

Capitolul 5 – Proiectarea și verificarea prizelor de pământ

5.1. Bazele teoretice ale calculului și proiectării prizelor de pământ

Priza de pământ este un conductor metalic sau un ansamblu de conductoare metalice interconectate sau alte părți metalice acționând în aceeași manieră, îngropate în pământ și aflate în contact electric cu acesta sau introduse în beton, elementele de beton în care sunt înglobați electrozii prizei de pământ trebuind să aibă o suprafață mare de contact cu pământul (de exemplu, așa cum sunt fundațiile clădirilor).

În calculele de dimensionare ale prizelor de pământ și ale instalațiilor de protecție prin legare la pământ, se operează, în mod frecvent, cu o serie de mărimi, precum:

- **Potențialul prizei de pământ, V_p** , - este diferența de potențial care apare între priza de pământ și zona de potențial nul, la o valoare dată a intensității curentului care circulă prin acea instalație de legare la pământ (tensiunea maximă a prizei de pământ, U_p , la o valoare dată a intensității curentului care circulă prin aceasta);
- **Rezistivitatea solului (rezistența specifică a solului), ρ** , care se măsoară în Ωm , este rezistența măsurată între două fețe opuse ale unui metru cub de pământ, așa cum rezultă din reprezentarea grafică dată în figura 5.1.
- **Potențialul suprafeței solului, V_x** , este diferența de potențial dintre un punct x , situat pe suprafața solului, și pământul de referință.

Proprietățile electrice ale prizei de pământ depind de rezistența prizei de pământ și configurația acesteia.

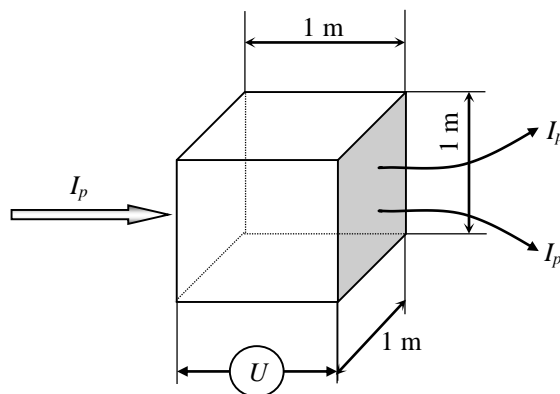


Fig. 5.1. Schemă care ilustrează sensul fizic al rezistivității solului, ρ

Rezistența prizei de pământ determină relația dintre potențialul prizei, V_p , și valoarea intensității curentului de punere la pământ, iar configurația prizei de pământ

Electrosecuritate

determină repartiția potențialului la suprafața solului, urmare a trecerii curentului spre pământ.

Repartiția potențialului la suprafața solului reprezintă, de asemenea, un element important în evaluarea gradului de protecție împotriva electrocutării, întrucât ea determină valorile tensiunilor accidentale de atingere și de pas.

Rezistența totală a unei prize de pământ poate fi considerată ca fiind egală cu rezistența de dispersie a acesteia, rezistența părților metalice constructive ale prizei de pământ fiind mult mai mică, ca urmare aceasta fiind neglijată. Rezistența de dispersie este dată de rezistența solului între priza de pământ și zona de potențial nul.

5.1.1. Rezistența prizei de pământ și distribuția potențialelor

Pentru frecvențe mici ale tensiunii aplicate, se poate considera că impedanța de legare la pământ Z_p este egală cu rezistența prizei de pământ, R_p , care, este practic egală cu rezistența de dispersie a acesteia, R_{pD} :

$$Z_p \approx R_p \approx R_{pD} . \quad (5.1)$$

Rezistența R_p a unei prize de pământ depinde de proprietățile electrice ale solului în care este realizată, în principal de rezistivitatea acestuia, precum și de configurația prizei. Alții factorii care influențează valoarea rezistenței unei prize de pământ sunt: structura solului, conținutul de umiditate din sol, structura electrozilor utilizați, respectiv adâncimea de îngropare a acestora.

a. Influența structurii solului

Proprietățile electrice ale solului sunt caracterizate prin rezistivitatea acestuia. Determinarea valorii acesteia este dificilă, deoarece solul nu are o structură omogenă, fiind format din straturi de materiale diferite, iar rezistivitatea unui anumit sol variază în limite largi, așa cum se poate observa din datele prezentate în tabelul 5.1 fiind puternic dependentă și de gradul de umiditate.

