropat în sol care are întotdeauna o oarecare umiditate la adîncimea de fundare, absoarbe rapid prin capilaritate umiditatea, devenind astfel conductor.

Variația rezistivității betonului cu umiditatea este prezentată în fig.3.1 /3.3/ iar curba de umezire a betonului în funcție de timpul de ședere în sol în fig.3.2. /3.6/.

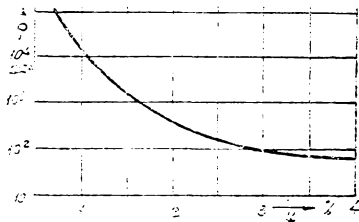


Fig.3.1. Variația rezistivității betonului cu umiditatea

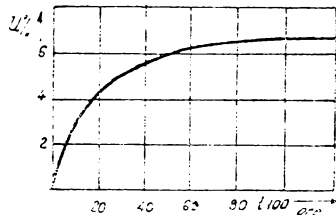


Fig.3.2. Umezirea betonului în funcție de timpul de ședere în sol

- Stratul de beton exterior armăturii, între electrozii de armătură și sol poate fi considerat ca avînd proprietăți identice cu solul înconjurător, betonul primînd astfel conținut de umiditate și săruri ca pământul învecinat. Eroarea ce se face cu acest primar este neglijabilă /4-5%/ /3.1./. Alți autori indică faptul că stratul de beton exterior se echivalează cu o majorare a rezistenței prizei naturale cu 20% /3.4//3.3/. Rezultatele obținute de IRME /3.5/, confirmă indicațiile din /3.4/ care se consideră deci valabile.

- În scopul studierii prin calcul a rezistenței de dispersie și a tensiunilor accidentale din zona prizei naturale, stîlpii sau fundațiile armate se înlocuiesc cu electrozii metalici conținut cu dimensiuni egale cu cele ale carcsei de armătură /3.1./. Această afirmație se justifică prin gradul înalt de umplere cu metal a carcsei de armătură (etriere orizontale, toroane verticale, legături de egalizare) și a fost confirmată pe Replin de rezultatele obținute la măsurările în cave electrofizice și "in situ" efectuate de autor.

Pe baza rezultatelor aproximative, calculul prizelor naturale se simplifică în mod considerabil. Este important să se sublinieze că această concluzie rămîne valabilă numai în privința cazurilor macroscopice, la o distanță de 20-30 cm de fundație. În cazurile mai apropiate, timpul real nu poate fi calculat pe baza rezultatelor considerate simplificatoare.

- Fundațiile de beton nearmat (monolit) cu grosimi mari a betonului nu conțin spațiu pentru curentul electric (grosimea betonului peste 10-20 cm).

Această noțiune din literatură a fost înfirmată de multe probe efectuate pe teren și în laborator, ceea ce considerăm valabilă doar în cazul fundațiilor monolitice nearmate de beton armat cu LEA 110 kV.

În prezentul capitol se utilizează comportarea prizelor naturale la solicitarea de frecvență industrială și impuls. Studiul se referă la următoarele tipuri de încălzire:

- Stilpii LEA - MT și JT - prizele naturale ale stîlpilor de beton vibrat sau centrifugat în fundație burată (alternanțe de pămînt cu pietriș).
- Stilpii metalici ai IT simplu și dublu circuit 110 kV - Fundații armate tip pilot - S_n 110/102 A - pentru stîlpi de susținere
- Stilpii de beton ai LEA 110 kV - Fundații nearmate tip forat injectat pentru stîlpi de susținere.
- Stilpii metalici ai LEA 220 kV - Fundații armate tip pilot sau tip ciupercă pentru stîlpi de susținere tip S_n 220/202 A.

Fundațiile stîlpilor speciali (de întindere, colț, transpoziție etc.) avînd dimensiuni mai mari și fiind armate mai puternic vor suporta în orice caz mai bine solicitările de exploatare.

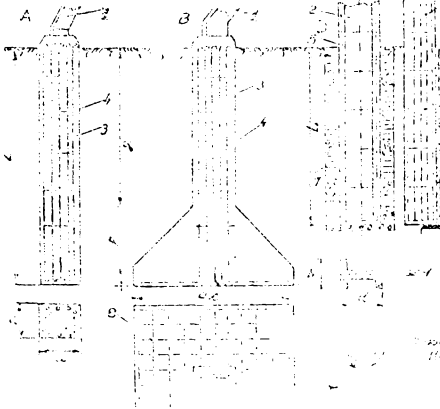
Precizînd elementele de calcul ale acestor prize naturale se poate stabili domeniul de aplicare, posibilitățile de utilizare la construcția instalațiilor de legare la pămînt precum și eficacitatea lor economică.

Pentru calcule se va ține seama de rezultatele sondajelor geoelectrice prezentate în cap.2, studiul extinzîndu-se asupra solului omogen și a cazului a două straturi orizontale. Fată de adîncimea obișnuită la care apare în practică stratificarea ($a=0,5...1,8$ m conf. fig.2.11), prizele naturale studiate ($a_1=1,3...1,4$ m) traversează întotdeauna limita între cele două straturi fiind cuprinse atât în stratul superior (de la suprafața solului) cît și în cel inferior (fig.3.3). Pentru calcule, se vor utiliza relațiile de calcul (2.3.a), (2.3.b), (2.5) obținute în cap.2 după Burghșorff sau după metoda reflexiilor multiple.

3.1.2. Prize singulare

Tensiuni de atingere în pas. Distribuția potențialului

Prizele naturale ale elementelor menționate sînt prezentate principial în fig.3.3. Se observă cu ușurință că ele pot fi asimilate cu electrozi metalici verticali avînd lungimea mult mai mare ca diagonala secțiunii transversale ($d \ll L$). Se menționează încă odată că această considerație este figurată numai referitor la valorile potențialului la distanță de suprafața fundației și la valorile rezistenței prizei. În imediata vecinătate a electrodului, distribuția potențialului pe sol este evident influențată de geometria secțiunii verticale a electrozului de priză, avînd valorile diferite pe diferite direcții.



Pentru calculul prizelor se vor utiliza relațiile (2.3) și (2.5).
 Potențialul produs în punctul M de la suprafața solului / în (2.5) $z=q$; $q=0$ / din sursa d_1 , situată în stratul I (fig.3.3)

Fig.3.3. Prize naturale singulare

- A - fundație armată tip pilot (1 picior),
- B - fundație tip ciupercă (1 picior)
- C - fundație forată - injectată, D - fundație burată.
- 1 - picior de stîlp metalic, 2 - stîlpi de beton, 3 - armături verticale (toroane din oțel \varnothing 8...18 mm, 4 - stiere de consolidare \varnothing 4...8 mm, 5 - toroane pretensionate SMP $6 \times \varnothing$ 3 mm, 6 - mortar ciment injectat, 7 - fundație burată (pămînt și piatră alternativ), 8 - placă metalică de bază în fundație, 9 - radiator beton.

Tipul fundației	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1

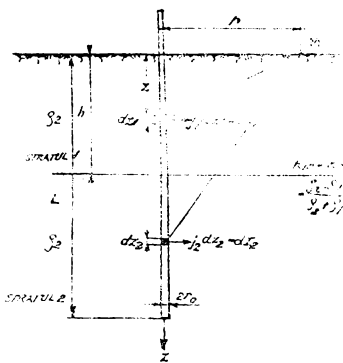
$$V_{M_1} = \int_{z=0}^L \frac{dI_1 \rho_s}{4\pi} \left\{ \frac{1}{\sqrt{r^2+z^2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{z^n}{\sqrt{r^2+(z-2nh)^2}} + \frac{z^{2n}}{\sqrt{r^2+(z+2nh)^2}} \right\} \quad (3.11)$$

Potențialul produs de sursa M_1 , situată

36
 în stratul 2 în acelaș punct M de la suprafața solului conform relației (2.3.b).

$$V_{M_2} = \int_{z=h}^L \frac{\rho_1(1+K)}{4\pi} dI_2 \left\{ \frac{z}{\sqrt{r^2+z^2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{r^2+(z-2nh)^2}} + \frac{K^n}{\sqrt{r^2+(z+2nh)^2}} \right\} \quad (3.2)$$

Considerînd pentru calculul rezistenței curențului distribuit pe lungimea electrodului în strat proporțională cu conductivitatea stratului și notînd



după rezolvarea ecuațiilor se obține:

$$V_M = \frac{I \rho_1 S_1}{2\pi L} \left\{ \ln \frac{\sqrt{r^2+L^2}+L}{r} + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \ln \frac{2nh+L+\sqrt{r^2+(2nh+L)^2}}{-2(n-1)h-L+\sqrt{r^2+[2(n-1)h+L]^2}} \right\} \quad (3.3)$$

Fig.3.4. Electrode vertical în sol cu două straturi

După cîteva transformări:

$$V_M = \frac{I \rho_1 S_1}{2\pi L} \left\{ \ln \frac{\sqrt{r^2+L^2}+L}{r} + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \ln \frac{2nh+L+\sqrt{r^2+(2nh+L)^2}}{2(n-1)h+L+\sqrt{r^2+2(n-1)h+L}} \right\} \quad (3.4)$$

Tensiunea de atingere a electrodului simplu se obține din relația:

$$V_{AT} = V_M^r - V_M^r = \frac{I \rho_1 S_1}{2\pi L} \left\{ \ln \frac{2L}{r_0} \cdot \frac{r}{L+\sqrt{r^2+L^2}} + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \ln \frac{2nh+L}{2(n-1)h+L} \times \frac{2(n-1)h+L+\sqrt{r^2+[2(n-1)h+L]^2}}{2nh+L+\sqrt{r^2+(2nh+L)^2}} \right\} \quad (3.4.a)$$

Tensiunea de pas (p - lungimea pasului)

$$V_{PAS} = V_M^r - V_M^{r+p} = \frac{I \rho_1 S_1}{2\pi L} \left\{ \ln \frac{[\sqrt{r^2+L^2}](r+p)}{r[L+\sqrt{L^2+p^2}]} + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \ln \frac{2nh+L+\sqrt{r^2+(2nh+L)^2}}{2(n-1)h+L+\sqrt{r^2+[(2n-2)h+L]^2}} \times \frac{(2n-2)h+L+\sqrt{(r+p)^2+[(2n-2)h+L]^2}}{2nh+L+\sqrt{(r+p)^2+(2nh+L)^2}} \right\} \quad (3.4.b)$$

Pentru cazul solului omogen $S_2 = S_1 = \rho$; $K=0$; $S_1=1$ (se notează V_M^{HOM})

$$V_M^{HOM} = \frac{I \rho}{4\pi L} \ln \frac{\sqrt{r^2+L^2}+L}{\sqrt{r^2+L^2}-L} = \frac{I \rho}{2\pi L} \ln \frac{L+\sqrt{r^2+L^2}}{r} \quad (3.4.c)$$

$$V_{AT}^{HOM} = \left| V_M^{HOM} \right|_{r_0} - \left| V_M^{HOM} \right|_r = \frac{I \rho}{2\pi L} \ln \frac{2Lr}{r_0 (L + \sqrt{r^2 + L^2})} \quad (3.4.d)$$

$$V_{PAS}^{HOM} = \left| V_M^{HOM} \right|_r - \left| V_M^{HOM} \right|_{r+p} = \frac{I \rho}{2\pi L} \ln \frac{r+p}{r} \cdot \frac{\sqrt{r^2 + L^2} + L}{\sqrt{(r+p)^2 + L^2} + L} \quad (3.4.c)$$

Raportind aceste valori la tensiunea pe priză $U_p = U_M^{r_0}$ se obțin coeficienții de atingere și de pas. Raportind V_M la $V_M^{max} = V_M^{r_0} = U_p$ se obțin coeficienții K_x . Variația coeficientului K_x pentru cazul prizei naturale simple a unui picior de stîlp metalic este prezentată în fig.3.5.

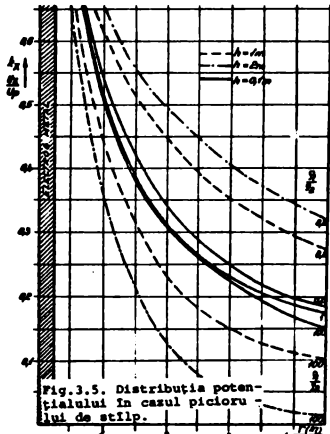


Fig. 3.5. Distribuția potențialului în cazul piciorului de stîlp.

În aceeași figură sînt indicate și valorile K_x pentru cazul solului neomogen, pentru comparație. Se poate remarca o slabă influență a neomogenității solului asupra distribuției potențialului la prizele naturale verticale. În cazul solului omogen, K_x nu depinde de rezistivitatea solului. Explicația fizică a acestei slabe influențe rezidă în constatarea că în cazul stratului superior cu rezistivitate mai mare densitatea curentului este mai redusă și deci căderea de potențial în sol e mai mică, ajungîndu-se la compensarea influenței rezistivității.

Valoarea rezistenței de dispersie a prizei naturale se obține din raportul $\left| \frac{U_M}{I} \right|_{x=r_0}$. Efectuînd calculele și utilizînd notațiile cunoscute ($r_0 \ll L$)

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi L} \cdot \frac{1+K}{1+K(\frac{2h}{L}-1)} \left\{ \ln \frac{2L}{r_0} + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \cdot \ln \frac{L+2nh}{L+2(n-1)h} \right\} \quad (3.5)$$

Aici r_0 este raza echivalentă a electrodului. Pentru electrozi de secțiune patrată se poate considera $r_0 = \frac{a}{2}$, a fiind latura patratului [2.43]

La electrozii cu secțiune dreptunghiulară $r_0 = b$; b fiind latura maximă a dreptunghiului.

Se menționează că alți autori indică pentru r_0 alte valori ($\frac{2a}{\pi}$) dar efectul acestor diferențe este neesențial r_0 apărînd în relație sub logaritm (5% pentru electrozii obișnuiți).

Pentru cazul solului omogen cu $K = 0$; $\rho_1 = \rho_2 = \rho$

$$R_{HOM} = \frac{\rho}{2\pi L} \cdot \ln \frac{2L}{r_0} \quad (3.5.a.)$$

Se poate remarca ușor faptul că rezistența R apare ca o sumă a doi termeni

$$R = R_H + R_{RF} = \underbrace{\frac{\rho_1}{2\pi L} \frac{1+K}{1+K(\frac{2h}{L}-1)} \cdot \ln \frac{2L}{r_0}}_{R_H} + \underbrace{\frac{\rho_1(1+K)}{2\pi L \{1+K(\frac{2h}{L}-1)\}} \sum_{n=1}^{\infty} K^n \ln \frac{L+2nh}{L+2(n-1)h}}_{R_{RF}} \quad (3.5.b.)$$

Acest rezultat se poate interpreta în modul următor. Rezistența de dispersie corespunzătoare solului neomogen R , este egală cu rezistența unei prize de aceeași dimensiuni situată într-un sol omogen, la care se adaugă valoarea unei rezistențe suplimentare, rezultată din reflexii multiple succesive la nivelul suprafeței de separație între straturi (analogie optică). Pentru exactitate se menționează că

valoarea R_H din (3.5.b) nu este identică cu R_{HOM} din (3.5.a).

Pentru lungimile obișnuite ale elementelor verticale de prize naturale, s-au calculat valorile următoarelor rapoarte

$$A = \frac{R}{R_{HOM}} \quad ; \quad B = \frac{R}{\varphi_1}$$

Calcululele s-au executat la calculatorul IRIS-50 al ISPE București, în limbaj FORTRAN, pentru diferiți parametri ai straturilor de sol. Pentru a nu consuma ore multe la calculator, metoda iterativă aplicată s-a extins pînă la un n corespunzător unei precizii de 0,1% a rezultatului, cu totul corespunzătoare scopurilor lucrării.

Rezultatele obținute la calcule sînt prezentate în fig. 3.6 și 3.7 (valorile rapoartelor A și B).

Trebuie subliniat că A s-a dat în figură ca medie a valorilor obținute pentru diferiți L între 1,5...4 m.

Valoarea $B = \frac{R}{\varphi_1} = R^*$ pentru $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$ poartă numele de rezistență geometrică a prizei și se definește ca valoare a rezistenței de dispersie pentru solul cu rezistivitate unitară. Ea poate fi considerată ca un factor de geometrie a prizei.

Extinzînd nomenclatura la cazul solului neomogen, autorul definește valoarea B drept rezistența de dispersie geometrică (rezistența prizei corespunzătoare soluului cu stratul superior de rezistivitate unitară).

Rezistența prizei se determină simplu din R^* cu relația $R = R^* \cdot \varphi$.

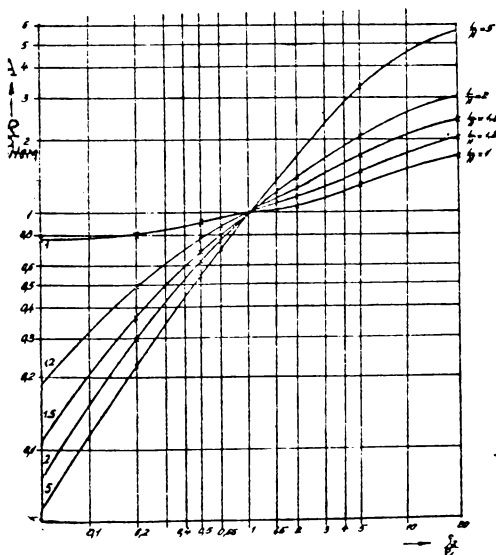


Fig. 3.6. Variația rezistenței prizelor naturale pentru diferiți parametri ai straturilor de sol

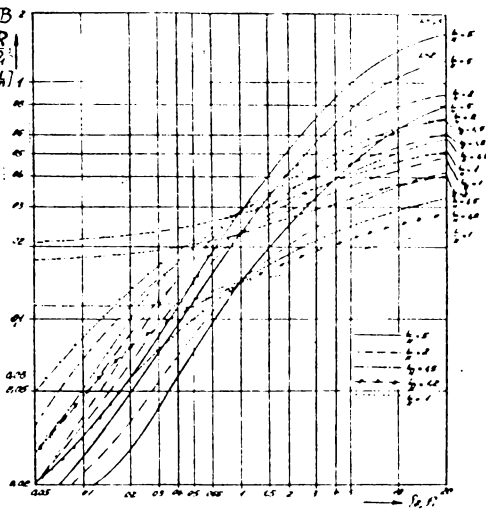


Fig. 3.7. Variația rezistenței geometrice a prizelor R^*

Se remarcă influența importantă a neomogenității soluului asupra rezistenței de dispersie geometrice și asupra rezistenței prizelor naturale.

Valorile calculate ale rezistenței prizelor obținute de autor sînt confirmate de rezultatele obținute prin modelare în cuvă de Kersunțev (vezi cap. 4) într-o publicație recentă.

Valorile pentru R din (3.5) calculate pentru dimensiunile carcaseri de armătură vor fi amplificate conform celor menționate cu coeficientul $K_B = 1,25$ care

consideră influența betonului stîlpului. De asemenea cînd se utilizează fundațiile burate din straturi succesive de pămînt și piatră, pentru obținerea rezistenței practice de dispersie R_d valorile de calcul se mai amplifică cu coeficientul de burare $K_{BUR} = 1,4 \dots 1,5^P / 3,10 /$

Pentru calcule practice simplificate Mihailov /3.10/ indică o relație aproximativă de determinare a rezistenței prizelor în sol cu două straturi orizontale.

$$R = \frac{1}{2\pi \left(\frac{h}{\rho_1} + \frac{L-h}{\rho_2} \right)} \ln \frac{2L}{r_0} \quad (3.6)$$

notațiile fiind cele cunoscute. Valoarea lui R din (3.6) diferă de cea din (3.5) cu mai puțin de 3 % pentru $l/h < 6$ și cu mai puțin de 15 % pentru $l/h \geq 1,5$ /3.10/.

3.1.3. Prize complexe. Distribuția potențialului. Rezistențe de dispersie.

S-au considerat prize complexe, prizele naturale ale stîlpilor liniilor de înaltă tensiune, formate în general prin așezarea în colțurile unui dreptunghi (patrat) a fundațiilor singulare de tipul celor prezentate în fig.3.3.

Datorită apropierii lor, fundațiile singulare se ecranează reciproc și evident, distribuția potențialului și rezistența de dispersie nu se pot calcula pe baza datelor referitoare la un singur picior de fundație.

Conform principiului suprapunerii efectelor, potențialul într-un punct M din zona celor patru picioare de fundație va fi dat de relația (3.7) iar tensiunea prizei de pămînt de relația (3.8).

$$V_M = \sum_{i=1}^4 V_M^i \quad (3.7.)$$

$$U_p = \left. V_M \right|_{r_1=r_0} = U_M^0 + U_M^{12} + U_M^{13} + U_M^{23} \quad (3.8.)$$

unde:

V_M^i - este potențialul produs de electrodul i în punctul M

$r_1=r_0$ - este echivalența a electrozilor verticali de priză ($r_0 \ll L$)

Pentru calcule se consideră distribuția curenților prin picioarele de fundație, uniformă, datorită simetriei așezării lor. În cazul particular al așezării picioarelor fără benzi de legătură în sol, curenții distribuiți de un picior

$$I_1 = \frac{I_{TOT}}{4}$$

În cazul solului omogen V_M^i are valorile date de relația (3.4.c) iar în cazul solului neomogen, valorile din (3.4).

a) Solul omogen

Pentru început s-a luat în considerare cazul a 4 electrozi verticali de lungime $L=2,5$ m distanțați între ei la 4,5 m avînd secțiune transversală circulară cu diametrul $d = 0,4$ m așezați în virfurile unui patrat. Legătura electrică între electrozi se realizează prin conducte situate în afara solului.