Calcularea rezistenței solului este o sarcină dificilă datorită variației în limite largi a rezistivității solului. Acesta este motivul pentru care, în multe situații practice, se acceptă o structură omogenă a solului, cu o valoare medie a rezistivității acestuia. Dacă nu se dispune de informații reale asupra valorii rezistivității solului, atunci se acceptă valoarea prezumată de $\rho = 100 \Omega\text{m}$.

Totuși, așa cum se indică în tabelul 5.1, valorile reale pot fi foarte diferite, astfel încât trebuie avute în vedere teste de verificare în instalația finală, împreună cu o estimare a variațiilor posibile ale rezistenței de dispersie, determinate de condițiile climatice și de uzura în timp.

Electrosecuritate

Tabelul 5.1. Rezistivitatea solului ρ pentru diferite tipuri de sol și beton

| Tipul solului | Rezistivitatea solului ρ [Ωm] | |
|--|---|---------------|
| | Domeniu de valori | Valoare medie |
| Sol mlăștinos | 2 ÷ 50 | 30 |
| Argilă | 2 ÷ 200 | 40 |
| Mâl și argilă nisipoasă, humus | 20 ÷ 260 | 100 |
| Nisip și pământ nisipos | 50 ÷ 3000 | 200 (umed) |
| Turbă | > 1200 | 200 |
| Pietriș umed | 50 ÷ 3000 | 1000 (umed) |
| Piatră și pământ pietros | 100 ÷ 8000 | 2000 |
| Beton: o parte ciment și trei părți nisip | 50 ÷ 300 | 150 |
| Beton: o parte ciment și cinci părți pietriș | 100 ÷ 8000 | 400 |

b. Influența umidității din sol

Determinarea rezistivității solului pe cale analitică este dificilă și ca urmare a influenței pe care o are conținutul de umiditate din sol. Acesta se poate schimba în limite largi, depinzând de amplasarea geografică și de condițiile atmosferice, de la o valoare nesemnificativă a umidității, așa cum este cazul regiunilor deșertice, și până la valori de circa 80 %, așa cum este cazul regiunilor mlăștinoase.

Un exemplu edificator, în acest sens, fiind acela din figura 5.2, în care este redată dependența dintre rezistivitate și umiditate pentru argilă. Se poate observa că pentru valori ale umidității mai mari de 30 %, modificările rezistivității sunt foarte lente și, practic, nesemnificative. În același timp, atunci când solul argilos este uscat, respectiv pentru valori ale umidității relative mai mici de 20 %, rezistivitatea crește foarte rapid.

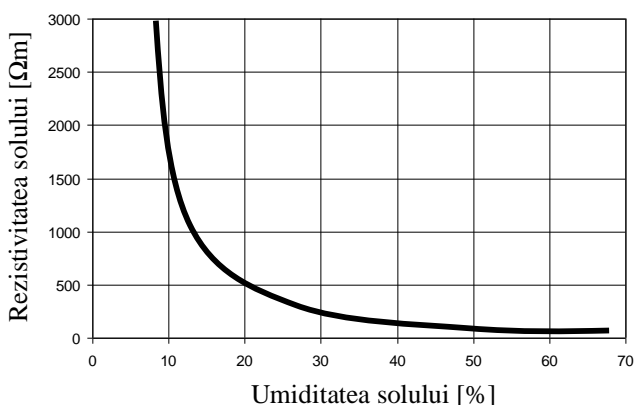


Fig. 5.2. Rezistivitatea solului, pentru argilă, în funcție de umiditatea relativă a acestuia

În Europa, valoarea maximă a rezistenței prizei de pământ fiind atinsă în februarie, iar valoarea minimă în august. Valorile medii sunt obținute în lunile mai și noiembrie.

Electrosecuritate

Valoarea din februarie este cu aproximativ 30 % mai mare decât valoarea medie, în timp ce în august ea este cu circa 30 % mai mică decât media.

c. Influența structurii electrozilor

Pentru a obține valori scăzute ale rezistenței prizelor de pământ, densitatea curentului, care se scurge de la electrozii metalici spre pământ, trebuie să fie redusă, adică volumul de pământ prin care se scurge acest curent trebuie să fie cât mai mare posibil. Îndată ce curentul trece de la electrozii metalici ai prizei la pământ, el se dispersează, reducându-se densitatea de curent. Dacă electrodul are dimensiuni mici, teoretic este un punct, acest efect este semnificativ dar el se reduce foarte mult pentru un electrod tip placă, unde disiparea este efectivă numai pe muchii. Aceasta înseamnă că electrozii realizați din tije, țevi sau conductoare au o rezistență de dispersie mult mai mică decât, de exemplu, o placă având aceeași suprafață. În plus, fenomenul de coroziune, determinat de circulația curentului alternativ sau continuu, se intensifică odată cu creșterea densității de curent. În acest fel, densități mici de curent fac ca durata de viață a electrozilor prizelor de pământ să fie mai mare.