Pentru acest caz

$$V_M = \frac{I_1 \rho}{2\pi L} \cdot \frac{1}{4} \left\{ \ln \frac{\sqrt{r_1^2 + L^2} + L}{r_1} + \ln \frac{\sqrt{r_2^2 + L^2} + L}{r_2} + \ln \frac{\sqrt{r_3^2 + L^2} + L}{r_3} + \ln \frac{\sqrt{r_4^2 + L^2} + L}{r_4} \right\}$$

unde r_i - este distanța punctului M considerat la una din electrozilor i . Notînd $m_i = \frac{r_i}{L}$ se obține:

$$V_M = \frac{I_1 \rho}{8\pi L} \left\{ \ln \frac{\sqrt{m_1^2 + 1} + 1}{m_1} + \ln \frac{\sqrt{m_2^2 + 1} + 1}{m_2} + \ln \frac{\sqrt{m_3^2 + 1} + 1}{m_3} + \ln \frac{\sqrt{m_4^2 + 1} + 1}{m_4} \right\} \quad (3.9)$$

În fig.3.3 este prezentată distribuția potențialului în zona electrozilor studiați, indicîndu-se și curbele echipotențiale pe suprafața solului. Distribuția

Distribuția potențialului Φ_x în jurul prizelor naturale ale stîlpilor
LEA 110 kV sol neomogen $\rho_2 = 100 \Omega \cdot m$

Direcția de măsură Φ_1, Φ_2	Dis- tan- ța x/m	În lungul laturii					Pe diagonală				
		Adîncimea primului strat					Adîncimea primului strat				
		0,1 m	0,2 m	0,5 m	1 m	2 m	0,1 m	0,2 m	0,5 m	1 m	2 m
100	0,5	0,839	0,835	0,822	0,794	0,710	0,830	0,826	0,813	0,785	0,698
	1	0,664	0,657	0,633	0,583	0,423	0,644	0,638	0,614	0,563	0,399
	2	0,476	0,468	0,441	0,380	0,174	0,454	0,446	0,420	0,360	0,153
	3	0,369	0,362	0,337	0,280	0,076	0,351	0,344	0,320	0,265	0,065
	4	0,300	0,294	0,272	0,221	0,035	0,287	0,280	0,260	0,211	0,030
20	0,5	0,839	0,835	0,823	0,797	0,724	0,830	0,826	0,814	0,788	0,712
	1	0,664	0,657	0,635	0,588	0,448	0,645	0,638	0,616	0,568	0,424
	2	0,476	0,469	0,443	0,386	0,204	0,454	0,447	0,422	0,365	0,183
	3	0,369	0,362	0,339	0,285	0,104	0,351	0,345	0,322	0,279	0,092
	4	0,300	0,294	0,272	0,226	0,060	0,287	0,281	0,261	0,215	0,053
20	0,5	0,839	0,835	0,823	0,797	0,724	0,830	0,826	0,814	0,788	0,712
	1	0,664	0,657	0,635	0,588	0,448	0,645	0,638	0,616	0,568	0,424
	2	0,467	0,469	0,443	0,386	0,204	0,454	0,447	0,422	0,365	0,183
	3	0,369	0,362	0,339	0,285	0,104	0,351	0,345	0,322	0,270	0,092
	4	0,300	0,294	0,273	0,226	0,060	0,287	0,281	0,261	0,215	0,053
5	0,5	0,839	0,836	0,827	0,808	0,762	0,830	0,827	0,817	0,798	0,757
	1	0,665	0,659	0,642	0,607	0,518	0,646	0,640	0,622	0,580	0,495
	2	0,477	0,471	0,450	0,407	0,289	0,455	0,449	0,428	0,386	0,267
	3	0,370	0,365	0,345	0,304	0,184	0,353	0,347	0,328	0,288	0,170
	4	0,301	0,296	0,279	0,242	0,130	0,288	0,283	0,266	0,230	0,121
3	0,5	0,840	0,837	0,830	0,816	0,785	0,831	0,828	0,821	0,806	0,774
	1	0,666	0,661	0,647	0,621	0,560	0,647	0,642	0,628	0,601	0,539
	2	0,478	0,473	0,456	0,423	0,343	0,456	0,451	0,435	0,402	0,320
	3	0,371	0,366	0,351	0,318	0,236	0,353	0,349	0,333	0,302	0,220
	4	0,302	0,298	0,283	0,254	0,170	0,286	0,284	0,271	0,242	0,165
1	0,5	0,842	0,842	0,842	0,842	0,842	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833
	1	0,670	0,670	0,670	0,670	0,670	0,651	0,651	0,651	0,651	0,651
	2	0,483	0,483	0,483	0,483	0,483	0,461	0,461	0,461	0,461	0,461
	3	0,376	0,376	0,376	0,376	0,376	0,358	0,358	0,358	0,358	0,358
	4	0,306	0,306	0,306	0,306	0,306	0,292	0,292	0,292	0,292	0,292
1/3	0,5	0,849	0,854	0,866	0,878	0,891	0,840	0,845	0,857	0,870	0,884
	1	0,682	0,692	0,714	0,740	0,767	0,663	0,673	0,696	0,722	0,751
	2	0,497	0,510	0,540	0,575	0,617	0,475	0,487	0,518	0,554	0,600
	3	0,389	0,401	0,432	0,471	0,520	0,370	0,382	0,414	0,452	0,502
	4	0,317	0,329	0,359	0,398	0,450	0,303	0,314	0,344	0,382	0,434
1/5	0,5	0,854	0,863	0,879	0,894	0,908	0,846	0,854	0,872	0,887	0,902
	1	0,692	0,708	0,741	0,771	0,801	0,673	0,690	0,724	0,755	0,787
	2	0,510	0,531	0,577	0,621	0,668	0,487	0,510	0,555	0,601	0,650
	3	0,400	0,422	0,471	0,522	0,578	0,322	0,404	0,452	0,504	0,561
	4	0,328	0,349	0,397	0,450	0,510	0,314	0,334	0,382	0,435	0,496

44
 potențialului s-a calculat la calculatorul IBM 4120 al DSI, programarea fiind realizată în limbaj ALGOL. Rezultatele din fig. 3.8. sunt prezentate procentual față de $V_M^{\text{max}} = U_p$.

Tensiunea U_p se obține făcând în (3.10) $r_1 = r_0$ și notând distanța r între picioarele de fundație $r_{12} \dots r_{14}$:

$$U_p = \frac{I \cdot \rho}{8\pi L} \cdot \left\{ \ln \frac{2L}{r_0} + \ln \frac{\sqrt{m_{12}^2 + 1} + 1}{m_{12}} + \ln \frac{\sqrt{m_{13}^2 + 1} + 1}{m_{13}} + \ln \frac{\sqrt{m_{14}^2 + 1} + 1}{m_{14}} \right\}$$

Pentru datele din fig. 3.8, rezistența ansamblului de patru electrozi devine atunci $R_4 = 0,085 \rho$. Rezistența de dispersie geometrică definită anterior are deci valoarea $R_4^* = 0,085 \left(\frac{1}{m}\right)$. Față de valoarea rezistenței unui singur electrod, calculată cu relația cunoscută (3.5.a) $R^* = 0,250 \left(\frac{1}{m}\right)$, se obține un coeficient de ecranare sau utilizare C_u .

$$C_u = \frac{R^*}{4R_4^*} = 0,735$$

corespunzând cu datele din literatură [2.27]. Valorile obținute confirmă corectitudinea calculului.

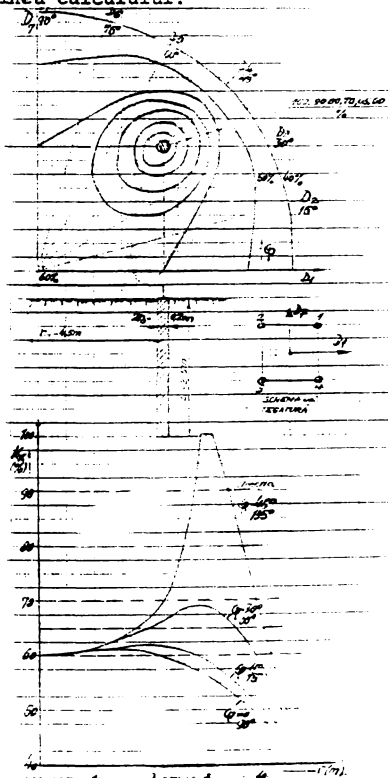


Fig. 3.8. Distribuția potențialului și curbele echipotențiale pentru priză naturală din 4 picioare de stâlp (se desenată doar partea corespunzătoare 1 picior)

În general, valoarea coeficientului de utilizare C_u , ce se poate calcula din (3.10) și (3.5.a) depinde de rapoartele m_{12}, m_{13}, m_{14} fiind cu atât mai aproape de 1 cu cât aceste valori sînt mai mari decît cu depărtarea între electrozi e mai mare.

b) Solul neomogen

În mod analog s-au executat calculele pentru priză naturală a unei fundații de stîlp metallic de 110 kV - S_N 110-102 situată în sol neomogen. Ținînd cont de dificultățile majore ale calculului seriilor infinite din relațiile (3.4) și (3.7), în cazul solului neomogen nu s-au studiat curbele echipotențiale ci numai distribuția potențialului de-a lungul a două direcții.

Direcția I-a - diagonala patratului format de picioarele stîlpului

Direcția a II-a - de-a lungul unei laturi a patratului.

Unele din rezultate obținute la calcul sînt prezentate în tabelul 3.1.

3.2. COEFICIENTII DE IMPULS ȘI CURENȚII DE PROTECȚIE AI PRIZELOR NATURALE

3.2.1. Descărcarea electrică în sol

În regim de impuls, prizele de pîmînt se comportă diferit față de frecvența industrială. Principalele caracteristici ale regimului de impuls care contribuie la diferențierea în comportarea prizelor sînt date de durata foarte mică a fenomenului (echivalentă cu o solicitare la frecvența foarte înaltă) de amplitudinea importantă a curentului prin priză și de viteza deosebit de creștere a acestuia. Ținînd cont de aceste elemente, rezistența la impuls a prizelor R_i se poate determina

cea de la frecvența industrială R , aparind așa niște coeficienți de impuls α_1

$$R_1 = \alpha_1 \cdot R$$

Conform cercetărilor în special de natură experimentală întreprinse de E.A.Reabcova, A.I.Vainer și A.V.Korsunțev se consideră că prin creșterea tensiunii aplicate rezistivitatea solului scade /4.7/.

Dependența $\rho(E)$ reflectă un caracter nelinier al rezistivității solului în special în domeniul cimpurilor mari.

Scăderea mare a rezistivității este practic echivalentă cu mărirea dimensiunii electrozilor de priză. De acești factori trebuie să se țină seama la determinarea caracteristicilor de impuls a prizelor în general și a celor naturale în special.

La valori importante ale cimpului electric din sol $E_{sc}=1,2...1,4$ kV/cm (tensiunea de scinteiere în sol), apar mici descărcări sub formă de scinteie. Acest fenomen conduce la o scădere importantă a căderii de tensiune în sol, în jurul electrozilor, ceea ce face ca în cazul unei densități constante a curentului rezistivitatea solului să se micșoreze deosebit de mult.

Se consideră pentru simplificare ρ neglijabil și în acest fel fenomenul se poate echivala cu o majorare a dimensiunilor electrozilor.

La creșterea în continuare a tensiunii de priză și cu o oarecare întârziere, descărcarea în scinteie se transformă în descărcare în arc, cu gradienti deosebit de reduși ai potențialului în zona arcului.

Deoarece gradientii în sol scad, de la valori maxime în apropierea electrozilor la valori minime la distanța de intrarea curentului, pentru curenti mari de impuls, în apropierea prizei apar zonele indicate în fig.4.5 și anume /3.11/:

- zona arcului
- zona de scinteiere
- zona conductivității variabile cu E
- zona conductivității constante cu E

Scăderea rezistivității cu creșterea lui E constituie cauza scăderii coeficientului de impuls α_1 . Deoarece $E = j \cdot \rho$ la un curent de impuls

dat, intensitatea cimpului electric, în sol crește cu ρ , ceea ce face ca α_1 să scadă în soluțiile rău conductoare. De asemenea, cu cât sînt mai mici dimensiunile liniare ale prizelor, cu atât densitatea curentului j este mai mare și coeficientul de impuls scade. Coeficientul α_1 , scade

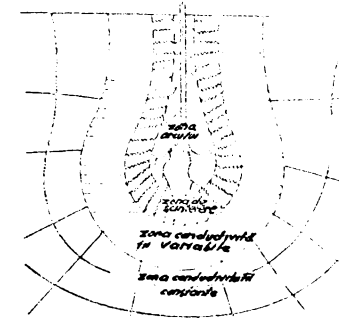


Fig.3.9. Caracterul proceselor din sol la curenții mari de impuls

de asemenea cu creșterea curentului I .

La stabilirea parametrilor de impuls ai prizelor naturale se consideră conform celor stabilite în cap.2 că acestea au lungimi inferioare lungimii critice și în acest caz, calculele se pot efectua considerind $U_p = U_0$ (cap.2).

3.2.2. Coeficienții de impuls și curenții de protecție ai LEA 110-400 kV

Determinarea coeficienților de impuls ai prizelor naturale se face utilizând teoria similitudinii propusă de Korsunțev /3.12/. Aceasta introduce conform teoremei π (Venicoș) două criterii de similitudine π_1 și π_2 .

$$\pi_1 = \frac{R_1 S}{\rho} = \text{constant}; \quad \pi_2 = \frac{1}{S^2 E_{str}} = \text{constant}$$

unde:

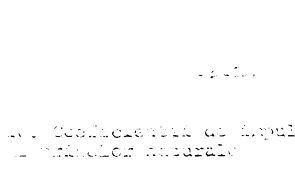
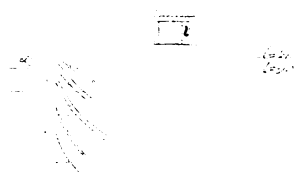
S - este o mărime caracteristică a prizei (lungime, diametru)

E_{str} - tensiunea de străpungere a solului. Restul notațiilor sînt cunoscute.

Utilizarea practică a acestor criterii de similitudine la calculul prizelor la impuls se face în modul următor.

În literatură sînt indicate valorile coeficienților de impuls pentru anumite categorii de sol, anumite dimensiuni ale electrozilor și anumite valori ale curenților de impuls. Aceste valori ale coeficienților de impuls sînt valabile și

20
 unde α_1 este coeficientul de protecție al prizelor, α_2 este coeficientul de protecție al stâlpilor, π_1 și π_2 să se
 considere constante. Se menționează că această condiție rămân valabile numai pentru
 prizele concentrate /prizele naturale îndeplinesc această condiție după cum
 se demonstrează în cap.2/.



Coeficienții de impuls ai prizelor de pământ
 simple considerate ca electrozi verticali cu lung-
 simile între 2...5 m care sînt calculați de autor
 se indică în fig.3.10 a și b. Pentru prizele în-
 vecinate coeficienții de impuls se determină pe
 baza coeficienților de ecranare reciprocă ai ele-
 mentelor vecine (coeficienții de utilizare C_u),
 amplificați cu coeficienții de impuls ai unui
 element.

Pentru calculul coeficienților de impuls ai unui
 element se consideră o repartitie practic unifor-
 mă a curentului de impuls prin elementele identi-
 ce (picioare) ale stîlpului. Pentru a ține seama
 de neuniformitatea curentului prin elementele
 prizei, coeficienții de impuls se majorează cu
 5...15 % /3.7/.

Curenții de impuls de valoare ridicată distrug
 betonul prin explozie. Densitatea critică la care
 acest fenomen se poate petrece în cazul fundațiilor
 lor cu grosime redusă a betonului între armătură
 și sol (3...3,5 cm) depășește 17,5 A/cm²/3.11/. În
 această situație prizele naturale studiate, supor-
 tă fără a se distruge, curenții de trăsnet mai mari
 decît cei măsurați pînă în prezent (250 kA). Din
 acest punct de vedere prizele naturale au stabi-
 litatea necesară la curenții de trăsnet, în toate
 condițiile.

Valorile curenților de protecție cu LEA se pot
 determina pe baza rezistenței la impuls a prizelor.
 Rezistența la impuls a unei prize se determină din
 relația:

$$R_1 = R \alpha_1 \pi_1^2 \cdot C_u \cdot C_1$$

unde: R_1^g este rezistența geometrică a prizei.

Curenții de protecție se determină ca raport între
 tensiunea de ținare garantată a izolației și rezis-
 tența la impuls a prizei stîlpului. Trebuie menționat că se ia în considerare prin-
 cipal individualitatea stîlpului fără a se considera influența stîlpilor vecini datorită
 învecinării mari a stîlpului de gardă.

$$I_{pr} = \frac{U_{ținere}^{impuls}}{R_1} \quad (3.11)$$

Curenții de trăsnet mai mici ca cei de protecție nu conduc la conturnarea
 inversă a izolației, la lovituri directe în stîlpii LEA. Curenții superiori celor
 de protecție conduc la conturnarea inversă a izolației la solicitarea de impuls.
 Curentul de conturnare conduce la apariția unui arc de frecvență industrială care
 provoacă în rețelele cu neutrul legat la pământ declanșarea liniilor.

Calculul curenților de protecție ai LEA s-a făcut prin încercări în modul
 următor:

Se consideră un curent de trăsnet printr-un picior al stîlpului I_C^{KA} .
 Pentru acesta se calculează coeficientul de impuls al prizei $\alpha_1(I_C, \varphi)$. Din valorile
 rezistenței prizei se determină rezistența la impuls ($R_1^g \cdot \varphi \cdot \alpha_1$) și se compară cu
 curentul de protecție rezultat cu cel de plecare. Dacă există o bună coincidență sau
 $I_C > I_{calc}$ 'picioare' calculul se consideră acoperitor. În caz contrar se alege un
 alt curent de trăsnet și se continuă calculul în modul indicat.

Datele obținute sînt prezentate în tabelul 3.2.

Există o bună relație între intensitatea curenților de trăsnet și rezistivita-
 țea solului. Curenții de intensități mai mari apar în zonele de șes, cu rezistiv-
 itate mică ($\rho < 100 \Omega m$), în solurile cu rezistivitate mare curenții de trăsnet pro-
 ducîndu-se la valori mici).

Rezistențele la impuls și curenții de protecție ai prizelor naturale

Nr. crt.	Tipul stîlpului și tensiunea de ținere a izolației	Rezistivitatea solului ($\Omega \cdot m$)	Coeficient de impuls de calcul (picior)		Rezistența de dispersie geometrică R_g^* (1/m)	Rezistența de impuls (Ω)	Curent de protecție de calcul (kA)
			I_c (kA)	$\alpha_{imp.}$			
1	SVC, SVS 6-15-20 kV (125 kV max)	50	Sub	0,9	0,45	20	sub 5 kA
		100	5 kA	0,85		38	
		150		0,8		53	
		500		0,6		135	
2	S_n 110102 110 kV (550 kV ^{max})	50	20	0,70	0,150	5,2	100
		100	16	0,60		10,2	50
		150	10	0,70		15,7	35
		500	3	0,60		45,0	12
3	SC 1165 FORAT 110 kV (550 kV) $h_g=3$ m	50	50	0,5	0,166	4,15	132
		100	45	0,5		8,30	66
		150	45	0,45		11,2	49
		500	20	0,25		20	27
4	S_n 220 kV 1050 kV ^{nov}	50	50	0,6	0,100	3,0	350
		100	45	0,5		5,0	210
		150	35	0,5		7,5	140
		500	14	0,40		20,0	56
5	PASS-400 400 kV 1400-1640 kV	50	100	0,60	0,08	2,4	600
		100	80	0,60		4,80	310
		150	60	0,55		6,60	230
		500	30	0,30		12,0	120

După Dolghinov /3.11/ în zonele cu rezistivitate mare ($500 \Omega \cdot m$ și mai mult, în zone de munte) curenții de 20 kA sau mai mult apar numai în 15 - 16 % din cazuri.

Din acest punct de vedere se poate considera că în conformitate cu datele din tabelul 3.2. în rețelele de 110 - 400 kV, prizele naturale asigură protecția împotriva supratensiunilor atmosferice practic în toate categoriile de teren.

În schimb prizele naturale din rețelele de medie tensiune nu pot asigura nivelul de protecție împotriva conturnării inverse (curenții de protecție sub 5 kA). Realizarea acestei condiții nu se poate face decât cu prize artificiale extrem de costisitoare (sub 2-3 Ω) și din acest motiv conturnarea inversă la lovituri directe în stîlpii de medie tensiune se consideră ca un risc acceptat mai cu seamă că ea nu este obișnuit urmată de declanșarea liniilor.

Se poate menționa că în orice caz, prizele naturale ale acestor stîlpi corespund ca protecție împotriva conturnării la tensiunile induse la lovituri în elementele apropiate de linie la care curenții în stîlpii de medie tensiune sînt mult mai mici ca cei din tabelul 3.2.

3.3. UTILIZAREA PRACTICĂ A PRIZELOR NATURALE LA LEA PESTE 1 kV.

În prezentul capitol sînt analizate principalele probleme legate de aplicarea practică, în exploatare, a prizelor naturale la liniile electrice aeriene peste 1 kV.

3.3.1. Stîlpii de înaltă tensiune

a) Prizele stîlpilor metalici

Principalele probleme ridicate de utilizarea în exploatare a prizelor naturale ale stîlpilor metalici de înaltă tensiune sînt următoarele:

- asigurarea continuității electrice între piciorul stîlpului metalic și solul înconjurător
- analizarea condițiilor de protecție împotriva tensiunilor accidentale de atingere și de pas în zona acestor prize.

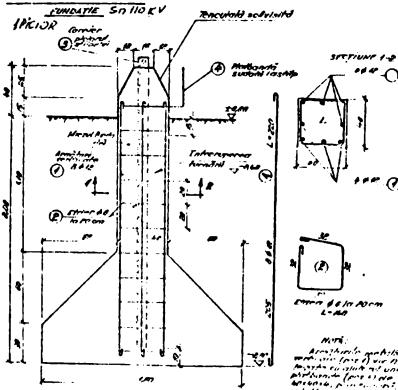


Fig. 3.11. Legarea armăturilor fundației la stîlp.

- verificarea stabilității termice a acestor prize naturale

Asigurarea continuității electrice

Primul deziderat se poate respecta executîndu-se o legătură metalică sigură prin sudură între piciorul stîlpului metalic (oțel cornier) și armăturile de fundație (oțel beton) fig.3.11. Nerespectarea acestei cerințe poate pune sub semnul incertitudinii utilizarea prizei naturale putînd conduce la mari neplăceri în exploatare (o solicitare importantă a miezului fundației în care apare o densitate excesivă de curent: $(2-4 \text{ A/cm}^2)$ ce poate conduce la pierderea stabilității acestuia). Șuntarea miezului de beton al fundației cu o legătură metalică exclude acest pericol limitînd solicitarea la stratul subțire de beton dintre armatură și sol, (densitate mult mai mică a curentului în această zonă). Obligativitatea realizării practice a acestei legături propusă de autor în 1969, este însoțită de M.E.E. și stipulată în instrucțiunea PE-121/70 I.S.P.E.București.

Confirmarea practică a necesității obiective a legăturii metalice picior-armatură a surut și în cadrul unor probe efective de scurtcircuit în sistem. Probele menționate au fost efectuate pe LEA 110 kV Borzești-Galați în zona Pocsani (IRE Galați), LEA 110 kV Slatina-Drăgănești Olt lîngă stația Slatina (IRE Pitești) și pe LEA 110 kV Solex - Tamădău, în apropierea stației Solex (IRE București).

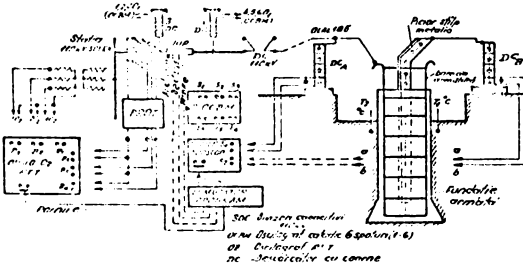


Fig. 3.12. Schema de principiu a înregistrărilor efectuate în cadrul probelor este prezentată în fig.3.12.

Curentul de scurtcircuit s-a introdus în armăturile metalice ale fundației, nlegate metalic cu armătura piciorului de stîlp. La apariția tensiunii pe barele de armatură, pe piciorul metalic al stîlpului, apare aproximativ aceeași tensiune fie prin străpungerea betonului (proba Pocsani) fie prin contornarea acestuia (proba Solex și Slatina I).

Această constatare confirmă faptul că prin legătura metalică stîlp-armatură oțel beton se diminuează mult efortul termic, preluat de betonul prizei naturale.

Verificarea condițiilor de protecție împotriva accidentelor

Intrucît după cum s-a văzut, calculul analitic al tensiunilor de atingere și pas și al rezistențelor de dispersie este deosebit de laborios mai ales pentru cazul fundațiilor armate tip ciupercă (cu talpă), pentru scopurile practice s-a utilizat modelarea în cuva electrolitică. Rezultatele practice obținute la măsurările în cuvă, confirmate de datele obținute la probele ulterioare în sistem sînt prezentate în cap.4.

Pentru determinarea tensiunilor reale în caz de defect autorul utilizează relația:

$$U_{AT,PAS} = I^{ST} \cdot K_{AT,PAS} \cdot R_g^* \cdot S_L \tag{3.12}$$

- unde:
- I^{ST} - curentul de defect ce se închide prin picioarele stîlpului în sol ($20\% I_{SC}^0$, restul se închide prin firul de gardă /2.40/).
 - $K_{AT,PAS}$ - valoarea coeficientului maxim de atingere sau pas

R_{st} - rezistența geometrică a stîlpului - egală cu rezistența de dispersie corespunzătoare solului cu rezistivitatea unitară.
 R_{st} - rezistivitatea medie a solului corespunzătoare adîncimii de fundare.
 Cu valorile din cap.4 se obține pentru puterea plafon de scurtcircuit din sistem $I_{sc}^{max} = 10 \text{ kAeff}$

$$I_{AT,PAS}^{max} = 2...10 \text{ kV}$$

Analiza rezultatelor arată că prizele naturale ale stîlpilor și fundațiilor, cu coeficienți de pas inferiori celor de atingere.

Prizele naturale ale stîlpilor și ale fundațiilor acestora nu pot asigura condițiile de protecție împotriva atingerilor indirecte. De aceea, în zonele cu circulație frecventă ele trebuie completate cu prize artificiale corespunzătoare. Acest element neplăcut este compensat parțial de frecvența redusă a stîlpilor de IT din aceste zone.

Verificarea stabilității termice a prizelor naturale

Verificarea se face pentru regimul de scurtcircuit, pentru un timp al protecției de rezervă a liniei de 1 s. Curenții maximi de scurtcircuit ce pot fi suportați de armăturile metalice ale stîlpului, în contact cu betonul sînt calculați în tabelul 3.3.

Calculul s-au făcut pe baza relației (2.25) dedusă de autor în cap.2. Pentru calculul curentului de scurtcircuit monofazic s-a considerat că la un defect prin firul de gardă se închide 80% din curentul de scurtcircuit iar prin stîlp 20% (conform datelor din literatură) /2.20/.

Tabelul 3.3

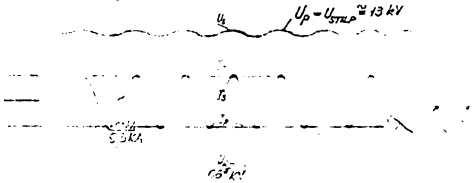
Curenții maximi suportați de armăturile prizelor naturale

Rezistivitatea solului	Suprafața de contact cu betonul		Curentul admisibil pentru 1 picior de stîlp (kA)				Curent de scurtcircuit monofazic maxim (kA)	
	1 picior		După autor		După literatură			
	110 kV	220 kV	110 kV	220 kV	110 kV	220 kV	110 kV	220 kV
100	0,83	1,2	1,95	2,86	1,3	1,9	32	46
200	0,83	1,2	1,37	2,1	0,91	1,4	22,5	32,3
300	0,83	1,2	1,05	1,58	0,70	1,05	17,8	26,5
400	0,83	1,2	0,78	1,17	0,52	0,78	13,2	19,5

Se observă că armăturile metalice ale fundațiilor suportă solicitările maxime de curent ce apar în sistemul electroenergetic național ($I_{plafon}^{max} = 10 \text{ kA}$ la rezistența de trecere nulă) practic în toate categoriile de sol.

Pentru a verifica modul cum suportă efectiv prizele naturale condițiile de solicitare s-au efectuat o serie de probe în sistem.

Proba din stația Solex . S-a introdus un curent mare $I_p = 6,6 \text{ kAeff}$ prin armătura fundației unui singur picior al unui stîlp metalic 110 kV al LEA Tămădău. Durata fenomenului $t = 0,25 \text{ s}$. S-a măsurat tensiunea pe armătură și tensiunea pe piciorul metalic al stîlpului, picior nelegat la armătură, care au fost găsite identice. Proba s-a repetat de două ori la interval scurt (durata totală 0,5 s). Fenomenul este prezentat în fig.3.13.



Din punct de vedere al efectului termic, solicitarea respectivă este echivalentă cu un scurtcircuit monofazic cu curent $I_{SC}^{TOT} = 90 \text{ kAeff}$

Fig.3.13. Înregistrarea fenomenelor în cadrul probei Solex

considerind cele patru picioare și firul de gardă. Probele nu au condus la deteriorarea armăturii și nici a betonului, deși solicitarea respectivă a fost atât de severă. Temperatura solului în vecinătatea fundației nu a depășit 50° (temperatura aerului era de 5°C).

Proba din stația Slatina II. S-a stabilit un curent de circa 880 A în priza naturală (armătura) unei fundații S_n 110102 A, construită special în acest scop. Proba a constat din patru etape succesive, durata totală fiind de circa 7 minute.

Cu ocazia probelor s-a constatat o evaporare intensă a apei din sol, uscarea pământului, încălzirea betonului, șgomote puternice de arc (fig.3.14). Uscarea pământului a făcut ca rezistența de dispersie să crească de la 8 la 21 ohmi dar după câteva zile de la încheierea probei valoarea ei a redevenit de circa $9\ \Omega$. Betonul și armătura metalică a fundației și-au păstrat în totalitate integritatea.



Fig.3.14. Aspecte din timpul probei din stația Slatina

OL 38 + 5 inele consolidare $\varnothing 20$ reprezintă o priză solidă și sigură).

Pentru a verifica dacă armătura proprie a stîlpului SC - 1164 fig.3.15 are contact cu solul prin fundația de beton monolit, (caz constatat la stîlpii de MT) s-a imaginat o probă pe viu în sistem.

Proba a constat în aplicarea unei tensiuni importante (16 kV de la un scurtcircuit monofazic 110 kV) pe armătura stîlpului și verificarea curentului dispersat de aceasta în sol. Ea a avut loc pe LEA Buzău-Ploiești - racordat Mizil (fig.3.16).

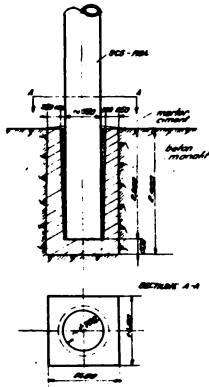


Fig.3.15. Stâlpi de beton SC3-1160-1164 fundație monolit

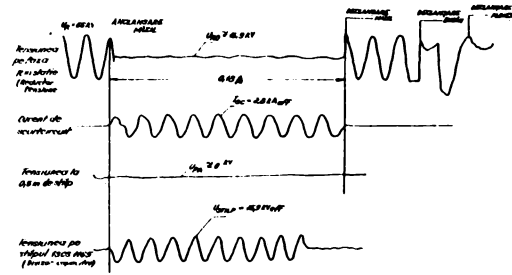


Fig.3.16. Proba pe LEA Mizil scurtcircuit monofazic pe LEA Ploiești-Buzău

Concluzia principală obținută din înregistrările la această probă provine din constatarea că tensiunea la 0,5 m de stîlp este nulă deși tensiunea pe stîlp era 16 kV. Betonul fundației monolit prezintă deci calitate practică izolantă. Rezultă cu certitudine că nu se poate conta pe priza naturală a stîlpilor de beton de 110 kV montați în fundație de beton monolit.

Soluția optimă pentru remedierea acestui neajuns constă în utilizarea fundației forate (fig.3.17).

Această soluție asigură un cost mai mic al liniei, fără a lua în considerare economia la construcția prizelor). După cum s-a arătat anterior priza naturală a fundațiilor forate asigură protecția LEA împotriva supratensiunilor atmosferice practic în toate zonele de sol.

de priză, prin mecanice ale prizelor forate-injectate probate aceluși prin
 la priză proba mecanică dau o lină satisfăcătoare în exploatare.

În concluzie se recomandă creșterea la utilizarea fundațiilor
 de priză forate-injectate. Avantajele acestui sistem de fundare
 sînt: greutatea redusă a prizelor.

- Fiabilitate sporită prin trecutul pe unitatea de lucrime a liniilor,
 în condițiile unui grad ridicat de siguranță;
- posibilitatea de a realiza prizele de pământ artificiale la
 costuri reduse și în zone neelocuite;
- posibilitatea de a merge la mecanizarea lucrărilor de
 construire a fundațiilor liniilor.

Medii tensiune

Mediile tensiune din rețelele cu neutru nelinear la
 tensiune nominală general al rețelelor de m.t. din RSR) au prize
 de priză care asigură din punct de vedere al protecției
 împotriva efectelor electrice prin atingeri indirecte și din
 punct de vedere al protecției împotriva supraîncălzirii atmosferice
 și a incendiilor. În condițiile de perfecționare și optimizare
 a prizelor de priză s-a ajuns la rezultate corective care
 permit în unele cazuri aceste prize să completează cu pr
 fiabilitate (evidență mai ușor dimensionate) iar riscul
 de incendiu și de explozie a liniilor la lovituri directe
 să fie redus la un nivel acceptabil.

În cazul în care se pune problema de utilizare a prizelor
 de priză de beton de m.t. sînt legate de stabilitate
 și de durabilitate în special la defectele de durată din
 cauza mediei tensiune (timp de defect de ordinul minutelor
 și orelor).

Medii de înaltă tensiune în considerare:

Mediile de înaltă tensiune la pământ în rețelele concentrate sau necom-
 puse de priză de ordinul a 10 A și timp până la 2 ore;

Mediile de înaltă tensiune deconectate de protecție (curenți de
 priză de ordinul a 10 A și timp de ordinul secundelor).

Mediile de înaltă tensiune de priză duble la pământ nedecoupluate de priză
 (curenți de priză de ordinul minutelor) după STAS 7334-70.

Calculul prizelor din care în cazul procesului stabilizat se realizează condi-
 ția de priză este următoarea:

$$I_{pr} < (1,3) \sqrt{2A \varphi (\theta - \theta_0)}$$

Pentru medii de priză $\theta_0 = 125 \text{ V}$, $\text{lock} / 1,20 /$ indică timpul din priză

în funcție de valoarea suprafeței solicitate termică respectivă. Datele după Kodt de
 priză și în funcție de coeficientul $(1,20)$ pentru priză $S = \text{ct}$ sînt indicate în coloana
 din tabelul 3.4. Se consideră coeficientul de toate energiile disipate servesc
 pentru calculul prizelor. Conform calculului autorului pentru prizele naturale
 ale prizelor de priză tensiune cu rezistență dispersie (în medie la $L=1,3 \dots 1,2 \text{ m}$,
 $\theta_0 = 100 \dots 125 \text{ V}$) și suprafața de priză cu coeficient $\varphi = 1,0 \text{ m}^2$, dura-
 țile admise de solicitare sînt prezentate în tabelul 3.4.

Tabelul 3.4.

Durata de solicitare maximă în funcție de medii la stăpîni m.t.

Mediile de priză	Durata maximă admisă pentru solicitarea		Durata admisă la stăpîni m.t. pentru curenți de defect (după autor)		
	mediei de priză		I=20	I=100	I=500
	după Kodt	După autor	min.	min.	sec.
100	100	200	100	7,5	13
150	150	400	50	3,75	9
200	200	800	47	1,8	4,5
300	300	1200	21	1,25	3

Se observă că timpul admis la solicitările prizelor naturale este redus dar în completă concordanță cu datele experimentale ce s-au obținut la probele "in situ".

Pentru a urmări valabilitatea datelor de calcul s-au executat o serie de probe practice în sistem. Acestea au fost necesare și pentru a urmări condițiile de stabilitate termică a betonului.

Problele au constat în puneri simple la pământ cu $I_p = 10...20$ A. corespunzător rețelelor compensate.

S-au executat de asemenea puneri la pământ duble cu curenți sub limita de reglaj a protecției cît și defecte de acest tip de conectate de protecție.

În timpul probelor s-au urmărit și oscilografiat mărimile indicate în fig.3.18.

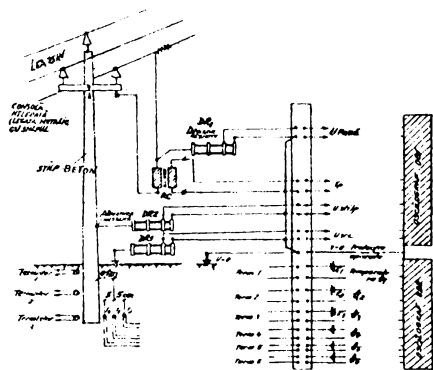


Fig.3.18. Schema montajului și mărimile înregistrate la probele asupra stîlpilor LEA de M.T.

voacă deteriorarea stîlpilor la bază prin topirea armăturilor sub nivelul solului. Fenomenul debutează după un timp scurt de la apariția dublei puneri la pământ (dependent de rezistivitatea solului), conducînd la topirea masivă a toroanelor de armătură, la vitrificarea betonului și a solului. Deteriorările sînt determinate de arcul electric ce apare în sol după pierderea umidității acestuia.

Fenomenul respectiv de distrugere se produce mai rapid la stîlpii cu armătură pretensionată dar s-a făcut simțit și la stîlpii vibrați sau centrifugați (la timpi de defect mai lungi).

Deteriorarea armăturilor în porțiunea din sol, se poate petrece în soluri cu rezistivitate ridicată ($\rho > 150...200 \Omega m$) și la puneri simple la pământ cu curenți de $20...30$ A, dar numai după un timp foarte lung (2-7 ore). Fenomenul este de altfel citat și în literatura de specialitate /3.13/.

- Pentru funcționarea în condiții sigure a rețelelor trebuie exclus din exploatare regimul de dublă punere la pământ nedeconectată și trebuie limitată funcționarea cu simplă punere la pământ în rețelele de MT necompensate. Se recomandă în acest sens extinderea utilizării în rețelele de MT a protecțiilor sensibile la duble puneri la pământ - de tipul, de exemplu FRC - filtru releu de componentă inversă.

- Dublele puneri la pământ deconectate de protecție ($t=1...3$ s) nu produc deteriorări stîlpilor de beton,

- Aspectul armaturilor stîlpilor în porțiunea de contact direct cu solul indică faptul că se poate considera că betonul stîlpului își pierde umiditatea și se deteriorează prin arc concomitent cu solul învecinat.

- În cadrul probelor efectuate s-a remarcat apariția fenomenelor neliniare, curenții de dublă punere la pământ avînd o pronunțată armonică de ordinul 3. Pe - neomul provine din caracterul neliniar al betonului și solului subliniat în cap.2.

Fenomenele principale observate în timpul probelor în sistem asupra acestor stîlpi sînt prezentate în fig.3.19.

Concluziile principale obținute în cadrul probelor "in situ" sînt următoarele:

- Stîlpii de beton ce nu au legătură metalică între armătura stîlpului și a consolei se deteriorează în porțiunea de îmbinare a acestor elemente la curenții mici de punere la pământ ($I_p < 10$ A) în timp

foarte scurt (de ordinul minutilor).

La curenții mici de punere la pământ, deteriorările sînt mascate deci cu atît mai periculoase. La curenții mai mari ($I_p > 20$ A)

deteriorările sînt vizibile de pe sol.

Din acest motiv, se impune obligativitatea asigurării unei legături metalice sigure între stîlp și consolă, deci a continuității metalice pe calea de trecere a curentului de la suportul izolatorului MT la pământ.

Fenomenul de distrugere a stîlpului și consolei se produce cu predilecție la stîlpii de beton precomprimat SE-1, datorită fuziunii mai rapide a oțelului SBP din care sînt confecționați acești stîlpi.

- Curenții de dublă punere la pământ nedeconectată de protecție (circa 100 A) pro-

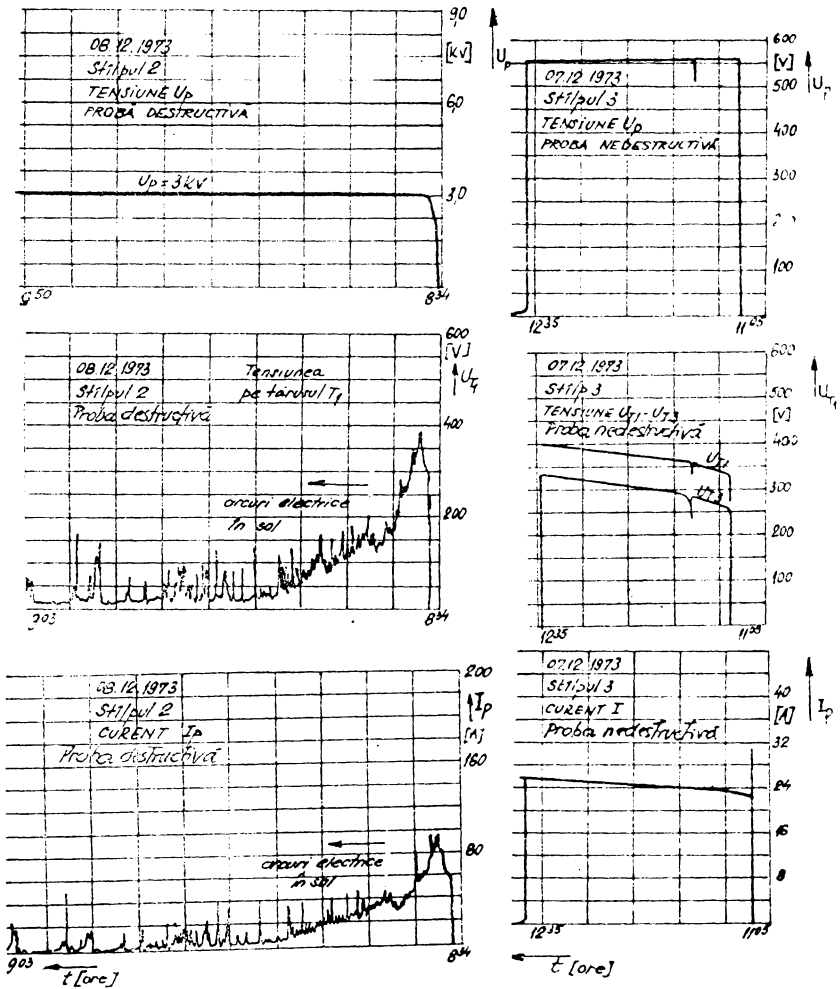
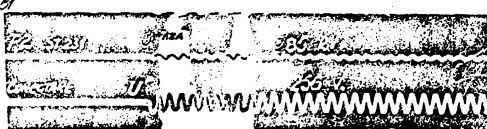
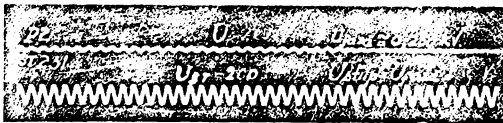


Fig.3.19.a. Inregistrările curenților și tensiunilor la stâlpii cu legătură C-S. Proba nedestructivă $I = 24 \text{ A}$. Proba destructivă $I_2 = 120 \text{ A}$. Se observă apariția arcului electric în sol.

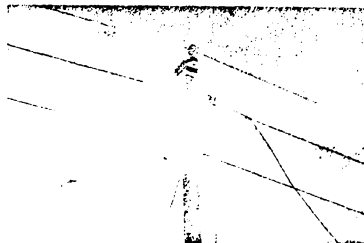


b) Inregistrarea tensiunii pe consola și priza la stîlpul fără legătură C-S la simpla punere la pămînt.

Aceiași probă după circa 3 secunde de la punerea la pămînt



c) Arcul de punere simplă la pămînt $I=20$ A la stîlpul fără legătură C-S



d) Arcul de dublă punere la pămînt la stîlpul fără legătură C-S



e) Evaporarea intensă la dubla punere la pămînt nedeconectată de protecție



f) Deteriorări la porțiunea de îmbinare C-S prin arcu de P la P simplă $I=25$ A



g) Deteriorări la stîlpul SE-1 prin dubla punere la pămînt nedeconectată



h) Deteriorări prin dubla punere la pămînt nedeconectată la stîlpi SE

Fig. 3.19 continuare

3.4. UTILIZAREA PRIZELOR NATURALE IN REțeleLE DE JOASA TENSIUNE

3.4.1. Generalități

În majoritatea rețelelor de distribuție de joasă tensiune din țara noastră se utilizează protecția împotriva electrocutărilor prin legare la nul (conductor neutru legat repetat la pământ). Aceasta constă în legarea la conductorul neutru a tuturor elementelor metalice care pot veni accidental sub tensiune.

Modul sintetic în care trebuie realizată protecția prin legare la nul în cadrul unei rețele de j.t. alimentată dintr-o rețea aeriană de medie tensiune este prezentat în fig.3.20.

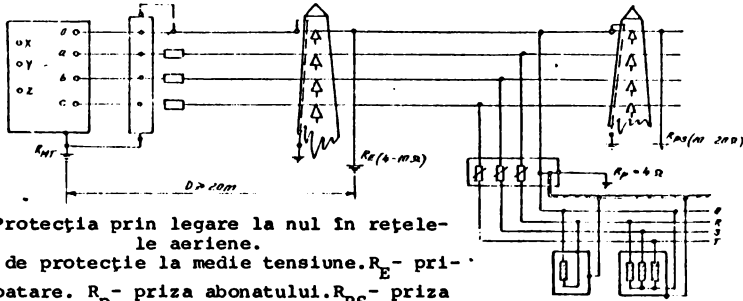


Fig.3.20. Protecția prin legare la nul în rețelele aeriene.

R_{MT} - priza de protecție la medie tensiune. R_E - priza de exploatare. R_P - priza abonatului. R_{PS} - priza pe traseul nulului LEAC---varianta a II-a de legare a stelajului tabloului de joasă tensiune (la nul)

În cazul stîlpilor de beton, pe lângă prizele R_E , R_P și R_{PS} se mai utilizează legarea nulului la prizele naturale ale stîlpilor. În acest caz, condițiile în care se realizează protecția împotriva accidentelor se modifică față de situația utilizării exclusive a prizelor artificiale.

În prezentul capitol se analizează condițiile în care se realizează valorile tensiunilor de atingere nepericuloase la stîlpii și în instalațiile în cazul folosirii prizelor naturale ale stîlpilor de j.t. Analiza s-a executat prin calcule verificate prin probe pe un model construit în IRME și prin probe efective pe o rețea reală.

3.4.2. Tensiunea pe nul în caz de defect

a) Prize concentrate

În cazul unei linii de joasă tensiune ce pleacă dintr-un post de transformare avînd nulul legat la pământ la post prin rezistența R_E și la capătul plecării prin rezistența R_P , tensiunea pe nul în punctul de defect față de punctul de potențial zero U_P este dată de (3.12) iar tensiunea pe priza postului U_E de (3.13).

$$U_P = \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{Z_f}{Z_P}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_E}{R_P}} \quad (3.12)$$

$$U_E = \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{Z_f}{Z_O}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_P}{R_E}} \quad (3.13)$$

unde: U este tensiunea de linie a rețelei (V); Z_f - impedanța conductorului de fază (Ω); Z_O - impedanța conductorului de nul (Ω).

Restul notațiilor, cuprinse și în fig.3.21 sînt cunoscute.

Variația raportului $\frac{U_P \sqrt{3}}{U} = U_P^*$ în funcție de $\frac{R_E}{R_P}$ este dată în fig.3.21.

Se observă ca tensiuni inferioare valorile periculoase (65 V) se obțin pentru rapoarte $\frac{R_E}{R_P} = 0,65 \dots 0,9$. Se vede că în realizarea protecției împotriva accidentelor determinant este raportul $\frac{R_E}{R_P}$ și nu valorile absolute ale celor două rezistențe.