Dependența rezistenței prizei de pământ funcție de raza electrodului acesteia, pentru un sol de rezistivitate dată $\rho = 100 \Omega\cdot\text{m}$, este reprezentată grafic în figura următoare:

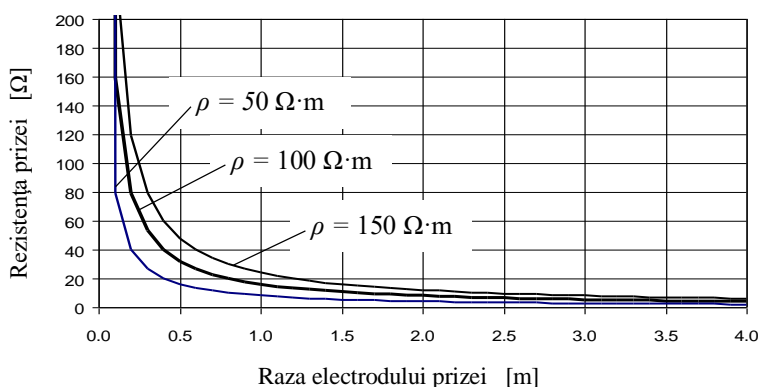


Fig. 5.3. Dependența rezistenței prizei de pământ de raza electrodului acesteia

Se poate observa că raza echivalentă a electrozilor prizei trebuie să depășească o anumită dimensiune, pentru a obține o priză de pământ de bună calitate. Creșterea razei echivalente, peste un anumit prag, nu determină o reducere semnificativă a rezistenței prizei de pământ, într-un sol de rezistivitate dată.

Electrosecuritate

d. Influența adâncimii de îngropare a electrozilor

Rezistența unei prize de pământ depinde, în mod cu totul semnificativ, de adâncimea de îngropare a electrozilor acesteia. Explicația unui astfel de comportament rezultă din faptul că conținutul de umiditate din sol este mai mare și mai stabil în timp pentru straturile mai adânci decât pentru cele superficiale.

Se pot deosebi mai multe tipuri de prize de pământ, printre care:

- prize simple de suprafață (prize simple orizontale) - realizate din benzi sau conductoare plasate orizontal sub formă de fâșii sau inel;
- priză orizontală - realizată ca o rețea (plasă) amplasată la mică adâncime;
- cabluri cu manta metalică neprotejată sau armături care se comportă ca o priză simplă orizontală;
- prize naturale - formate din părțile de structură conductoare conținute în betonul fundației și care asigură suprafață mare de contact cu solul;
- prize tijă - constând din țevi, bare etc. și care sunt instalate sau îngropate la o adâncime mai mare de un metru, uzual între 3 metri și 30 metri sau chiar mai mult.

Primele patru configurații sunt prize de pământ de suprafață, care sunt realizate, în mod obișnuit, din conductoare neizolate sau benzi poziționate într-o configurație radială, circulară, de tip rețea sau o combinație a acestora, îngropate la o adâncime mică, de până la un metru. Un avantaj important al acestei soluții îl constituie repartitia favorabilă a potențialelor la suprafața solului.

Prizele tijă aparțin așa-numitelor prize de adâncime; avantajul acestora constă în faptul că ele traversează straturi având rezistivități diferite și sunt deosebit de utile în locurile unde straturile superficiale au conductivitate scăzută. În acest fel, se poate obține, cu ușurință, o valoare redusă a rezistenței de dispersie a prizei. Un alt avantaj al prizelor tijă este acela că ele pot fi realizate în locuri unde suprafața disponibilă pentru amplasarea electrozilor este redusă. Totuși, distribuția potențialelor la suprafața solului este defavorabilă, pentru acest tip de prize, astfel încât, în practică, se utilizează o combinație de prize tijă, verticale, și de suprafață, orizontale, în scopul de a obține atât o bună rezistență a prizei cât și distribuția dorită a potențialelor.