Pentru $R_E=0$ $U_E=0$ $U_D=U_O=U_f$. $\frac{Z_O}{Z_O+Z_f} = \frac{U_f}{U_D}$; pentru $R_D=0$ $U_D=0$ $U_E=U_f$.

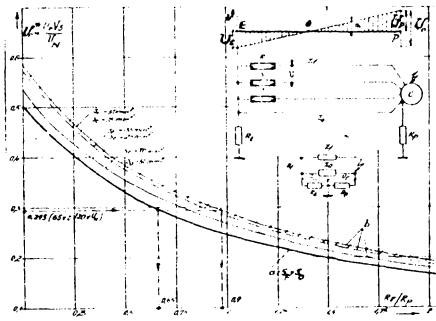


Fig.3.21. Variatia tensiunii pe carcasa cu defect in functie de raportul $\frac{R_E}{R_D}$. Z_f - impedanta fazei, Z_O - impedanta nului. a- Sectiunea nului; b- Sectiunea fazii. c- Sectiunea nului imediat inferioara fazei.

fică și valoarea tensiunilor U_p , U_E și U_N se determină din relații mai complicate, pe baza unor ecuații diferențiale.

Schema generală de calcul utilizată în acest caz este cea din fig.3.22.

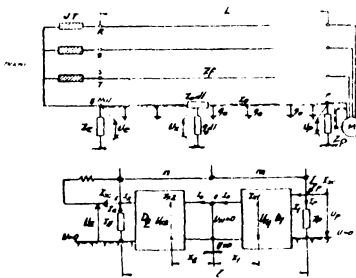


Fig.3.22. Schema de calcul a tensiunii pe nul în caz de defect

$$Z_f = (R_f + jX_f) = (r_f + jx_f)l; \quad Z_o = (R_o + jX_o) = (r_o + jx_o)l$$

D_1, D_2 - cuadripoli echivalenți ai rețelei generale a nului la plecare.

Considerind numărul maxim de 4 plecări din post și fiecare plecare prevăzută la cablu cu prize de 4 sau 10 ohmi (R_p) rezistența echivalentă a prizei $R_p = \frac{R_p}{4}$ (modificat acoperitor rezistența conductorului de nul). În acest caz, tensiunea ce apare pe carcasa cu defect este periculoasă. Din fig.3.21.

$$U_p = \frac{(0,41...0,46)U}{3} = 90...100 \text{ V}$$

b. Prize uniform distribuite

În realitate, plecările din post au nulul legat la pământ prin prize distribuite la intervale regulate variind între 200 m și 1000 m, cu valori între 4...20 Ω . Nulul se poate considera ca avînd o conductanță transversală uniform distribuită de valoare între 0,25...0,8 S/km. Utilizînd și, sau exclusiv prizele naturale ale stîlpilor, ($R_{STILP} = 0,5 \Omega$), domeniul de variație a conductanței transversale atinge $\sigma = 0,16...1,6 \text{ S/km}$ pentru rezistivități ale solului între 50...500 Ωm .

În această situație datele problemei se pot determina din relații mai complicate.

În schema respectivă Z_p reprezintă impedanța echivalentă a legărilor la pământ a nului restul plecărilor din post iar Z_p , impedanța echivalentă a legărilor la pământ a nului în aval de carcasa cu defect.

Cuadripolii D_1 și D_2 reprezintă echivalența legărilor la pământ a nului pînă în punctul O în care potențialul față de pământ al acestuia este egal cu zero. Poziția punctului O trebuie determinată prin calcul. Se va ține cont de faptul că datorită înalțurii curentului prin conductorul de nul și prin sol, inductivitatea specifică L_o a nului se modifică față de cea a fazei.

Scriind ecuațiile generale ale transmisiei prin sistemul legărilor la pământ a nului se obține relația cunoscută (3.14)

$$\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} = \gamma_o \gamma_o U_x \quad (3.14)$$

În care:

$$\gamma_o = r_o + j\omega L_o; (\Omega/\text{km})$$

$$\gamma_o = \sigma_o \quad (\text{S}/\text{km})$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{\text{Not find:}}{r_o + j\omega L_o}} = Z_c e^{j\varphi_c}$$

$$\delta = \sqrt{(r_o + j\omega L_o) \sigma_o} = \delta' e^{i\varphi_\delta}$$

54
 pentru cuadripolii D_1 și D_2 se pot scrie relațiile

$$U_{x_1} = A_1 e^{\delta x_1} + B_1 e^{-\delta x_1} \quad (3.15)$$

$$I_{x_1} = \frac{1}{Z_C} (\lambda_1 e^{\delta x_1} - \lambda_1 e^{-\delta x_1})$$

$$U_{x_2} = \lambda_2 e^{\delta x_2} + B_2 e^{-\delta x_2} \quad (3.16)$$

$$I_{x_2} = \frac{1}{Z_C} (\lambda_2 e^{\delta x_2} - B_2 e^{-\delta x_2})$$

unde U_x și I_x sînt tensiunea nului față de potențialul zero și curentul prin nul la distanța x de punctul O .

Condițiile la limită pentru ecuațiile (3.15) și (3.16) sînt următoarele:

$$x = 0 \quad U_{x_1} = U_{x_2} = 0; \quad I_{x_1} = I_{x_2} = I_0. \quad \text{Rezultă } A_1 = \lambda_2 = -B_1 = -B_2 = \lambda.$$

$$U_{x_1} = 2\lambda \text{sh } \delta x_1; \quad I_P = \frac{U_P}{Z_P} = \frac{2\lambda}{Z_P} \text{sh } \delta m; \quad I_1 = \frac{2\lambda}{Z_C} \text{ch } \delta m$$

$$U_{x_2} = 2\lambda \text{sh } \delta x_2; \quad I_E = \frac{U_E}{Z_E} = \frac{2\lambda}{Z_E} \text{sh } \delta n; \quad I_2 = \frac{2\lambda}{Z_C} \text{ch } \delta n$$

În aceste ecuații $m+n = L - m$ și n fiind distanțele de la punctul O la capetele rețelei de j.t. Din condiția $I_1 + I_P = I_{SC} = I_2 + I_E$ se obține

$$\lambda = \frac{I_{SC}}{\frac{2\text{sh } \delta m}{Z_P} + \frac{2\text{ch } \delta m}{Z_C}} = \frac{I_{SC}}{\frac{2\text{sh } \delta n}{Z_E} + \frac{2\text{ch } \delta n}{Z_C}} \quad (3.17)$$

Valorile m și n se obțin din (3.17) ținînd cont de $m+n = L$
 În continuare

$$U_P = \frac{I_{SC} \text{sh } \delta m}{\frac{\text{sh } \delta m}{Z_P} + \frac{\text{ch } \delta m}{Z_C}} = \frac{I_{SC} Z_C}{\frac{Z_C}{Z_P} + \text{cth } \delta m}; \quad U_E = \frac{I_{SC} \text{sh } \delta n}{\frac{\text{sh } \delta n}{Z_E} + \frac{\text{ch } \delta n}{Z_C}} = \frac{I_{SC} Z_C}{\frac{Z_C}{Z_E} + \text{cth } \delta n}$$

$$U_{FAZ\bar{A}} = I_{SC} Z_F + U_P + U_E = I_{SC} \left\{ Z_F + \frac{Z_C}{\frac{Z_C}{Z_P} + \text{cth } \delta m} + \frac{Z_C}{\frac{Z_C}{Z_E} + \text{cth } \delta n} \right\} \quad (3.18)$$

Din (3.18) se obține pentru cazul $\alpha_0 = 0$ (linie fără prize reparate a nului)

$$U_{FAZA} = I_{SC} \left\{ Z_F + \frac{1}{\frac{1}{Z_P} + \frac{1}{Z_O^m}} + \frac{1}{\frac{1}{Z_E} + \frac{1}{Z_O^n}} \right\}$$

unde Z_O^m și Z_O^n sînt impedanțele nului între capetele plecării și punctul de potențial zero (O), ceea ce constituie o confirmare a corectitudinii relației (3.18)

Pentru cazul $Z_O^m \ll Z_P$; $Z_O^n \ll Z_E$ se obțin relațiile (3.13) și (3.14)

$$U_{FAZA} = I_{SC} (Z_F + Z_O^m + Z_O^n)$$

Pentru diferiți parametri ai rețelei L , r_O^{nul} , r_O^{FAZA} , r_O^{EUL} , r_O pot determina variațiile tensiunilor U_1 și U_n cu notațiile

$$Z_p = (r_0'' + X_0'')L; \quad Z_C = \sqrt{\frac{r_0'' + jX_0''}{\frac{1}{Z_0} + j\frac{1}{X_0}}}; \quad \varphi = \sqrt{Z_0(r_0'' + jX_0'')}$$

În acest sens se determină valorile m și n în modul următor:

Notând $\frac{Z_p}{Z_C} = \text{ctg} \varphi (\geq 1)$; $\frac{Z_p}{Z_C} = \text{cth} \psi (\geq 1)$ din 3.17 se obține

$$\frac{\text{ch}(\varphi \mp \psi)}{\text{ch} \varphi} = \frac{\text{ch}(\psi \pm \psi)}{\text{ch} \psi}$$

Rezultă:

$$m = \frac{L}{Z_0} + \frac{\psi}{2\varphi} + \frac{1}{\varphi} \text{arctg} \frac{\text{th} \frac{\varphi + \psi}{2} \cdot \text{th} \frac{\varphi - \psi}{2}}{\text{th} \left\{ \frac{\varphi}{2} + \frac{\varphi + \psi}{2} \right\}} \quad (3.19)$$

$$n = \frac{L}{Z_0} + \frac{\varphi - \psi}{2\varphi} - \frac{1}{\varphi} \arg \text{th} \frac{\text{th} \frac{\varphi + \psi}{2} \cdot \text{th} \frac{\varphi - \psi}{2}}{\text{th} \left\{ \frac{L}{Z_0} + \frac{\varphi + \psi}{2} \right\}} \quad (3.20)$$

Tensiunea de defect pe nul U_0 , rezultă din relația (3.18).

Pentru rețelele de joasă tensiune aeriene $r_0 \gg X_0$; $r_p \gg X_p$ (pentru secțiunile obișnuite de 10...70 mm²) și din acest motiv calculele se pot executa simplificat, luând în considerare numai partea reală a Z_p și Z_C . Această simplificare s-a dovedit pe deplin justificată în cadrul probelor executate în rețea, fiind deosebit de utilă pentru realizarea calculelor.

Calculule executate scot în evidență următoarele concluzii:

- În cazul plecărilor lungi, în soluri cu rezistivitate scăzută prizele naturale contribuie exponențial la diminuarea valorilor tensiunilor pe nul în caz de defect.

- Utilizarea exclusivă a prizelor naturale în rețelele de joasă tensiune nu este indicată. Capetele plecărilor din post trebuie prevăzute cu prize de pămînt de valori egale cu prize de pămînt a postului. În caz contrar, în cazul unui defect pe plecare tensiunea pe nul poate atinge 40% din tensiunea de fază (va - lori periculoase pentru om).

- Pentru utilizarea rațională a avantajelor oferite de prizele naturale în rețelele de joasă tensiune este important să se realizeze o echilibrare a sarcinilor plecărilor din posturi care trebuie să fie cât mai apropiate ca lungime și încrengere totală. În caz contrar defectul pe plecare cea mai scurtă conduce la pericolul mare de accidentare în aceeași zonă.

3.4.3. Probe pe model și "in situ".

Confirmarea valorilor pentru tensiunea pe nul la post, la capătul plecării și de-a lungul liniei s-a făcut în cadrul unor probe practice pe un model de rețea de JT construit de autor precum și în cazul unui scurtcircuit monofazic într-o rețea reală.

Modelul construit, reflectă datele reale ale unei plecări de JT din com. Golești, la IRS Pitaghi, de care s-au făcut ulterior și probe "in situ". După verificarea faptului că simplificarea adoptată în calcul este realistă (influența lui R_0^{NU} este neglijabilă față de cea a lui R_0^{NU}) s-a trecut la utilizarea unui model rezistiv, mai simplu și la care se pot face măsurări în curent continuu. Rezultatele obținute la măsurări sînt prezentate în fig. 3.23. Ele confirmă - cu rigoarea posibilă în cadrul unor probe experimentale - concluziile obținute în calcul.

Se observă că în cazul defectului la capătul unei singure plecări, tensiunea pe nul se distribuie uniform între U_0 și U_p cu $U_0 = U_p = \frac{\Delta U_{BC}}{2} \approx \frac{U_{FAZA}}{4}$. Potențialul nul apare la mijlocul plecării.

Tensiunile $U_{p1}^1 \dots U_{p2}^0$ sînt practic în fază, curentul fiind evident, de-fazat față de tensiunea de alimentare. La mijlocul plecării tensiunile schimbă de sens.

În cazul cînd apar mai multe plecări (maximum 4 dintr-un post aerian M/JA) tensiunea la capătul plecării pe stilul cu defect se mărește foarte mult.

În concluzie utilizarea exclusivă a prizelor naturale în rețelele de joasă tensiune nu este admisibilă. Se vor prevedea întotdeauna la capetele plecă-

Prize artificiale de valori convenabile, conform concluziilor prezentate anterior. In fig.3.24 este prezentată variația tensiunii pe nul pe plecarea cu defect la capăt, iar in fig.3.25 variația tensiunii pe nul pe plecările neafectate.

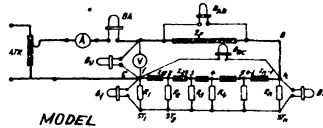
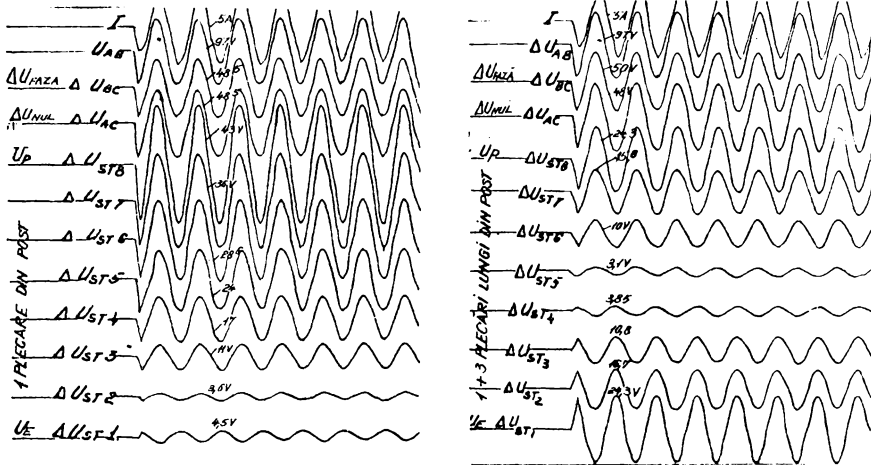


Fig.3.23. Inregistrarea tensiunilor pe nul, la un model de rețea ohmic - inductiv-exclusiv cu prize naturale.

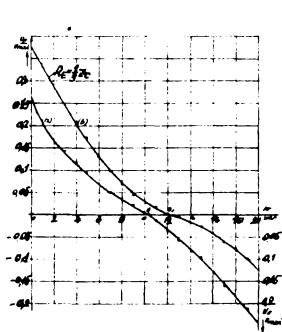


Fig.3.24. Variația tensiunii pe nul în cazul unei plecări cu prize naturale
 a) $R_p = R_p$ (1 plecare);
 b) $R_p = \frac{1}{3} Z_C$ - 3 plecări

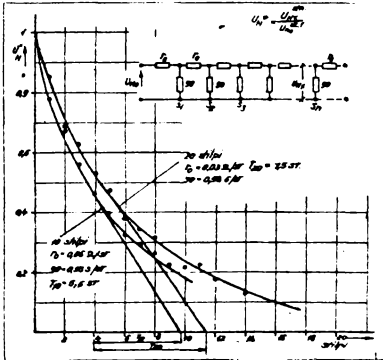


Fig.3.25. Variația tensiunii pe nul pentru plecările neafectate de defect

După efectuarea probelor pe model și evidențierea pericolului real prezentat pe acestea s-a trecut la probe într-o rețea reală (probe "in situ") IRE Pitești - com.: Golești. Pentru siguranță s-a ales o plecare scurtă cu 8 stâlpi (pregătirea rețelei prin demontarea și remontarea legărilor prizelor naturale la nul etc. este dificilă). Probele au constat în două etape. Pentru început s-au executat probe fără prize naturale pe plecarea (numai cu priza artificială de la capătul

plecării și la P.T. deconectând restul plecărilor și nulul acestora). Ulterior s-au legat la nul și prizele naturale ale stîlpilor plecării. Unele din înregistrările efectuate sînt prezentate în fig.3.26. Rezultatele obținute confirmă datele de calcul și pe cele obținute pe model. Tensiunile obținute pe nul în caz de defect se diminuează sensibil prin utilizarea prizelor naturale ale plecărilor. Acest element foarte important trebuie neapărat luat în considerare la execuția rețelelor deoarece în mod eronat actualmente acestea se construiesc fără legarea repetată a nulului la pămînt prin prizele naturale ale stîlpilor.

Probele în rețea au mai scos în evidență și faptul că la un scurtcircuit pe j.t. tensiunea pe fază a rețelei scade destul de mult. Din acest motiv toate calculele făcute mai sus în care se consideră transformatorul MT/JT de putere infinită sînt acoperitoare; în realitate tensiunile de defect pe nul vor avea valori mai mici decît cele rezultate din calculul simplificat.

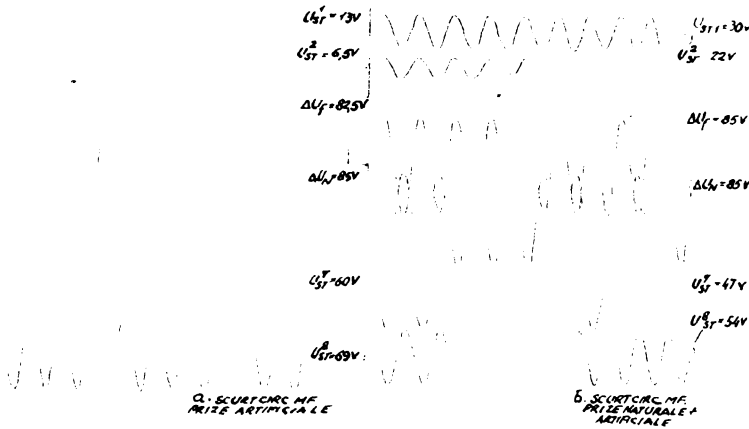


Fig. 3.26. Inregistrări la scurtcircuit j.t.

a) prize artificiale
b) prize naturale

3.5. UTILIZAREA PRIZELOR NATURALE ÎN STAȚII ȘI POSTURI

3.5.1. Generalități

În cazul unor defecte monofazice într-o stație din rețeaua de înaltă tensiune, (neutrul legat la pământ) pe priza stației apar potențiale U_p date de (3.21)
 $U_p = I_{sc}^0 \cdot R_{E\Sigma}$ (3.21)

unde: I_{sc}^0 - curentul de scurtcircuit monofazic ce dispersează de la priză în sol.

$R_{E\Sigma}$ - rezistența generală de dispersie a instalației de legare la pământ a prizei stației.

Valoarea $R_{E\Sigma}$ este substanțial influențată de prizele naturale legate la aceasta.

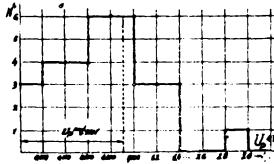


Fig. 3.27. Distribuția valorilor U_p pentru stațiile din RSR

Pentru 30 stații din RSR tensiunile din (3.21) determinate cu $R_{E\Sigma}$ măsurat și I_{sc}^0 calculat pentru anul 1972 au valori distribuite în modul arătat în fig. 3.27. Cu excepția cazului Valea Largă 110/27,5 și a CHE Gh. Deși valorile actuale ale lui U_p sînt sub 1,5 kV. Distribuția tensiunilor U_p în intervalul 0...3 kV se poate considera ca fiind o distribuție normală. Principalele ei elemente $U_{med} = 910$ V, $U_{max} = 3$ kV, $U_{min} = 117$ V.

Tensiunile U_p din (3.21) sînt mult diminuate prin contribuția prizelor naturale. Ele se pot însă transmite la distanță prin cuplaj rezistiv, cu prizele naturale - diferite elemente metalice de pe teritoriul stației - indiferent dacă acestea sînt sau nu legate metalic la priza acestora.

În acest sens prezintă interes atît soluțiile de micșorare a lui U_p prin utilizarea prizelor naturale cît și transmiterea la distanță a pericolului datorat tensiunii U_p prin următoarele elemente:

- a - firele de gardă sau conductoarele de nul;
- b - mantalele cablurilor de energie electrică;
- c - conductele metalice subterane de orice natură;

Pe măsura dezvoltării sistemului, tensiunile U_p din (3.21) au o tendință de creștere prin majorarea naturală a curenților de scurtcircuit. Chiar dacă prin efectul interconectărilor (ce conduce în general la micșorarea lui $R_{E\Sigma}$), amplificarea tensiunilor U_p nu va fi spectaculoasă, importanța practică a cuplajului respectiv crește și efectele acestuia trebuie luate în considerare la proiectarea și exploatarea instalațiilor:

Obiectele metalice lungi constituie deobicei prize naturale. Ele se pot asimila cu circuite liniare cu constante uniform repartizate. Pentru scopurile practice este suficient să se ia în considerare cazul cu constantele R, L, C ($c=0$) independente de curent.

În acest caz schema de calcul este prezentată în fig. 3.28. Ecuațiile generale cunoscute pentru acest caz sînt (3.14) și (3.22).



Fig. 3.28. Schema de calcul:

U_0 tensiunea la intrare;
 U_F tensiunea la ieșire.

$$\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} = y_0 z_0 \cdot I \quad (3.22)$$

unde $Z_0 = r_0 + j\omega L_0$; $y_0 = g_0$ sînt impedanțele și admitanțele specifice pe unitatea de lungime a conductei. Se menționează că în cazul firelor de gardă sau al conductoarelor de nul ale LEA j.t. (3.14) se transformă în ecuații cu diferențe finite care au soluții de aceeași formă. Soluțiile generale:

$$U_x = U_0 \frac{\text{ch } \beta x}{\text{ch } \beta L} = I_0 z_c \frac{\text{ch } \beta x}{\text{sh } \beta L} \quad (3.23)$$

$$I_x = I_0 \frac{\text{sh } \beta x}{\text{sh } \beta L} = \frac{U_0}{z_c} \text{th } \beta L \frac{\text{sh } \beta x}{\text{sh } \beta L} \quad (3.24)$$

unde s-a notat:

$$z_c = \sqrt{\frac{r_0 + j\omega L_0}{g_0}} = \sqrt{\frac{r_0^2 + \omega^2 L_0^2}{g_0^2}} e^{j\varphi_c} \text{ impedanța caracteristică}$$

$$\beta = \sqrt{(r_0 + j\omega L_0)g_0} = \sqrt{\frac{1}{2}(r_0 g_0 + \sqrt{r_0^2 g_0^2 + \omega^2 L_0^2 g_0^2}) + j\frac{1}{2}g_0(\sqrt{r_0^2 + \omega^2 L_0^2} - r_0)}$$

constanta de propagare

$$U_x = U_0 \frac{\text{ch } \beta(L-t)}{\text{ch } \beta L} = U_0 [\text{ch } \beta t - \text{th } \beta L \cdot \text{sh } \beta t] \quad (3.25)$$

t fiind distanța de la începutul conductei pînă în punctul considerat. U_0, I_0 - tensiunea și curentul la începutul conductei.

$$\text{Pentru conductele lungi cu } L \gg \frac{3}{|\beta|}; \text{ th } \beta L = 1 \text{ și } U_x = U_0 \cdot e^{-\beta t} \quad (3.25.a)$$

În acest caz tensiunea pe elementul metalic se atenuează după o exponențială cu subțanșenta $T = \frac{1}{|\beta|}$. Rezistența echivalentă a sistemului devine

$$R_0 = \frac{U_0}{I_0} = |z_c| \quad (3.26)$$

Cu ecuațiile (3.25) și (3.26) se pot stabili valorile tensiunilor transmise pe conducte în diferite cazuri practice precum și efectul favorabil al prizelor naturale asupra rezistenței generale a prizei $R_{L\Sigma}$.

3.5.2. Analiza diferitelor cazuri practice

a. Fire de gardă. Conductoare de nul la j.t.

Se studiază situația actuală cu unul sau două conductoare de gardă din OLZn 50...120 mm² și cu stâlpi cu rezistențe individuale de 2,5...20 Ω (prize artificiale sau prize naturale). Se neglijează inductivitatea L_0 .

Rezistența echivalentă a sistemului după (3.28) este: $R_0 = z_c = 0,86...4,45 \Omega$. Zona teoretică de pericol se situează pînă la distanța $4T = 1,40...7,2$ km. În realitate deoarece $U_0^{\text{med}} = 910$ V, coeficienții de atingere la stîlp sînt $K_{AT} = 0,3...0,74$ și $U_{\text{adm}} = 250$ V în medie apar periculoși numai primii 1...4 stâlpi din apropierea stației (deci situații de obicei în zone nelocuite).

Din acest motiv, firele de gardă ale stîlpilor de 110-400 kV se vor lega obligatoriu la priza stîlpilor, pentru că ei contribuie la diminuarea rezistenței

generale de dispersie $R_{\Sigma\Sigma}$ (fiecare linie lungă cu 1...5 Ω).

Trecerea la conductoarele de protecție din aldreș contribuie la creșterea zonei periculoase dar acest lucru nu este esențial, Acest tip de conductor contribuie însă substanțial la diminuarea lui R_0 și deci a lui $R_{\Sigma\Sigma}$.

În cazul liniilor de 25-60 kV cu fir de gardă, acesta nu trebuie legat la prizele stațiilor, pentru că prizele acestora nu sînt dimensionate decât pentru curenți de defect de 10-20 A, mult mai reduși ca cei ce rezultă prin transmisie de pe prizele stației.

Pentru conductoarele de nul ale LEA j.t., se consideră cazul cînd o linie de j.t. alimentează consumatori situați în exteriorul stației, care utilizează protecția prin legare la nul (STAS 6616-69).

În domeniul plecărilor obișnuite de j.t. ($L < 2$ km) chiar tensiuni pe priză de ordinul a 650 V sînt periculoase pe toată plecarea. Rezultă că este inadmisibilă alimentarea consumatorilor de j.t. de la serviciile interne ale stațiilor /3.16/.

În unele cazuri speciale cînd acest lucru nu poate fi evitat, se impune ca prizele stației să includă și prizele consumatorului respectiv.

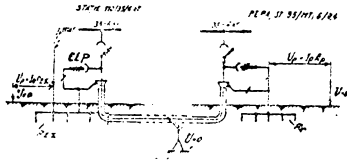
b. Cablu de energie electrică

Cabelele de energie subterane pot transmite potențiale periculoase în următoarele moduri:

- prin fazele cablului legate în scurtcircuit și puse la pămînt în stație;
- prin manta de plumb izolată de armătură pe traseu (cablu armat fără manșoane sau cablu nearmat);
- prin armătura exterioară a cablului.

Primele două moduri sînt principial asemănătoare. În acest caz, executarea manșoanelor, a cutiilor terminale și demontarea acestor elemente trebuie executate, fără inciderea CLP, pericolul de apariție a tensiunilor pe cablu fiind preîntîmpinat prin alte mijloace (teci, legarea în scurtcircuit a fazelor etc.). Preîntîmpinarea pericolului transmisiei potențialului prin manta, este mai simplă prin legarea mantalei la pămînt pe durata lucrărilor /3.16/. Mantalele cu manșoane pe traseu, ajung la potențialul armăturii metalice exterioare, fapt ce îndeplinește condițiile de protecție pe cablu.

Fig.3.29. Transmiterea potențialului la cablurile de energie



Pericolul de electrocutare prin transmisia potențialului prin armătura metalică neizolată față de sol (iută și bitumul se umezesc și devin conductoare) este mult diminuat față de cele anterioare datorită atenuării tensiunii provocată de conductanța transversală și datorită faptului că în acest caz operatorul nu e supus la tensiunea U_x ci numai la o parte a acesteia reprezentată de tensiunea de atingere U_{AT} precum și datorită echipamentului de protecție cu care sînt echipați operatorii (cisme și mănuși).

Pentru cablurile obișnuite de medie tensiune cu mantale de plumb, armate cu benzi oțel izolate cu iută și bitum, cu o vechime în exploatare suficientă ca umiditatea să pătrundă pînă la armătură, distanțele periculoase de stațiile cu defect sînt date în tabelul 3.5. Ele au fost calculate pentru $r_0 = 0,66...2,8 \Omega/\text{km}$ (ținînd cont de lipsa mantalei de plumb sau de efectul inductivității L_0 a benzii de oțel $r_0 = 5...10 \Omega/\text{km}$). Pentru $g = 20...100 \Omega\text{m}$, $g_0 = 0,35...1,8 \text{ S/km}$ ținînd cont de efectul izolației din iută și bitum /3.16/.

S-a considerat $U_{AT}^{\text{permis}} = 240 \text{ V}$; $K_{AT} = 0,5...0,6$ (la lucrări pe cablu) $K_{AT} = 0,1...0,2$ (la lucrările stațiile vecine) / $K_{AT} = \frac{U_{AT}}{U_p}$ - definit în STAS 2612/72).

Rezistența echivalentă a sistemului manta-pămînt care contribuie la diminuarea rezistenței prizei stației

$$R_0 = \sqrt[4]{\frac{r_0^2 + \omega^2 L_0^2}{g_0}} = 0,60...2,80 \Omega \quad (5,3 \Omega)$$

Se observă că în cazul cablurilor cu manta de plumb în sol conductor rezistența $R_{\Sigma\Sigma}$ este mult diminuată prin contribuția lui R_0 . Prizele posturilor vecine

Distanțele periculoase de stațiile cu defect

Tensiunea pe priza stației cu defect U_p kV		1	2	3	4
Distanțe periculoase de stație (km)	Lucrări pe traseul cablului	1,90	3,40	4,25	4,80
	Lucrări în stația vecină	-	1,1	1,90	2,55

trebuie însă calculate pentru curentul I_p ce se închide prin aceasta și prin mantaua cablului de legătură la un defect în stația de alimentare.

c. Conducte metalice.

În această categorie se cuprind conductele pentru alimentare cu apă rece (AR), conductele de termoficare, conducte de gaz, păcură etc. Principal apar două tipuri:

- conductele situate direct în sol, fără izolație;
- conducte cu izolație termică (bitum+fibre sticlă).

La conductele izolate, potențialul de la începutul conductei se transmite integral în centrala sau stația de alimentare a conductei.

Izolarea conductei de priza stației nu e soluție corespunzătoare deoarece în acest mod conducta poate aduce în stație potențialul nul, fapt ce reprezintă un pericol potențial major ($U_{AT} \text{ conductă} = I_{sc}^0 \cdot R_{EZ}$).

Aceste conducte trebuie prevăzute cu porțiuni izolante adecvate la ieșirea de pe teritoriul prizei. O conductă izolată în interior cu cauciuc cu lungimea de 1 m., conduce la evitarea pericolului în centralele la distanța sub 1 km pentru conducte cu $\phi = 200-500$ mm chiar la potențiale de 10 kV pe priză.

În cazul conductelor neizolate calculele sînt mai complicate întrucît acestea fiind în general din oțel, apare un efect pelicular important și parametrii conductei se modifică substanțial față de cazul curentului continuu. La conductele de diametru mic ($\phi = 20-30$ mm) efectul pelicular este mai puțin important. Valorile parametrilor primari r_0 , L_0 , g_0 calculate după /3.18/ sînt date în /3.16/. Cu datele respective, distanțele de stație la care se pot produce tensiuni de atingere periculoase sînt date în fig.3.30.

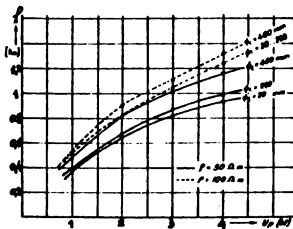


Fig.3.30. Distanțe periculoase pe conducte

0,5 Ω în funcție de diametrul conductei și rezistivitatea solului.

3.53. PROBE ÎN SISTEM

Verificarea în condiții reale a datelor obținute în calcul s-a făcut în cadrul unor probe de scurtcircuit monofazic în stațiile din tabelul 3.7. Cu ocazia probelor efectuate în două etape (cu curent de la o sursă auxiliară și cu curent real de defect) s-au măsurat în modul prezentat în fig.3.31.

- Tensiunile pe priză reale în caz de defect;
- Curenții distribuți prin prizele naturale (FG, cable, țevi);

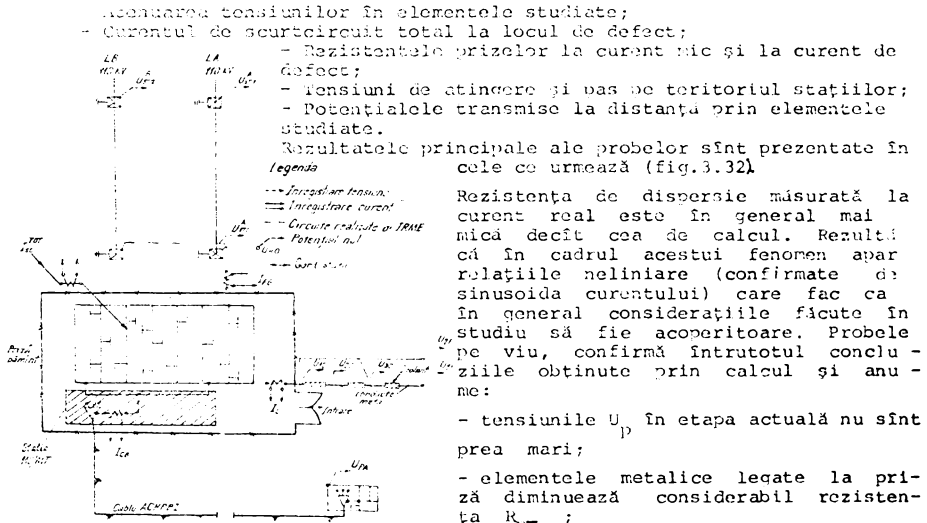


Fig. 3.31

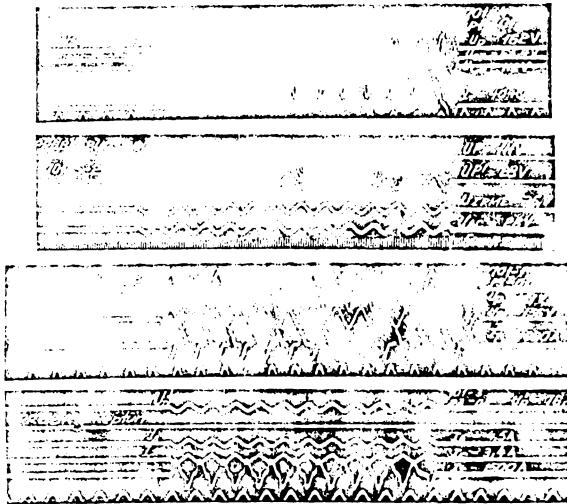


Fig. 3.32. Oscilogrammele unor probe pe viu în sistem

decît cele legate;

- cablurile de energie de medie tensiune pot transmite la distanță în aceeași tensiune pe priză U_p ;
- firele de gardă nu transmit în exteriorul stației pericole importante

Probe pe viu în sistem

Denumirea stației	Curent de scurt-circuit		Rezistența de dispersie (Ω)		Tensiunea pe priză $U_p^{m\grave{a}s}$ (V)
	Calculat DSE (A)	Măsurat (A)	cu I mic	cu I real	
1 FME P-110/15/6 kV	1200	1020	0,121	0,128	125
2 OCOLNA-110/20/6 kV	1200	1040	0,202	0,109	123
3 NEPTUN 110/35/15 kV	1350	1500	0,167	0,093	140
4 CIMPINA 110/25/10 kV	3450	4040	0,040	0,040	162
5 BUCUREȘTI-SUD 220/110/10 kV	20500	5734	0,0190	0,019	111

Bibliografie

- /3. 1/ KORSUNTEV, A. Metodica rasceta soprotivlenii zazemlenia jelezobetonnih fundamentov. In: El.Stanții 39, nr.11, nov.1968, p.63-68.
- /3. 2/ KARIKOV, M. O provodimosti jelezo_betonnih svainih fundamentov opor LEP 154-500 kV. In: Electricestvo 82, nr.5 mai 1961, p.13-15.
- /3. 3/ LEIRICH, V. Electroizolacionnye svoistva betonov pri raznih usloviakh ih ekspluatații. In: Electricestvo 89, nr.11 nov.1968, p.81-84.
- /3. 4/ KARIKOV, M. O metodike rasceta soprotivlenii fundamentov opor linii. In: El.Stanții, 37, nr.12 dec.1966, p.64-65.
- /3. 5/ COJA, L. Utilizarea prizelor de pământ naturale pentru linii electrice. In: Energetica 19, nr.10 oct.1971, p.504-509.
- /3. 6/ MARK, O. Demoniul de utilizare și calculul rezistenței prizelor naturale de LEM. In: Energetica 12, nr.12 dec.1964, p.629-632.
- /3. 7/ VÄNBER, I. Stokanie toka s elementov jelezobetonnih fundamentov linii elektroperedaci. Electricestvo 71, nr.12 dec.1960 p.34-40.
- /3. 8/ BUSE, G. Erfahrungen in verwendung der fundamente als Erdungsanlagen. In: Elektrizitäts-wirtschaft 66, nr.9 sept.1967, p.203-209.
- /3. 9/ UTEP, H. Investigations and testing of footing type grounding electrodes for electrical installations. In: IEEE Trans.PAS 83 nr.10 oct 1964, p.1042-1048.
- /3.10/ MERMILOV, M.E. Zazemliaciuste ustroistva v ustanovok elektrosviazi. Moscova. Sviazi 1971.
- /3.11/ DOLGINOV, A.I. Perenapriajeniia v electriceskih setiah. Gosenergoizdat Moscova 1958.
- /3.12/ KORSUNTEV, A. Primenenie teorii podobia k rasciotu impulsnih haracteristic zazemlenii. Electricestvo 71 nr.5 mai 1960, p.5-11.
- /3.13/ SEFOR, S. Efectul dăunător al curentului de punere la pământ pentru stâlpii de beton ai LEA. In: Energetyka 22 nr.9, sept.1968, p.310-311.
- /3.14/ COJA, L. Probe în sistem asupra stâlpilor SE-1. In: Producerea, transportul și distribuția energiei electrice și termice, 5 nr.6 iun.1972, p.277-285.
- /3.15/ B LI-CT-71. Circulară tehnică CITDEL 13.05.1971.
- /3.16/ COJA, L. Transmiterea potențialului prin obiectele metalice lunii legate la prizele stațiilor. In: Energetica, 21, nr.10 oct.1973, p.470-475.
- /3.17/ BOKER, H. Inductionsspannungen an pipelines. In: Elektrizitäts-wirtschaft 45 nr.5 febr.1965 p.157-170.

/3.18/ REGENI, L. Potentialverscheppung über Kabelmantel. Elektrische 25, nr.5, mai 1971 p.153-157.

/3.19/ MIHAILOV, M. I. Elektrischesche parametri podzemnih metallischeschih truboprovodov. In: Elektricesstvo 84 nr.5, mai 1963 p.60-65.

4. STUDIUL PRIZELOR DE PĂMÎNT PRIN MODELARE

4.1. GENERALITĂȚI

Rezolvarea problemelor de cîmp se poate realiza după cum se știe prin metode analitice (metoda reprezentărilor conforme, metoda separării variabilelor) și metode numerice (metoda diferențelor finite). Din aplicarea acestora din urmă rezultă un sistem de ecuații algebrice care se poate rezolva prin metode numerice (iterație ori relaxare) și prin metode analogice cu ajutorul rețelilor analizoare. Alte metode de rezolvare sînt metodele grafice (Lemann /4.1/) care nu oferă însă precizie suficientă și metodele experimentale care se bazează pe creerea unor cîmpuri model al cîmpului de studiat /4.2/.

În general prin modelare se înțelege reflectarea sau reproducerea printr-un mijloc oarecare a realității în vederea examinării legităților obiective existente în ea. Concluziile obținute din studiul modelului sînt confruntate cu realitatea perfecționarea modelului fiind un rezultat al confruntărilor dintre teorie și experiment. Modelarea poate fi rezultatul prelucrării directe a legilor realității (modele matematice) sau reflectarea unui sistem "original" printr-un altul "model" determinat printr-o anumită asemănare cu primul reflectată de relații de modelare /4.3/.../4.7/.

În cazul cîmpurilor modelarea poate fi făcută prin similitudine cînd originalul și modelul sînt de aceeași natură sau prin analogie cînd cele două cîmpuri sînt de natură diferită /4.8/. În ambele cazuri se impune ca cele două cîmpuri să satisfacă aceleași ecuații diferențiale și aceleași condiții la limită.

În cazul prizelor de pămînt, modelarea prin similitudine este una din cele mai eficiente metode de investigație. În acest caz este suficient să se stabilească numai o similitudine a dimensiunilor geometrice. Cel mai adesea se folosesc pentru modelare cuvele electrolitice. Deși cuvele bidimensionale au anumite avantaje privind precizia măsurilor și volumul montajului, autorul a construit o cuvă tridimensională, ținînd cont că nu în toate cazurile cîmpurile sînt plan meridiane.

Cu ajutorul cuvei electrolitice se pot stabili cu ușurință și fără eforturi toate elementele necesare calculului prizelor de pămînt (R_p , R_{AT} , K_{PAS} , E , coeficienții de ecranare ai electrozilor învecinați, etc.) pentru regimul de frecvență industrială.

Modelarea în cuvele electrolitice mai poate oferi și alte domenii de aplicare deosebit de variate, motiv pentru care utilizarea ei se justifică cu prisosință.

Baia electrolitică realizată în IRME este ilustrată în fig.4.1. Cuvă are forma emisferică. În /4.2/ este dată curba erorilor de măsură pentru diferite raze între "a", dimensiunea maximă a rețelei de priză și "r" raza cuvei metalice (fig.4.1).

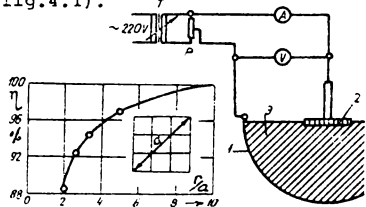


Fig.4.1. Principiul băii electrolitice și eroarea de măsură 1- cuva metalică; 2- modelul prizei de pămînt; 1- transformator de separare-reglare; P- potențiomtru; 3- electrolit-apă

η - precizia măsurării; r - raza cuvei; a- diametrul prizei.

Măsurătorile se realizează în ipoteza unei structuri omogene a solului - deci a unei conductibilități constante în electrolit, dar se pot soluționa și problemele modelării unor stratificări orizontale.

Pentru electrolit se folosește apă obișnuită de conductă cu rezistența specifică medie de cca 20-70 Ω m.

Metoda de măsură a potențialului diferitelor puncte din vas poate fi o metodă de nul, sau cea cu voltmetrul (electrostatic sau electronic) care dă erori de 3-4 %.

Electrozii modelului trebuie să îndeplinească câteva condiții importante, prezentate pe larg în /4.13/.

Pentru confecționarea modelelor se recomandă utilizarea sîrmei de argint. Greutatea cea mai mare

În construcția modelului provine din modelarea diametrului.

Pentru ca rezultatele pe model (indicele m) să nu difere decât prin scară de cele obținute prin original (fără indice), parametrii modelului trebuie aleși astfel încât să țină seama de factorii de scară (adimensionali) din relațiile următoare:

$$N_U = \frac{U}{U_M}; N_I = \frac{i}{i_M}; N_l = \frac{l}{l_M}; N_R = \frac{R}{R_M}; N_t = \frac{t}{t_M}; N_{\omega} = \frac{\omega}{\omega_M}.$$

unde:

- U - este tensiunea;
- I - curentul;
- l - lungimea;
- R - rezistența;
- t - timpul;
- ω - frecvență circulară (pulsatie).

Pentru ca scările respective să fie compatibile este necesar ca /4.7/, /4.8/:

$$\frac{N_{\omega} N_t N_U}{N_I N_R} = 1; \quad \frac{N_U}{N_I N_R} = 1; \quad N_t N_{\omega} = 1 \quad (4.1)$$

Aceste relații se numesc criterii de similitudine /4.8/.

Baza electrolitică se compune din cuva electrolitică; suportul cuvei; dispozitivul de fixare a prizelor și de măsură; instalația electrică.

Peșuvit celor arătate fig.4.1 s-a acceptat ca eroare maximă de modelare 5%. Din diagramă, rezultă corespunzător acestei erori, un raport $\frac{a}{a_0} = 3,5$.

S-a ales ca extinderea maximă a modelului să fie $a = 150$ mm, suficientă pentru studiul tuturor prizelor naturale de la liniile de joasă, medie și înaltă tensiune ceea ce determină pentru contraelectrod (dimensiunea cuvei) o rază $r = 225$ mm.

Detalii referitoare la execuția cuvei și a modelelor sînt prezentate pe larg în fig.4.2. Aspectul acesteia este arătat în fig.4.2.

4.2. PRIMELE REZULTATE EXPERIMENTALE

Experimentările realizate cu ajutorul cuvei electrolitice au fost următoarele:

- măsurarea rezistenței de dispersie a prizelor de diferite configurații;
- determinarea cîmpului electric în preajma prizei și reprezentarea imaginii sale; (linii de cîmp și suprafețe echipotențiale);
- determinarea coeficienților de influență (ecranare) a electrozilor:

$$C_u = \frac{R_1}{nR_{\Sigma}} - R_{\Sigma} = \text{rezistența generală a sistemului de } n \text{ electrozi; } R_1 -$$

- rezistența unui electrod;
- determinarea tensiunilor de atingere și de pas în apropierea instalației de prize;

soluționarea optimă a construcției instalațiilor de legare la pămînt.

- verificarea practică a metodei
- determinarea variației rezistivității electrolitului cu temperatura
- rezultatele experimentale obținute la măsurători sînt indicate în tabelul din figurile anexate.

Metoda s-a verificat practic prin comparația între datele obținute experimental în cuvă și cele obținute cu alte metode.

În tabelul 4.1. se indică valorile rezistivității determinată în cuvă cu electrodul numărilor (cap.2) și cele determinate cu conductometrul (raportat la o temperatură de 10°C).

Se poate sesiza influența frecvenței de măsurare asupra rezistenței prizelor și asupra curbelor din fig.4.3 și 4.4. S-a definit eroarea de frecvență prin $\epsilon_{\omega} = \frac{R_{\omega} - R_{10}}{R_{10}}$

unde R_{50} și R_{1000} sînt rezistențele la 50 și respectiv 1000 Hz.

Tabelul 4.1.

Nr. crt.	h mm	f Hz	R_{med} Ω	$\rho_{cuvă}$ Ω_m	ρ_{conduc} - tometru Ω_m	ξ_2 %
1	20	50 - 1000	552	25,8	25,4	1,6
2	35	50 - 1000	502	25,6		0,8
3	40	50 - 1000	445	25,6		0,5
4	50	50 - 1000	383	26,0		2,4

În domeniul de temperatură între 10 și 22°C abaterea maximă de frecvență nu depășește 1,5 %.

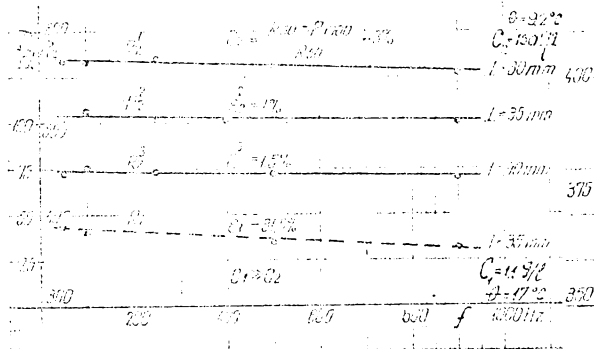


Fig.4.3. Variația rezistenței cu frecvența la două concentrații de electrolit C_1 și C_2

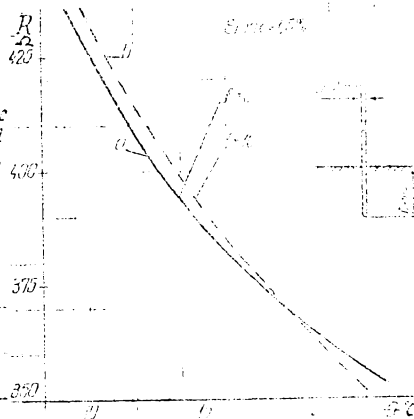


Fig.4.4. Variația rezistenței cu temperatura la 50 Hz și 1000 Hz

Pentru concentrația electrolitului $C_1 = 1,1$ g/l corespunzător unei rezistivități a soluției de circa $3 \Omega_m$, eroarea de frecvență, explicată prin apariția polarizării la 50 Hz este $\xi_1 = 31,5$ %

Pentru apa obișnuită de conductă, cu o concentrație de circa 150 mg/l corespunzând unei rezistivități de circa $25 \Omega_m$, eroarea de frecvență este $\xi_2^{max} = 3$ %. Abaterile valorilor rezistenței unor prize prin modificarea frecvenței între 50...1000 Hz sînt prezentate în fig.4.3 și 4.4.

Pentru concentrații mari a electrolitului, eroarea de frecvență devine grosolană (fig.4.3). În acest caz se recomandă efectuarea măsurătorilor în apă de conductă, (care are concentrație de săruri scăzută). Astfel polarizarea nu are efect negativ asupra măsurătorilor.

Coefficienții de acranare (utilizare) a electrozilor determinați experimental în cuvă (fig.4.5) corespund cu cei calculați în /4.10/ (eroarea maximă este de circa 2 %).

Variația rezistenței electrozilor cu temperatura electrolitului este indicată în fig.4.4. Se observă că rezistența scade cu creșterea temperaturii. Se impune ca la măsurări executate la temperaturi diferite a electrolitului să se introducă o corecție de temperatură. În domeniul de temperatură între 10 și 20°C se poate utiliza corecția: $R_t = R_{t_0} / (1 + 0,017(t_0 - t))$

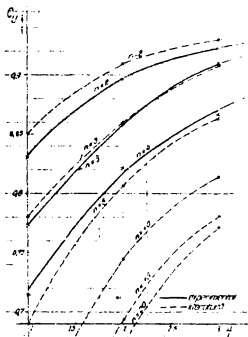


Fig.4.5. Variatia coeficientilor de utilizare. Electrozi verticali in linie: n - numar de electrozi; a - distanta dintre electrozi; L - lungimea electrozilor; C_u - coeficientul de utilizare

Ea rezultă prin aproximarea curbei a din fig.4.4. cu o dreaptă.

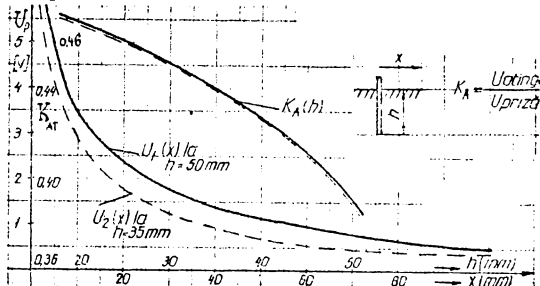


Fig. 4.6. Distributia potentialului si coeficientului tensiunii de atingere la electrodul vertical.

Distributia potentialului in jurul prizelor de pamint verticale este indicata in fig.4.6 - (unde se da si coeficientul tensiunii de atingere) iar pentru prizele orizontale in fig.4.7.

Cuva electrolitica este un auxiliar prețios in cercetarea prin metoda similitudinii a prizelor de pamint și a altor fenomene de diferite naturi, guvernate de legile generale ale cimpurilor armonice. Ea oferă domenii de aplicare, deosebit de variate și poate fi larg utilizată în proiectare și cercetare.

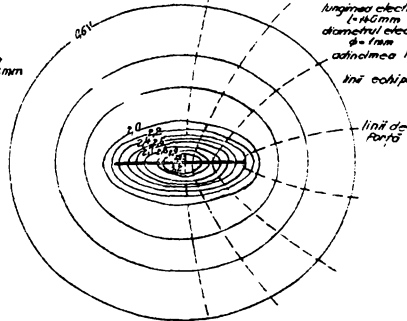


Fig.4.7. Repartitia potentialelor la suprafata lichidului la electrodul orizontal

În cazul stratificării cu $\rho_2 > \rho_1$ - (ρ_1 rezistivitatea stratului superior, ρ_2 rezistivitatea stratului inferior) cea mai favorabilă combinație se dovedește cea dintre apa distilată (ρ_1) și tetraclorura de carbon (ρ_2). Pentru variația raportului ρ_2 / ρ_1 se adaugă în clorura de carbon acid clorhidric. Dacă se limitează conținutul de HCl la concentrații foarte slabe, cînd acidul nu influențează asupra solubilității relative a CCl_4 în apă se pot obține rapoarte

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{1}{156} \dots \frac{1}{4}$$

Trebuie menționat că în general rezistivitatea stratului superior nu se menține

constantă în timp, din acest motiv măsurările trebuie să se facă după cei puțin 24 ore de la formarea straturilor după cum indică figura 4.8.

Pentru cazul $\rho_2 < \rho_1$ se utilizează ca strat superior spiritulanic / $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4$ / - cu o conductibilitate inițială bună iar ca strat inferior apa distilată.

Soluția nu permite însă acoperirea unui domeniu prea larg de variație a raportului $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ (0,25...1).

Din acest motiv pentru studiul unor cazuri cu grosime mare a stratului superior în care se construiesc prizele (grosimea stratului peste 8-10 m), se poate adopta pentru stratul inferior nu lichid ci fază solidă. Rezultate bune se obțin când sub stratul de apă distilată, se introduce grafit, carbid, sulfură de carbon sau alte materiale de tip semiconductor. Această metodă permite o lărgire considerabilă a gamei de variație a raportului

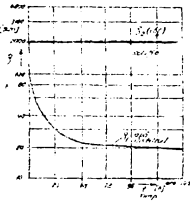


Fig.4.8. Dependenta de timp a rezistivitatilor celor două straturi de apă distilată (ρ_1) și clozura de carbon (Cl_4C) (ρ_2).

lui $\frac{\rho_1}{\rho_2}$ (0,25...0,01).

Studiul prizelor de pământ prin modelarea în cuva electrolitică a straturilor orizontale cu rezistivități diferite a permis să se determine valorile rezistențelor de dispersie și a coeficienților de utilizare (ecranare) a prizelor elementare învecinate. Datele concrete prezentate de Raba /4.4/ permit să se stabilească faptul că această metodă de investigație este suficient de exactă pentru scopurile practice:

Aplicarea ei este legată de învingerea unor dificultăți privind metodologia de executare a măsurărilor și tehnologia prelucrării straturilor omogene. Din acest motiv autorul nu a aplicat-o în studiile proprii.

În afara studiului în cuvă, în /4.9/, /4.10/ Brandolini pune la punct o metodă și o tehnologie de cercetare a prizelor de pământ prin modelare în volume mici paralelipedice de sol.

Electrozii metalici plantați se înlocuiesc cu volume cilindrice de mercur, turnat în orificii fasonate în volumul respectiv de sol.

Stratificările se realizează din amestecuri de nisip, ciment, portland, apă și grafit. Modificarea rezistivității de la strat la strat se realizează prin dozaajul corespunzător al grafitului în strat. Înaintea turnării în strat se determină cu metode clasice valoarea rezistivității straturilor.

Metoda s-a dovedit destul de convenabilă dar conform ultimelor informații ce s-au putut obține, ea mai necesită perfecționări de detaliu pentru a putea fi considerată competitivă. /4.11/.

4.4. REZISTENȚELE DE DISPERSIE ȘI DISTRIBUȚIA POTENTIALULUI LA PRIZELE NATURALE

Simplificarea calculului prizelor de pământ naturale în rețelele aeriene se poate face ușor prin modelarea în cuva electrolitică. Modelarea se face ținând cont de concluziile din /3.1/, completate cu concluziile obținute din măsurările autorului.

Prizele studiate în cuvă de autor și distribuția potențialului pe suprafața solului omogen în vecinătatea acestora sînt prezentate în fig.4.9.

Rezistența de dispersie a prizelor naturale ale stîlpilor este dată de relația /3.1/.

$$R = \frac{\rho_s}{H} \cdot K_f \cdot K_s \cdot K_b \quad (4.2)$$

Rezistența de dispersie geometrică (definită în cap. 2 denumită și factor de geometrie a prizei) $R_g = R^2$ devine:

$$R_g^* = \frac{K_f \cdot K_s \cdot K_b}{H} = \frac{R}{\rho_s} \quad (1/m) \quad (4.3)$$

Aici ρ_s - rezistivitatea medie a solului ($\Omega \cdot m$)

H - adîncimea de plantare (m)

K_f - factor de forma sau coeficient de similitudine determinat prin

măsurări în cuvă;
 K_B - coeficient de neuniformitate a solului. Pentru fundații tip pilot sau stâlpi singurari el are valoarea a 1,5 iar pentru fundațiile tip ciupercă valoarea 2/3.1./
 K_D - coeficient datorat stratului de beton; conform măsurărilor autorului $K_D = 1,25$.

În cazul fundațiilor burate, cu straturi alternative de piatră și pământ se

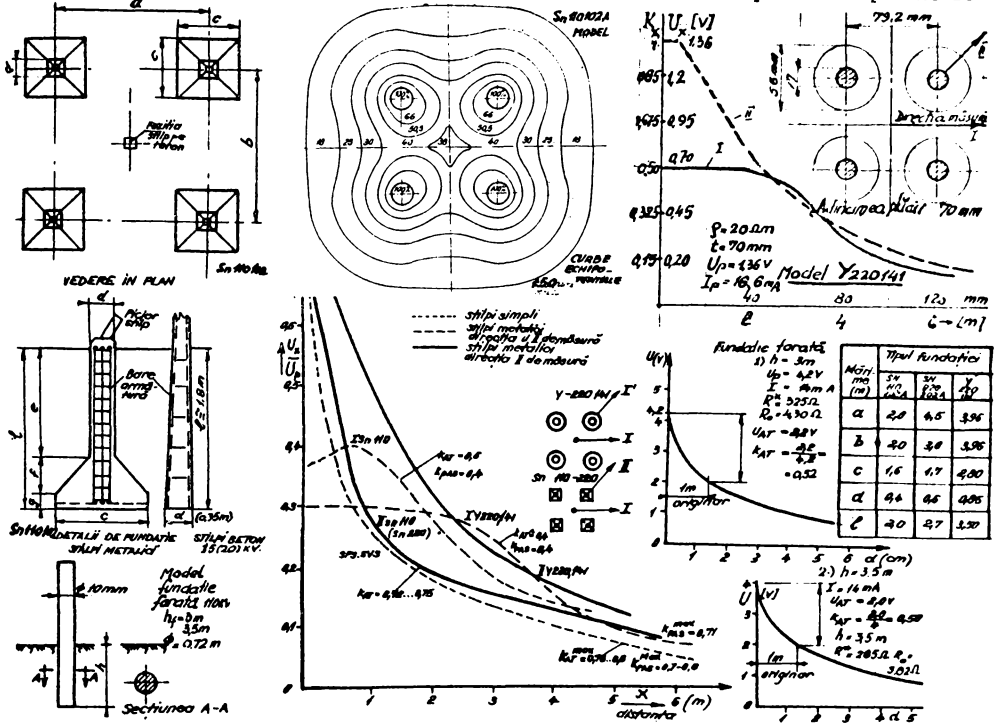


Fig. 4.9. Modele de prize studiate și distribuția potențialului pe suprafața solului omogen

va țină cont de majorarea rezistenței de dispersie datorită burării.
 Conform măsurărilor autorului coeficientul de majorare datorat burării este 1,2...1,4.
 Valorile coeficienților de similitudine K_f ai prizelor naturale, după /3.1/ sînt prezentate în fig. 4.10.
 Pe baza datelor din figurile 4.9 și 4.10 se pot determina rezistențele de dispersie și coeficienții de atingere (superiori în toate cazurile coeficienților de pas) măriri care sînt prezentate în tabelul 4.2.
 Rezultatele măsurărilor în cuvă s-au verificat practic prin măsurări în teren. Rezultatele măsurărilor în teren s-au trecut în paranteze în tabelul 4.2. La măsurările în teren, sondarea solului s-a executat cu aparatul ATAP - elaborat de autor. De asemenea, măsurarea coeficienților de atingere și de pas s-a făcut comparativ cu sursa de putere și cu aparatul autorului. Diferențele între valorile de calcul obținute prin măsurări în cuvă și cele măsurate în teren provin din neomogenitatea solului. De altfel datele obținute în cuvă se suprapun destul de bine peste cele obținute în teren.
 De asemenea rezultatele obținute la măsurările în cuvă s-au comparat cu cele de calcul. Se observă că alura curbelor echipotențiale și distribuția potențialului obținute la măsurări în cuvă, concordă bine cu rezultatele calculului concretizate în fig. 3.8. din cap. 3 fapt ce reconfirmă avantajele și eficiența modelării /prizele din fig. 3.8.

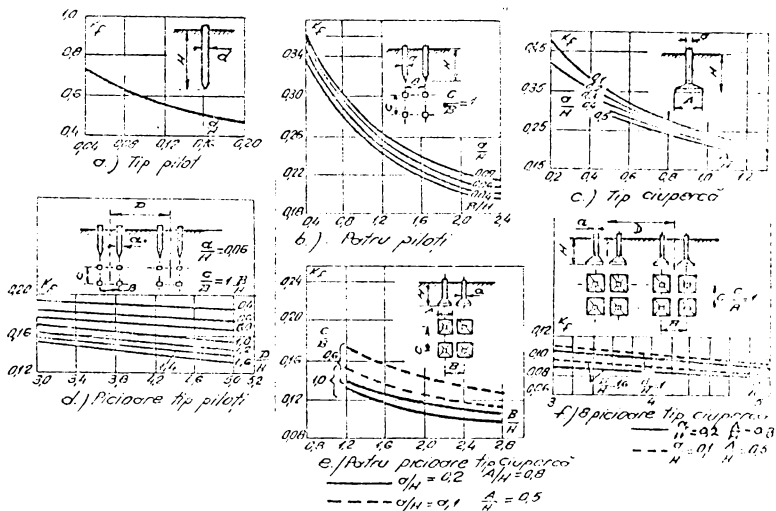


Fig. 4.10. Coeficienții de similitudine ai prizelor naturale în sol omogen

Tabelul 4.2.

Rezistențe de dispersie și coeficienții de atingere ai prizelor naturale ale stîlpilor LEA

Nr. crt.	Tipul stîlpului și fundației	Rezistența geometrică de dispersie R_g^* (l/m)		Coeficient de atingere maxim	Coeficient de pas maxim
		1 Picioare	4 Picioare		
1	S_n 110 102 A Fundație armată	0,50	0,15 (0,14)	0,73...0,75 (0,74)	0,71 (0,70)
2	S_n 220 202 A Fundație armată	0,20	0,10	0,72...0,74	0,70
3	Y 220 141 A Fundație ciupercă	0,16	0,08	0,52	0,32
4	SC 1165 Beton Fundație forată $h_f = 3$ m	0,166 (0,173)	-	0,52 (0,60)	0,50 (0,60)
5	SC 1165 Beton Fundație forată $h_f = 3,5$ m	0,148 (0,157)	-	0,50 (0,48)	0,48 (0,48)
6	SCS-35002-35 kV Beton. Fundație forată; $h_f = 2,4$ m	0,30 (0,3)	-	0,64	0,64 (0,65)
7	SV, SC, SE-15 kV Fundație burată $h_f = 1,8$ m	0,45 (0,42)	-	0,76...0,78 (0,77)	0,7...0,8
8	SE-1 kV. Fundație burată. $h_f = 1,8$ m	0,50 (0,48)	-	-	-

și 4.9 nu sînt similare de unde rezultate cantitativ deosebite).

În ultimul timp, Korsuntev /4.12/ indică modul cum pot fi calculate prizele naturale pe baza coeficienților de similitudine determinați pentru sol neomogen, din două straturi orizontale prin măsurări în curv.

Măsurările în curv s-au executat prin separarea celor două straturi diferite printr-o membrană specială, conductivă transversal. Rezultatele obținute la măsurări sînt prezentate în fig.4.11.

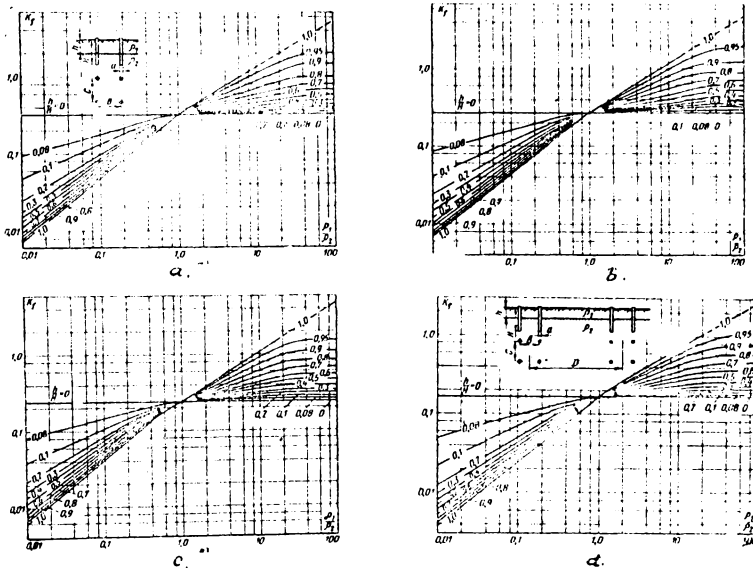


Fig. 4.11. Coeficienții de similitudine ai prizelor naturale în sol neomogen

- a) $\frac{B}{H} = 1,0$; b) $\frac{B}{H} = 1,5$; c) $\frac{B}{H} = 2,0$. $\frac{a}{H} = 0,05$; $\frac{B}{C} = 1,0$
 d. $\frac{a}{H} = 0,05$ $\frac{B}{C} = 10$. $\frac{B}{H} = 1,0$ $\frac{D}{H} = 3$

În cazul fundației simple, rezultatele obținute de Korsuntev se suprapun peste cele obținute de autor prin calcul, fapt ce constituie confirmări a rezultatelor analitice și experimentale. Din acest motiv, nu s-au mai prezentat în figură valorile pentru un singur picior de fundație.

Utilizarea datelor obținute la măsurările pe model, simplifică mult problema calculării prizelor de pământ a stîlpilor LEA, situați în sol omogen sau neomogen.

Bibliografie. Cap.4

- /4.1/ CATALIOTTI, V., CECCONI, V. - Una vasca elettrolitica di grandi dimensioni. In: L'Energia Elettrica 43 nr.4 (april.) 1966, p.233-237
 /4.2/ JURKE, M. Bestimmung des Ausbreitungswiderstands ausgedehnter Erderanordnungen mit Hilfe des elektrolytischen Trogs. In: Elektrie 20 nr.9, sept.1966, p.356-359.
 /4.3/ RABA, H.H. Metodica isledovania zezemlitatei v electroliticescoi vanne. In: Promișlennaia energetica 21 nr.6, iun.1966, p.27-32.
 /4.4/ RABA, H.H. Primenenie electroliticeschih vann polisfericescoi formi dlia modelinovanie zezemlitatei v dvuhsloinom grunte. In: Promișlennaia energetica 22, nr.4, april. 1967, p.36-40.

- 7/
- /4.5/ SERBANESCU, B. - Determinarea cimpurilor electrostatice in transformatoare cu ajutorul băii electrolitice. In: Electrotehnica nr.8, aug.1960,p.286-293.
 - /4 / FALETTI, ROSSIGNONI, MALEMAN - Alcuni risultati di ricerca su modello degli impianti di messa a terra. In: L'Energia elettrica 33, 1955,p.560-565, 25, 1951, nr.5, p.441-475.
 - /4.7/ VANICOV, V.A. Aplicarea teoriei similitudinii și a modelării în electroenergetică. Traducere din limba rusă. Ed.tehnică, București 1972.
 - /4.8/ SCHWAB, F. Teoria dei modelli e misure sui modelli. In: Bull.A.S.E. 57,nr.25, nov.1966,p.1045-1050.
 - /4.9/ BRANDOLINI, A. Misure di resistività in terreno non omogeneo. Prove su modello Rendicanti della LXXII - Reunioni Anuale AEI. 1971. Rap.3.10.
 - /4.10/ BRANDOLINI, A. Verso una generalizzazione del progetto automatico di una sistema di messa a la terra. In: L'Ellettrotechnica 57 nr.2 febr.1970,p.67-82.
 - /4.11/ BABES, V. Considerații asupra măsurării rezistivității în terenuri neomogene. Sesiunea Jubiliară a Facultății de Electrotehnică Iași, decembrie, 1972.
 - /4.12/ KORSUNTER, A.V. Soprotivlenie zazemlenia svainih fundamentov opor linii v neodnorodnih gruntah. In: Electriceschie Stanții 44, nr.4 aprilie 1973, p.75-77.
 - /4.13/ GOIA, L. Baia electrolitică pentru studiul pe model al prizelor de pământ. In: Electrotehnica 16 nr.10 oct.1968,p.389-395.
-

5. METODE SI APARATE UTILIZATE LA MASURAREA INSTALATIILOR DE LEGARE LA PAMINT

5.1. MASURAREA PARAMETRILOR PRIZELOR IN TEREN

5.1.1. Generalități

La darea în exploatare a instalațiilor de legare la pământ se impune verificarea efectivă, prin măsurări a modului în care acestea asigură condițiile tehnice și de securitate impuse de norme și prevăzute în proiect.

Măsurările se pot executa atât în condiții de defect real prin priză (cu - rentul prin priză egal cu cel de calcul al instalației $I_p = I_{calc.}$) cât și la valori de curent $I_p^* \ll I_{calc.}$ caz în care se consideră că se execută măsurări, "prin similitudine" (cu asterisc se notează valorile măsurate prin similitudine). În aceste cazuri se determină R_p și tensiunile de atingere U_{AT} , de pas U_{PAS} sau pe sol U_x , (fie coeficienții K_{AT} , K_{PAS} , K_x , independenți de curentul prin priză)/5.6/

$$K_{AT} = \frac{U_{AT}}{U_p} = \frac{U_{AT}^*}{U_p^*} = \frac{1}{R_p} \cdot \frac{U_{AT}^*}{I_p^*} - \text{coeficient de atingere}$$

$$K_{PAS} = \frac{U_{PAS}}{U_p} = \frac{U_{PAS}^*}{U_p^*} = \frac{1}{R_p} \cdot \frac{U_{PAS}^*}{I_p^*} - \text{coeficient de pas}$$

$$K_x = \frac{U_x}{U_p} = \frac{U_x^*}{U_p^*}$$

În mod obișnuit, coeficienții K_x depind puțin de rezistivitatea solului, fiind independenți de aceasta în cazul solului omogen. Pe această bază, ei pot servi foarte bine la analiza comparativă a diferitelor instalații de legare la pământ.

Pentru execuția măsurărilor sînt necesari doi electrozi auxiliari (sau prize auxiliare) - unul pentru închiderea curentului de măsură I (electrodul A sau priza P_A) și altul pentru măsurarea tensiunii (Sonda S). În acest caz, schema simplificată a măsurării este cea prezentată în fig.5.1.a. Teoretic, amplasarea celor trei prize P,A,S ar trebui astfel realizată încît zonele lor de dispersie de curent să nu se intersecteze. Această condiție poate fi însă simplificată. Se pot distinge în acest context două situații principale diferite.

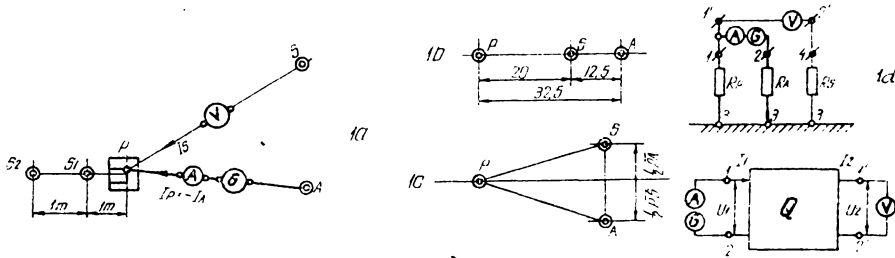


Fig.5.1. Schema de principiu a măsurătorilor la prizele de pământ

- cazul prizelor P,A, elemente concentrate cu potențial constant de-a lungul electrozilor metalici (stâlpi MT,IT;PT);
- cazul prizelor P,A, elemente de mare lungime la care nu se poate considera potențialul constant de-a lungul electrozilor (Stații și PA cu prizele naturale conectate la priza stației - fire gardă, cable cu manta metalică, șine, conducte).

a) Prize concentrate

Conform analogiei electrostatice, potențialele celor 3 electrozi A,S,P,

73

respectiv V_A, V_S, V_P , sînt date de relațiile lui Maxwell (6.1).

$$\begin{aligned} V_A &= \alpha_{AA} I_A + \alpha_{AS} I_S + \alpha_{AP} I_P \\ V_S &= \alpha_{SA} I_A + \alpha_{SS} I_S + \alpha_{SP} I_P \\ V_P &= \alpha_{PA} I_A + \alpha_{PS} I_S + \alpha_{PP} I_P \end{aligned} \quad (5.1)$$

În (5.1) $\alpha_{PP}, \alpha_{AA}, \alpha_{SS}$ sînt rezistențele proprii de dispersie ale electrozilor P, A, S iar $\alpha_{ij} = \alpha_{ji}$ rezistențele reciproce ale electrozilor i și j, mărimi ce depind de distanțele reciproce între electrozi (considerați relativ punctiformi) SA, SP, PA.

Considerînd $I_S = 0$ și $I_P = -I_A$, valoarea măsurată R_P^m a rezistenței reale devine:

$$R_P^m = \frac{V_P - V_S}{I_P} = \alpha_{PP} - \alpha_{PA} - \alpha_{SP} + \alpha_{SA} = R_P + \alpha_{SA} - \alpha_{PA} - \alpha_{SP} = R_P - \Delta R$$

După /5.1/ și /5.4/ pentru a avea măsurări corecte $\Delta R=0$ și apare necesitatea unor corelări între distanțele dintre electrozi

$$\alpha_{SA} = \alpha_{PA} + \alpha_{PS} \quad (5.2)$$

Considerînd schema din fig.5.1 un cuadripol pasiv se poate demonstra /5.8/, /5.4/ că schimbarea între ei a electrozilor A de curent și S de potențial conduce tot la o măsurare corectă, fiind o confirmare a lui (5.2) și demonstrînd că α este un cuadripol reciproc ($AD-BC=1$).

Pentru cazul cînd se măsoară coeficientul de atingere, se utilizează electrodul S_1 , plasat la 1 m de coborîrea la priză. În acest caz, coeficientul de atingere se poate determina din (5.4) ținînd cont de (5.2).

$$\begin{aligned} K_{AT} &= \frac{V_P - V_{S1}}{V_P - V_S} = \frac{\alpha_{PP} - \alpha_{PA} - \alpha_{S1P} + \alpha_{S1A}}{\alpha_{PP} - \alpha_{PA} - \alpha_{SP} + \alpha_{SA}} = \frac{\alpha_{PP} - \alpha_{PA} - \alpha_{S1P} + \alpha_{S1A}}{\alpha_{PP}} = 1 - \frac{\alpha_{PA} + \alpha_{S1P} - \alpha_{S1A}}{R_P} = \\ &= 1 - \frac{\Delta R_{P1}}{R_P} = \frac{R_{P1}^m}{R_P} = 1 - \xi_1 \end{aligned} \quad (5.3)$$

unde $\xi_1 = \frac{R_{P1}^m}{R_P} = \frac{R_P - R_{P1}^m}{R_P}$ - este eroarea relativă ce s-ar obține considerînd că

la măsurarea rezistenței R_P , electrodul Sondă de potențial nu s-ar monta corect în S_1 ci în S_2 pe teritoriul prizei.

Coeficientul de atingere se poate deci defini ca raportul între rezistența prizei R_{P1}^m - măsurată în cazul plantării electrodului de potențial într-un punct S ales neconform cu (2), și R_P rezistența reală a prizei.

În mod analog se poate deduce:

$$K_{PAS} = \frac{R_{P1}^m - R_{P2}^m}{R_P} = \frac{\alpha_{S1A} - \alpha_{S2A} + \alpha_{S2P} - \alpha_{S1P}}{\alpha_{PP}} \quad (5.3.a)$$

unde R_{P2} - corespunde măsurării cu sonda plasată în punctul S_2 la 1 m de S_1 .

Respectarea lui (5.2) și (5.3) permite executarea unor măsurări corecte în toate situațiile practice. Vor fi analizate cazul prizelor punctiforme și cel al prizelor nepunctiforme.

a) Prize punctiforme. Dacă I și J sînt electrozi punctiformi (pot fi considerați relativ punctiformi), atunci cîmpul lor în sol omogen apare radial, sferic. În acest caz $\alpha_{IJ} = \frac{\rho}{2\pi IJ}$, unde IJ este distanța între electrozii I și J.

Astfel (5.2) devine după /5.2/

$$\overline{SA} = \frac{\overline{PS} \cdot \overline{PA}}{\overline{PS} + \overline{PA}} \quad (5.4)$$

Din considerente de simetrie Osłon (5.2) recomandă $PA=PS$ și în acest caz $SA = \frac{1}{2} PA = \frac{1}{2} PS$.

b) Prize nepunctiforme. În cazul prizelor nepunctiforme, distanțele între electrozii de măsură și priză se iau după instrucțiunile de măsurare din R.S.R. /5.1/ conform fig.5.2. Dacă PS și PA sînt suficient de mari pentru ca în S și A câmpul prizei să fie radial sferic eroarea de măsură sistematică a măsurătorii conform (5.2) nu depășește în general 7,5 %.

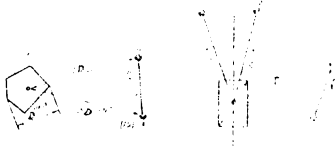


Fig.5.2. Distanțe între electrozii de măsură

Aceasta poate fi considerată acceptabilă dar evident, în cazul prizelor extinse, realizarea distanțelor dintre P, S, și A conform fig.5.2.a, este dificilă, /5.2/ și /5.3/ recomandă distanțele care asigură precizia necesară măsurărilor (indicate în fig.5.2.b).

c) Prize de mare extindere. În cazul prizelor de mare extindere la care nu se mai poate considera constant potențialul de-a lungul electrozilor metalici și la care sînt legate diferite prize naturale, situația se modifică mult față de cazul precedent, distanțele din fig.5.1 și 5.2. nemai asigurînd corectitudinea măsurărilor.

Pentru asigurarea preciziei dorite, se vor face măsurări pentru distanțe variabile între electrozii de măsură după cum arată fig.5.3. Se consideră convenabile distanțele PS pentru care valorile măsurate ale rezistenței se situează pe palierul diagramei din fig.5.3.b (porțiunile hașurate).

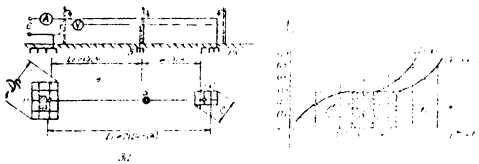


Fig.5.3. Distanțe între electrozii de măsură

Problema măsurărilor se complică în cazul cînd întoarcerea curentului de măsură se poate face prin fire de gardă, mantale metalice etc., legate la priză de măsurat. În acest caz distanțele între P și A, P și S trebuie alese pe baza ecuațiilor diferențiale ce determină atenuarea tensiunii pe conducta metalică legată la priză stației. (cap.3) Pentru o precizie de 5% distanța între P și A, potențialul produs de P să fie sub 5 %.

A trebuie astfel aleasă încît în punctul A, potențialul produs de P să fie sub 5 %.

Rezultă $\frac{U}{U_{\max}} < 0,05$. Din această condiție rezultă /5.9/.

Pentru linii aeriene $X_{\min} = 2,5 \dots 3,0$ km

Pentru linii subterane $X_{\min} = 1,5 \dots 6,0$ km

Calcululele sînt făcute pentru cazul cînd PA e o priză concentrată. Dacă conducta metalică luată în considerare se leagă și la PA, distanțele de mai înainte trebuie în general mărite.

5.1.2. Practica măsurărilor.

Executarea măsurării rezistenței și coeficienților de potențial se face în cazul prizelor extinse prin alimentarea montajului de la o sursă auxiliară de putere. /transformator MT/JT, transformator de sudură /5.9/, generator portabil.

În cazul unor prize de suprafață redusă - (concentrate) măsurarea se poate face mai simplu - cu ajutorul unor aparate de măsură portabile cu sursă proprie (curenți mici) sau prin punerea simplă la pămînt a unei faze la utilajul verificat - (în rețelele cu neutrul izolat).

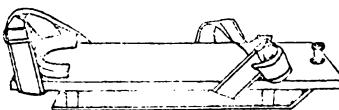


Fig.5.4. Papuci pentru măsurarea U_{AT} și U_{PAS} .

În scopul cererii presiunii de contact cu solul, necesară la măsurările tensiunilor de atingere și de pas în vechile norme se preconiza utilizarea unei plăci metalice de $0,35 \times 0,35$ m² cu grosimea de 2...3 mm, pe care se așeza o greutate uniform repartizată de 80 kg. O măsurare de acest gen este complicată și greu de realizat. În scopul simplificării și pentru a realiza condiții cît mai apropiate de cazurile reale s-au construit în IRMIE papuci

din fig.5.4. Conform experienței autorului, la măsurările pe sol în locul papucilor pot fi utilizați țăruiși metalici ascuțiți cu condiția ca să nu fie plantați prea adânc (1-2 cm). Conform (6.6) diferențele între cele două metode la măsurări sînt neglijabile și provin doar din erorile proprii ale aparatelor de măsură și din măsurările lungimilor.

Pentru măsurările pe ciment, beton, etc., singura soluție acceptabilă rămîne cea cu papucii speciali din fig.6.4.

Măsurarea rezistenței de dispersie se execută aproape în exclusivitate în curent alternativ pentru a exclude influența fenomenului de polarizare.

Pe priza de măsurat apare în mod obișnuit un potențial nenul, U_0 , chiar în absența curentului de măsură, denumit potențial rezidual sau perturbator, avînd cel mai adesea caracter alternativ, sinusoidal de 50 Hz (0,5...2,5 V).

Neglijarea lui poate conduce la erori de 100 % și mai mult, potențialul perturbator fiind de același ordin de mărime cu potențialul produs de curentul de măsură.

În cazul surselor de putere de 50 Hz, la calculul rezistenței și a tensiunilor de atingere sau pas trebuie luat în considerare și potențialul perturbator.

Din acest motiv măsurările tensiunii trebuie executate de trei ori - prima dată, în absența curentului de măsură cînd se măsoară U_0 - potențialul perturbator și apoi de două ori în sarcină inversînd conexiunile sursei de putere, cu inversorul H (fig.5.5). Dacă la măsurări, tensiunea pe priză nu prezintă bătăi, tensiunea perturbatoare are 50 Hz - și tensiunea pe priza de măsurat U_p produsă de curentul de măsură I_m se determină cu relația

$$U_p^2 = \sqrt{\frac{U_1^2}{2} + \frac{U_2^2}{2}} - U_0^2$$

unde U_1 și U_2 sînt tensiunile măsurate în cele două conexiuni ale lui H. Aplicarea practică a recomandărilor de mai sus cuprinse pe larg în lucrarea autorului /5.9/ permite anularea erorilor de măsură sistematice și ridică mult acuratețea rezultatelor.

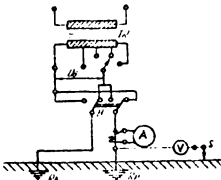


Fig.5.5. Evitarea influenței potențialului perturbator pe priză

5.1.3. Deficiențele metodelor actuale de măsurare.

a) Potențialul perturbator pe priza de măsurat.

Tensiunile perturbatoare apar pe priza de măsurat datorată inducției, curenților vagabonzi, dezechilibrului curentului pe faze etc.

Măsurările executate de autor au scos în evidență caracteristicile principale ale tensiunilor perturbatoare prezentate în fig.5.6 a și b pentru prizele din sistemul energetic la RSR (51 stații).

În majoritatea cazurilor cercetate, tensiunea perturbatoare pe priză are valori sub 1...1,5 V.

Anularea influenței acestor tensiuni reprezintă o problemă complicată impunînd în general triplarea măsurărilor sau necesitînd surse de foarte mare putere și tensiune. Mărirea curentului de măsură reprezintă o condiție prohibitivă de stabilitate termică a prizei (1,5 V la o priză de 0,05 Ω necesită pentru o eroare sub 5 % un curent de 600 A).

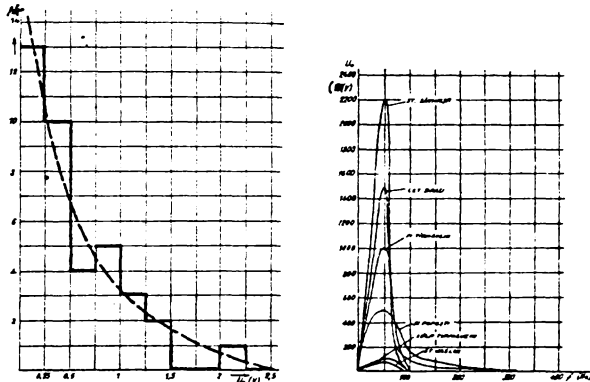


Fig.5.6. Caracteristicile tensiunilor perturbatoare pe prizele de măsurat

b) Sursa de alimentare.

Sursa pentru alimentarea montajului, mobilă și de putere relativ ridicată în majoritatea cazurilor este greu transportat și manipulat. În cazul stațiilor de transformare ca sursă auxiliară poate fi utilizat transformatorul de servicii interne. Nici în acest caz problema nu este simplă deoarece, trebuie asigurată și sursa pentru încălzirea filamentelor lămpilor voltmetrului electronic de măsură (deci o tensiune separată de 220 V).

Nu poate fi neglijată nici energia electrică furnizată de sursă pe durata măsurătorilor (sute de kWh).

c) Manevre greoaie pentru realizarea montajului.

De obicei realizarea montajului obligă scoaterea din funcțiune a stației ce se măsoară, a instalației ce oferă priză auxiliară precum și a liniei de legătură între acestea. De obicei asigurarea condițiilor măsurării nu este de loc ușoară (trebuie asigurate condiții nepericuloase de muncă cu precădere pe teritoriul prizei auxiliare P_1 care are în general valori mult mai mari ca P). Din acest motiv se preferă de obicei executarea măsurărilor concomitent în ambele stații.

Toate elementele indicate fac să se poată considera că măsurarea în metoda actuală cu sursa de 50 Hz prezintă inconveniente importante.

Față de deficiențele metodelor actuale de măsură s-a impus găsirea unei soluții noi care să rezolve problema, asigurând acuratețea cerută rezultatelor și permițând simplificarea metodologiei măsurărilor

5.2. METODA SI APARAT PROPRIU PENTRU MASURAREA PRIZELOR

5.2.1. Metoda de măsură

Măsurarea rezistenței prizelor. Se poate face cu metoda compensării (puntea Behrend). Soluția a fost aplicată și la aparatele Norma, APP (IRME) etc. S-a propus ca (fig.5.7) și în cazul măsurării coeficienților de atingere să se folosească aceeași principiu de măsură - (al compensării în puntea Behrend). /5.6/.

În acest caz, după măsurarea rezistenței echilibrarea făcută cu R_e și cu Q_e pe poziția Q_e^{\max} se comută sonda S într-un punct S' , la distanța de 1 m de coborîrea la priză. În acest caz indicatorul de nul se dezechilibrează și readucerea sa la zero se realizează de astă dată conform ideii noi a autorului cu potenționetrul Q care în

momentul măsurării lui $R_p = R_e \frac{n_2}{n_1}$ era la valoarea Q_{\max} .

Noul echilibru se obține pentru o valoare a raportului

$$\frac{Q_e}{Q_{\max}} = K_e. \text{ În acest caz dacă } R_e \ll Q_{\max}.$$

$$U_1 = I_e R_e \frac{Q_e}{Q_{\max}} = I_e R_e K_e; U_{e'} = - I_e R_e K_e \frac{n_2}{n_1}$$

Pe de altă parte:

$$U_{PS'} = U_{AT} = U_p \cdot K_{AT} = I_e R_p \cdot K_{AT}$$

$$\text{Din: } U_{e'} + U_{PS'} = 0 \text{ la noul echilibru se obține } K_{AT} = K_e$$

deci raportul potenționetrului Q la noul echilibru este chiar coeficientul de atingere.

Aparatele actuale în punte Behrend, Norma, APP-2 (IRME) nu sînt proprii măsurărilor tensiunilor de atingere și pas din cauza /5.6/: potențialului perturbator, a sensibilității insuficiente pentru măsurarea coeficienților de atingere și pas și a rezistenței de intrare relativ mică ($r_1 < 3 \text{ k}\Omega$).

Aceste elemente au condus la necesitatea realizării unui aparat nou, structural diferit de cele existente.

5.2.2. Aparatul ATAP

În prima etapă s-a realizat un aparat pentru măsurarea coeficienților de atingere și de pas. Soluțiile de prioritate ale acestuia (fig.5.8) sînt alegerea unei frecvențe de lucru optime, introducerea unui filtru de rejecție care taie frecvența de 50 Hz (C) și a unui amplificator selectiv cu frecvența de rezonanță (280 Hz) egală cu cea de lucru (1). Utilizîndu-se în continuare detectorul de nul

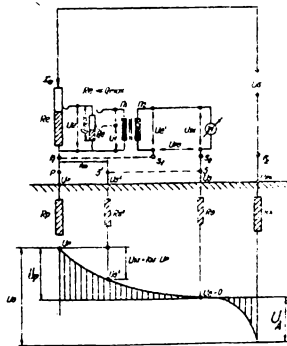


Fig.5.7. Măsurarea rezistenței și coeficienților de atingere cu metoda autorului

77
sensibil la fază (2 și 3).

Pentru mărirea sensibilității măsurării rezistența de intrare a circuitului de tensiune a fost mărită.

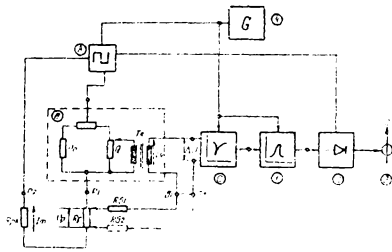


Fig.5.8. Schema bloc a aparatului ATAP -

- A - generator 275 ... 281 Hz
- B - grup măsură
- C - filtru rejecție 50 Hz
- 1 - amplificator selectiv
- 2 - detector sensibil la fază
- 3 - instrument indicator cu zero la mijloc
- 4 - baterii cu alimentare
- R_p - rezistența prizei de pământ
- R_{pA} - rezistența prizei auxiliare
- R_{S1} - R_{S2} - rezistența pe contact cu solul sondelor

a) Frecvența de lucru

Alegerea frecvenței de lucru s-a făcut pe baza datelor din fig.5.6.b care demonstrează că la 50 Hz tensiunile perturbatoare au valori de ordinul voltilor iar pentru 200 Hz și mai mult nu depășesc 12 mV, efectul lor putînd fi ușor înlăturat.

Depărtarea frecvenței de lucru de cea industrială contribuie la ușurarea realizării filtrului de rejecție. În cap.2 s-au calculat variația atenuării pe electrozi de priză și s-a tras concluzia că la $f = 300$ Hz și lungimi de priză pînă la 40 m atenuarea tensiunii pe priză nu depășește 4 % ceea ce se poate considera întrutotul acceptabil.

Măsurări multiple asupra unor prize de configurații diferite au condus de asemenea la concluzia că nici coeficienții de distribuție a potențialului nu se modifică semnificativ cu variația frecvenței pînă la 300 Hz (tabelul 5.1).

Tabelul 5.1.

Distribuția potențialului măsurată la diferite frecvențe

Distanțele de priză (m)	Direcția de măsură	Coeficienții de distribuție a potențialului măsurati cu voltmetrul electronic					Abate-rea maximă %	Valoarea măsurată cu ATAP
		50 Hz	78 Hz	125 Hz	225 Hz	280 Hz		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,2	Direcția I-a	0,212	0,205	0,207	0,203	0,21	4,5	0,22
0,4		0,27	0,267	0,274	0,27	0,278	4,2	0,30
0,6		0,38	0,38	0,385	0,385	0,395	3,9	0,42
0,8		0,455	0,45	0,463	0,46	0,473	4,9	0,47
1,0		0,555	0,55	0,56	0,55	0,555	2	0,555
0,2	Direcția II-a	0,40	0,387	0,392	0,39	0,406	2,2	0,42
0,4		0,485	0,485	0,475	0,475	0,50	5	0,48
0,6		0,575	0,56	0,56	0,57	0,585	5	0,57
0,8		0,629	0,624	0,615	0,615	0,635	3,2	0,63
1,0		0,655	0,655	0,64	0,66	0,675	5,5	0,67
	Tensiunea pe priză (mV)	0,206	0,206	0,205	0,204	0,205	-	-

Din aceste motive s-a adoptat frecvența de lucru de 280 Hz care nu este armonică a frecvenței industriale și asigură realizarea tuturor condițiilor impuse aparatului.

b) Rezistența de intrare a aparatului

La metoda voltampermetrică, rezultatele măsurării U_{AT} sînt cu atît mai exacte cu cît rezistența internă a voltmetrului e mai mare.

Totuși rezistența de intrare nu poate fi mărită prea mult deoarece în acest caz devin sensibile influențele cîmpurilor parazite exterioare din teren (radio, influențe electrostatice, etc.) /6.6/. Pentru a realiza aceste condiții contradictorii s-au încercat câteva valori pentru rezistența de intrare a aparatului și valoarea optimă găsită, confirmată de rezultatele ulterioare obținute a fost de 150 k Ω .

c) Puterea generatorului.

Sensibilitatea necesară la măsurarea coeficienților de atingere și pas s-a obținut prin următoarele metode:

- mărirea puterii generatorului față de ATAP, Norma etc.
- mărirea câștigului amplificatorului
- mărirea sensibilității detectorului

Acționînd individual asupra fiecărui element indicat s-ar fi obținut fie un aparat reportabil, avînd nevoie de alimentare de la acumulator fie o instabilitate a amplificatorului cu o hipersensibilitate la perturbații.

Problema dificilă ridicată de construcția aparatului a fost aceea a alegerii puterii la ieșirea generatorului. În acest sens s-au făcut investigații asupra unor prize de mare și medie extindere.

Măsurările executate cu GAF și voltmetru selectiv au confirmat presupunerea inițială ca la curenți mici K_{AT} și R_p sînt dependente de curentul prin priză. Rezultatele măsurărilor prezentate în tabelul 5.2 indică faptul că pentru măsurări corecte sînt necesari curenți de măsură de ordinul zecimilor de amperi (peste 0,5A pînă la 1 A).

În acest sens s-a adoptat soluția de compromis cu un generator de 2 W la ieșire.

Tabelul 5.2.

Influența curentului prin priză asupra rezistenței și coeficienților de atingere măsurați

f	50 Hz				75 Hz				280 Hz				
Priza model 1 (400)	U_{00} (V)	0,165	0,54	2,65	2,85	0,170	0,550	2,60	2,92	0,180	0,56	2,60	2,80
	U_{05} (V)	0,033	0,041	0,13	0,13	0,044	0,045	0,13	0,13	0,050	0,050	0,135	0,118
	I_p (A)	0,086	0,328	1,89	2,03	0,090	0,330	1,840	2,060	0,088	0,340	1,965	2,065
	R_p	1,87	1,49	1,41	1,40	1,82	1,52	1,39	1,40	1,97	1,50	1,36	1,36
	U_{AT}	0,132	0,50	2,52	0,72	0,126	0,505	2,47	2,79	0,130	0,51	2,465	2,662
Priza model 2 (200)	K_{AT}	0,80	0,92	0,955	0,955	0,74	0,917	0,953	0,955	0,725	0,91	0,948	0,948
	U_{00} (V)	0,20	0,33	0,65	1,28	0,195	0,34	0,64	1,28	0,215	0,35	0,670	1,35
	U_{05} (V)	0,0266	0,0275	0,03	0,042	0,021	0,022	0,026	0,042	0,033	0,036	0,037	0,043
	I_p (A)	0,065	0,117	0,233	0,515	0,066	0,116	0,246	0,518	0,059	0,110	0,224	0,485
	R_p	3,08	2,6	2,73	2,50	2,94	2,92	2,62	2,46	3,62	3,14	2,98	2,74
	U_{AT}	0,174	0,302	0,62	1,238	0,174	0,32	0,614	1,238	0,182	0,314	0,633	1,30
	K_{AT}	0,87	0,915	0,955	0,963	0,895	0,942	0,96	0,963	0,845	0,90	0,948	0,965

d) Descrierea schemei bloc a aparatului

Schema bloc a aparatului este prezentată în fig.5.8.

Acesta are o sursă proprie de alimentare A în figură, generator convertitor de tensiune rectangulară, cu tensiune constantă și frecvență fixă, fiind portabil și cu alimentare de la baterii uscate $6 \times 1,5V$.

Schema realizată de aparat debitează curentul I_m în circuitul de măsură format de grupul de măsură B, rezistența prizei de măsură R_p și rezistența prizei auxiliare $R_{...}$.

În scopul mării preciziei se înlătură efectul tensiunilor perturbatoare ce apar pe R_p prin utilizarea la intrarea amplificatorului de măsură a unui filtru de rejecție, "C" acordat pe frecvența rețelei (50 Hz). În același scop amplificatorul l este selectiv, fiind acordat pe 280 Hz și realizînd o atenuare de 10

de la frecvențele de 250 și 300 Hz.

Detectorul 2 care alimentează aparatul indicator 3 este de tip sincron, fiind comandat tot de 3.

Definițiile de atingere și de pas se măsoară cu ajutorul sondelor R_{22} și R_{32} și R_{32} (K_{PAS}).

3.2.3. Rezultate experimentale

Aparatul construit a fost verificat prin măsurări în laborator și în condiții de teren.

Măsurările în laborator au simulat condițiile practice din teren pe prize de curent 3,37, 27- care au avut o tensiune perturbatoare de 50 Hz de valori mai mari de 1 V.

Din măsurările în laborator s-a văzut /6.8/ că aparatul executat corespunde condițiilor impuse, precizia lui fiind corespunzătoare și influența tensiunii perturbatoare neimportantă (< 2,5 %). S-a putut reține de asemenea că sensibilitatea aparatului este corespunzătoare.

La verificările interne pe prize de configurații diverse ($R_p=0975 \dots 20\Omega$, $U_p=280 \dots 3,78 \text{ V}$), comparate cu corfoane de legătură ecranate la baterie între precizia obținută cu voltmetrul electronic și cu ATAP corespund clasei de precizie 2,5 și care se vedează corespunzătoare scopurilor practice.

După verificarea în teren a primei variante a aparatului s-a trecut la conceperea unui aparat mai perfecționat care însușește posibilitățile aparatului

ATAP existent în teren și a ANNE-ului, permițând măsurarea atât a tensiunilor de atingere și de pas cât și a rezistivității solului și a rezistenței prizelor. Realizarea acestui aparat reprezintă o prioritate tehnică românească, fapt confirmat de documentul elaborat de SAIM /5.1/.

Întrucât scopul în utilizarea aparatului ATAP la măsurarea rezistivității solului este prezentat în fig. 5.10. Se așează în ordine electrozilor ANNE plasati ca în fig. 5.11 și se stabilește ferocitatea legăturii între bornele S_1 și S_2 ale aparatului respectiv circuitul de curent de cel de tensiune. Se conectează bornele P_1 , S_1

și S_2 la elementul ANNE în ordinea indicată. Aparatul este astfel pregătit pentru măsurare, se ține să se aducă la zero indicatorul de nul (echilibrare). După aceea se poate să se măsoare în teren U_N și să se măsoare I_N sau să se măsoare

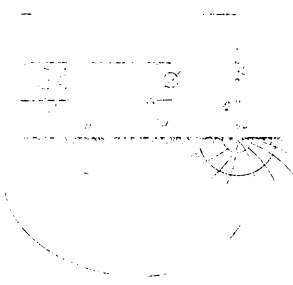


Fig. 5.10. Măsurarea rezistivității solului cu aparatul ATAP

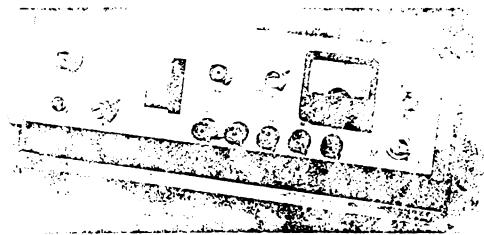


Fig. 5.9. Fotografia aparatului ATAP

$$U_{AN} + U_e = 0; U_e = -U_c = -I_e R_c = \frac{I_N R_2}{n_1}$$

Rezultat:

$$\frac{U_{AN}}{-e} = R_2 \frac{n_2}{n_1} = R_T$$

R_T fiind rezistența efectivă măsurată de aparat în momentul echilibrului

$$\frac{U_{AN}}{-e} = R_T$$

și se poate, din capitolul 2 al lucrării (2.7)

$$R = R \frac{U_{AN}}{U_e} = R_T \left(R_2 \frac{n_2}{n_1} \right)$$

cu acest mod aparatul ATAP permite măsurarea directă a rezistivității solu-

lui, a rezistenței prizelor și a tensiunilor de atingere și de pas pe teritoriul acestora.

5.3. TERMOMETRU CU TERMISTOR

În cadrul lucrărilor de cercetare întreprinse de autor a apărut necesitatea măsurării temperaturii diferitelor straturi de sol. Specificul măsurărilor a impus utilizarea altor aparate decât termometrul cu tub capilar, neadecvat măsurărilor de teren și impropriu introducerii la diferite adâncimi în pământ.

Rezolvarea problemei s-a făcut prin construirea unui termometru cu termistor, simplu, ușor de realizat și convenabil în vederea măsurărilor pentru care a fost conceput.

Destinația termometrului a permis alegerea între diferitele soluții de măsurare a temperaturii /5.10/, preferându-se soluția cu termistor, avantajele principale ale acestuia sînt următoarele. Termistoarele au un coeficient de temperatură negativ de cca. 8-10 ori mai mare ca cel al termorezistențelor, acestea au rezistența mecanică și stabilitatea termică mari, dimensiuni reduse și greutate scăzută etc.

Un dezavantaj serios al semiconductoarelor utilizate în schemele de măsurare este imposibilitatea interșanjabilității traductoarelor, deoarece acestea nu au aceleași caracteristici de temperatură. Pentru cazul de față, nefiind vorba de producție în serie, acest dezavantaj nu intervine în analiză. Fenomenul de îmbătrânire nu are o influență deosebită asupra caracteristicilor de temperatură a acestuia.

a) Schema de măsurare

Soluția clasică pentru măsurarea temperaturii cu ajutorul traductoarelor rezistive este cea a punții de curent continuu, dezechilibrată; schema de principiu a termometrului este cea din figura 5.11.

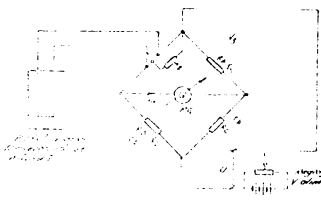


Fig. 5.11. Principiul termometrului cu termistor

Sonda termistor este plasată în vârful unei tije metalice din oțel cadmiat având o lungime de 1200 mm și un diametru de 27 mm. Ea este introdusă în vârful unei plăci tronconice de plexiglas. Pentru scopul urmărit soluția respectivă este cea mai indicată. În vederea măsurării temperaturii în alte locuri se pot adopta și alte tipuri de sondă. Aspectul general al aparatului este prezentat în Fig. 5.12.

Datele de proiectare și elemente de execuție sînt prezentate în /5.13/.

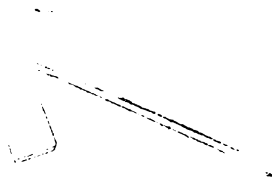


Fig. 5.12. Vedere de ansamblu a termometrului și a sondei

Aparatul experimentat în multiple ocazii pe teren a dat deplină satisfacție.

Bibliografie

- 5.1. 3 RE-I-23 Instrucțiuni pentru exploatarea și întreținerea instalațiilor de legare la pământ, MEE-ODE-IRME 1970.
- 5.2. OSION, A.B. Ob izmerenii soprotivlenii zazemleniia. In: Electricestvo 77, nr.2. febr.1957, p.56-58.
- 5.3. IACOBS, A.I. O neobhodimosti peresmotra rekomandații pri izmerenii soprotivleniia zazemlitatei. In: Electriceshie Stanții 36, nr.5, mai 1965, p.67-71.
- 5.4. SORA, C. Le quadripole électrique. Paris, Dunod 1970.
- 5.5. UZELAC, B. Ispitivane i metode mjereniija napona dodira i napona Koraca. In: Energija (NSFI) 16 nr.3-4 mart.-apr.1967 p.94-110.
- 5.6. GOIA, L. Măsurarea tensiunilor de atingere și de pas IRME - GEE. Vol.86 - 1969.
- 5.7. STOICA, A. Măsurarea tensiunilor de atingere și pas. In: Protecția Muncii și Igiena industrială nr.1, ian.1970, p.30-33.
- 5.8. GOIA, L. Metodă și aparat pentru măsurarea coeficienților de atingere și de pas instalațiile energetice. Dosar de invenție depus la OSIM sub nr.79061 din 19.04.1971. Acordare a brevetului 14.12.73. prin Hotărârea OSIM.
- 5.9. GOIA, L. Măsurarea parametrilor instalațiilor de legare la pământ. In: Energetica 21 nr.8 aug.1973, p.380-386.
- 5.10. GOIA, L. Termometru cu termistor. Electrotehnica 16 nr.3, mart.1968 p.105-109.

Studiile întreprinse de autor în domeniile prezentate în lucrare au permis să se contureze o serie de rezultate și concluzii, de o deosebită utilitate pentru organizațiile de exploatare și proiectare ale instalațiilor de legare la pământ în continuare se prezintă principalele rezultate și contribuții ale autorului în legătură cu următoarele aspecte mai importante: rezistivitatea solului și cimpului electric din sol; calculul și caracterizarea prizelor naturale; măsurări și experimentări.

6/ La proiectarea instalațiilor de legare la pământ mai importante anar obligatorie predeterminarea prin măsurări a rezistivității solului pe teritoriul acestora. Valoarea rezistivității solului influențează direct atât rezistența de dispersie a prizelor, stabilitatea termică a acestora cât și valorile coeficienților de impuls, caracterizând comportarea prizei la regimul de frecvență industrială și la suprațensiuni atmosferice. Măsurarea rezistivității exclude imorvizaziunile ce se adoptă actualmente în multe organizații de proiectare.

Măsurarea rezistivității se face de preferință cu ajutorul metodei geoelectrice sau a celor patru electrozi. Determinarea parametrilor electrici și geometrici ai solului se poate executa cu ajutorul curbelor precalculate, construite de autor după modelele din literatură.

Rezultatele sondajelor efectuate pe teritoriul țării indică faptul că pe majoritatea terenurilor în care se construiesc prize de pământ, solul are rezistivități sub 100 Ω m. Frecvența solurilor cu rezistivitatea peste 300 Ω m este redusă (sub 20 %). Solul pe teritoriile studiate, prezintă adeseori o structură neomogenă pe verticală. Cea mai mare frecvență o are structura cu două straturi, cu stratul inferior cu rezistivitate mică. Cum în straturile din profunzime și variațiile rezoniere ale valorii rezistivității sînt diminuate, aceste constatări sînt argumente serioase pentru utilizarea prizelor naturale.

Calculul exact al rezistenței de dispersie și a tensiunilor de atingere și pas pe baza relațiilor de calcul utilizate pentru prima oară în RSR de autor, în cazul solului neomogen implică efectuarea unor sume - serii infinite - care nu se poate rezolva decît cu ajutorul calculatoarelor. Influența neomogenității solului pe verticală este determinantă în stabilirea valorii rezistenței de dispersie, avînd o influență mai redusă în fixarea valorilor coeficienților de atingere și de pas. În cazul solului omogen acești coeficienți nu depind de rezistivitatea solului.

În cadrul oferit de particularitățile instalațiilor de legare la pământ precizia calculului prizelor nu trebuie exagerată. Aceasta ținînd cont de limitele practice ale măsurărilor executate în teren, de factori alecatori ce pot influența proprietățile solului și de costul prohibitiv al orilor de calculator. Din acest punct de vedere, proiectarea instalațiilor de legare la pământ devine din ce în ce mai mult o problemă a analizei operaționale.

Studiul cimpului electric din sol trebuie în mod obligatoriu conectat cu analiza regimului termic provocat de trecerea curentului. În acest domeniu conex, autorul a realizat o serie de experimentări și a adus contribuții teoretice în privința perfecționării preciziei calculului. Relațiile deduse concordă mult mai bine cu rezultatele experimentale obținute decît actualele relații indicate de literatură. Studiile efectuate au cuprins atît regimul tranzitoriu, caracteristic solicitărilor termice a solului datorate curenților de scurtcircuit cît și regimului termic permanent, caracteristic solicitărilor de durată practic nelimitată.

Toate probele practice executate în teren au permis să se stabilească faptul că relațiile de calcul a stabilității termice a prizelor indicate în literatură sînt mult acoperitoare, fiind confirmări indirecte a rezultatelor teoretice obținute de autor.

În domeniul frecvențelor înalte, caracteristic regimului de impuls prizele de pământ se comportă mult diferit de frecvența industrială, calculul rezistenței de dispersie nemai făcîndu-se după metodele valabile pentru frecvența industrială, priza prezentînd o impedanță cu caracter inductiv.

În aceste condiții, apare o anumită lungime critică, peste care impedanța de dispersie a prizei crește cu creșterea lungimii prizei. Lungimea critică depinde în mod esențial de rezistivitatea solului și de frecvență.

În cazul descărcărilor atmosferice, datorită caracterului specific al procesului din sol apare o micșorare a rezistenței de impuls față de cea de la 50 Hz caracterizată de coeficienții de impuls subunitari care depind de lungimea prizei, de valoarea curentului de impuls și de rezistivitatea solului.

În general solul cît mai ales betonul prezintă în anumite condiții un ca-

racter neliniar, chiar la frecvență industrială, rezistivitatea acestora scade cu creșterea tensiunii. Acest caracter particular al conductției în sol și beton poate fi pus în legătură cu modificarea rezistenței de contact între particolele de sol cu tensiunea aplicată.

6.2 Prizele naturale sînt elemente metalice cu alte destinații, care pot prelua și sarcini legate de trecerea curenților de defect. În general prizele naturale ale fundațiilor stîlpilor LEA, realizate după modul propus de autor reprezintă elemente cu rezistență de dispersie redusă, sigure și trecînd în straturile profunde au mare stabilitate la influența factorilor meteorologici și climatici. Ele au de asemenea o bună comportare la solicitările normale de exploatare.

În cazul LEA 110-400 kV prizele naturale realizează o bună protecție împotriva supratensiunilor atmosferice, curenții de protecție pe care îi realizează aceste prize asigurînd în majoritatea cazurilor condițiile impuse, și nemaiimpunînd plantarea altor prize suplimentare.

Utilizarea practică a acestei proprietăți a prizelor naturale, soluție ușor realizabilă în cadrul propunerilor autorului, poate permite economisirea anuală a unor fonduri materiale importante. Considerînd că 80 % din liniile construite anual în RSR (cca 1000 km LEA 110-400 kV) sînt în soluri cu rezistivitatea sub 300 $\Omega\cdot\text{m}$ și în zone cu circulație redusă (nelocuite) economiile obținute prin eliminarea prizelor artificiale (circa 650 lei/stîlp) ar ajunge: 1000 km \cdot 4,25 stîlpi/km \cdot 0,80 \cdot 650 = 2.000.000 lei. Pe lîngă economicitatea soluției, avantajele prizelor naturale provin și din economisirea fierului.

Prizele naturale nu pot asigura condițiile de protecție împotriva accidentelor prin atingere îndirectă a stîlpilor. Din acest motiv, în zonele cu circulație frecventă (locuite) ele trebuie prevăzute cu prize artificiale corespunzătoare, dimensionate ținînd cont și de contribuția prizelor naturale. Acest dezavantaj este pe deplin compensat de frecvența redusă a stîlpilor existenți în zone locuite.

Pentru asigurarea unei funcționări termic stabile a prizelor naturale ale stîlpilor de medie tensiune și deci a unei bune fiabilități a rețelelor de MT în aceste rețele trebuie asigurată protecția împotriva defectelor de durată cu curenți mari în aceste rețele care conduc la solicitări termice deosebite.

Utilizarea prizelor naturale în rețelele de joasă tensiune permite reducerea costului construcției rețelei prin renunțarea la prizele artificiale montate pe traseul plecării (din 200...500 m) și de asemenea reducerea pericolelor de accidente în rețea prin diminuarea pericolelor ce apar pe nul în cazul scurtcircuitelor. Renunțarea la prizele de pe traseul liniei în cazul utilizării prizelor naturale conduce la economii estimate de 0,5...0,8 milioane anual.

În cercetarea prizelor naturale din rețelele de joasă tensiune, autorul a adus contribuții în stabilirea unui model original de calcul a tensiunilor ce apar pe nul în cazul scurtcircuitelor și în precizarea condițiilor în care se asigură securitatea în aceste rețele. În acest sens s-a stabilit că sînt absolut necesare prizele artificiale de la post și de la capetele plecării de joasă tensiune.

Utilizarea prizelor naturale în stațiile și posturile de transformare conduce la diminuarea importantă a rezistenței de legare la pămînt a stațiilor, dar este legată și de unele pericole privind apariția prin cuplaj rezistiv a potențialului pe prizele vecine, legate prin conducte cu priza stației respective. De asemenea cuplajul rezistiv are efecte negative solicitînd izolația cablurilor de telecomunicații sau telecomandă ce intră pe teritoriul stațiilor.

Evitarea acestor neajunsuri se poate face pe baza metodelor și concluziilor din lucrare. Principala obligație este legarea tuturor conductelor metalice ce intră pe teritoriul stației la priza acesteia.

În afara avantajelor obținute prin această soluție, prin diminuarea rezistenței prizei, nelegarea acestora poate prezenta pericole de electrocutare mult mai importante pentru personalul de stație, prin faptul că elementele respective pot aduce potențialul nul în stație.

6.3. S-au studiat pentru prima dată în țara noastră prizele de pămînt prin modelare în cuvele electrolitice tridimensionale; Concluziile obținute la măsurări confirmă pe de o parte rezultatele calculului analitic și permit determinarea cu un efort minim a rezistenței prizei de pămînt pentru diferite configurații de stîlpi și fundații înființate în RSR.

Autorul a stabilit după o metodologie proprie modul practic de execuție a măsurărilor parametrilor prizelor de pămînt (R_p ; ρ ; K_{NP} ; K_{PAS}). Aplicarea concluziilor

lor studiilor teoretice, confirmate în multe experimentări, permite anularea erorilor de măsură sistematice și ridică mult acuratețea rezultatelor, condiție de bază în aprecierea instalațiilor de legare la pământ.

Problemele ridicate de executarea în teren a măsurărilor prizelor au putut fi rezolvate în modul cel mai simplu prin executarea unui aparat specializat, ce constituie obiectul unei invenții. Cu ajutorul acestuia se pot măsura rezistența prizelor, coeficienții de atingere și de pas și rezistivitatea solului. Soluțiile de prioritate ale acestui aparat constau în metoda de măsurare adoptată, în alegerea unei frecvențe de lucru convenabile și în eliminarea influențelor perturbatoare cu ajutorul unui amplificator selectiv, a unui filtru de rejecție și a detectorului sincron.

Adoptarea aparatului simplifică metodologia măsurărilor și reduce în mod esențial timpul de lucru, crescând evident productivitatea muncii la măsurări.