Observația anterioară, referitoare la necesitatea realizării unei prize de pământ cu structură mai complexă, este susținută și de reprezentarea grafică din figura 5.4, unde sunt evidențiate, în manieră comparativă, tensiunile de atingere corespunzătoare a două prize de pământ, una simplă, realizată dintr-un singur electrod vertical, și una complexă, de tip plasă sau rețea, cu mai multe ochiuri.

Astfel, persoanele notate cu A și B sunt supuse tensiunii de atingere în timp ce persoana notată cu C este expusă unei tensiuni de pas. Se poate observa că persoana

Electrosecuritate

notată cu A este supusă unei tensiuni de atingere semnificativ mai mari decât persoana notată cu B.

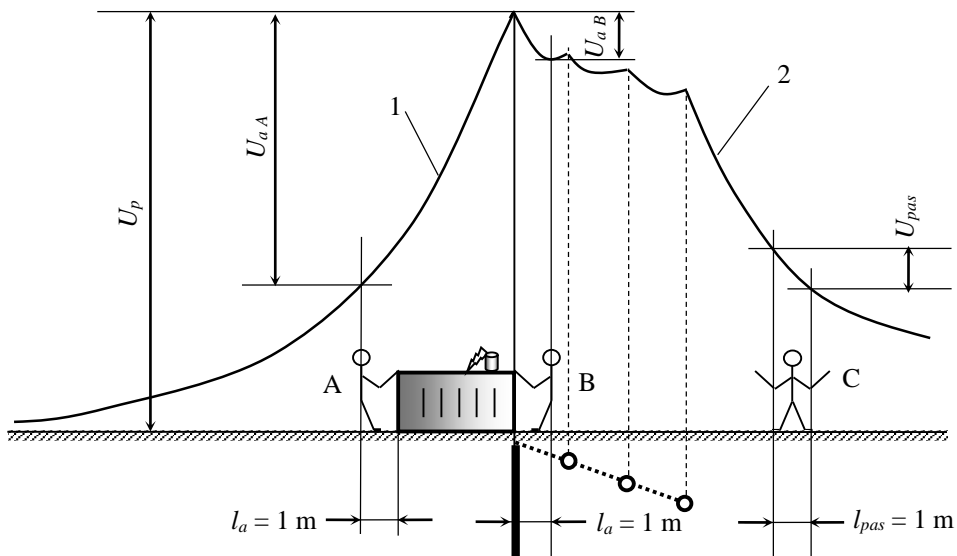


Fig. 5.4. Comparație între distribuția potențialului la suprafața solului în timpul trecerii curentului prin instalația de legare la pământ, pentru două tipuri de prize de pământ: 1 - priză tip tijă/verticală; 2 - priză tip rețea; U_p - potențialul prizei de pământ; U_{aA} , U_{aB} - tensiunile de atingere corespunzătoare persoanelor A și respectiv B; U_{pas} - tensiunea de pas.

Partea din stânga a figurii 5.4 prezintă repartiția potențialului funcție de distanță, în raport cu electrodul prizei, pentru o priză tijă, verticală, în timp ce partea dreaptă este caracteristică unei prize de tip rețea. Priza tijă verticală (1) se caracterizează printr-o rezistență de dispersie scăzută, datorită adâncimii mari de pătrundere în sol, însă repartiția potențialelor este mult mai defavorabilă decât în cazul prizelor orizontale, caracterizate printr-un profil aplatizat al potențialului la suprafața solului. Tensiunea de atingere este considerabil mai mare la priza tijă verticală (1), decât la cea de tip rețea (2). De asemenea, tensiunile de pas sunt mai puțin periculoase în cazul prizelor de tip rețea decât în cazul prizelor simple, de tip tijă verticală.

În concluzie, rezistența prizei de pământ determină valoarea maximă a potențialului prizei de pământ (căderea totală de tensiune pe priză la scurgerea prin aceasta unui anumit curent), în timp ce configurația prizei are o influență determinantă asupra repartiției potențialului la suprafața solului. În aceste condiții, rezistența și configurația prizelor de pământ trebuie considerate împreună, în calculele de dimensionare.

5.1.2. Estimarea proprietăților electrice ale prizei de pământ

Un model de bază pentru configurația unei prize de pământ, utilizat în scopul punerii în evidență a proprietăților electrice fundamentale, îl reprezintă o semisferă îngropată la suprafața solului, conform reprezentării grafice din figura 5.5.

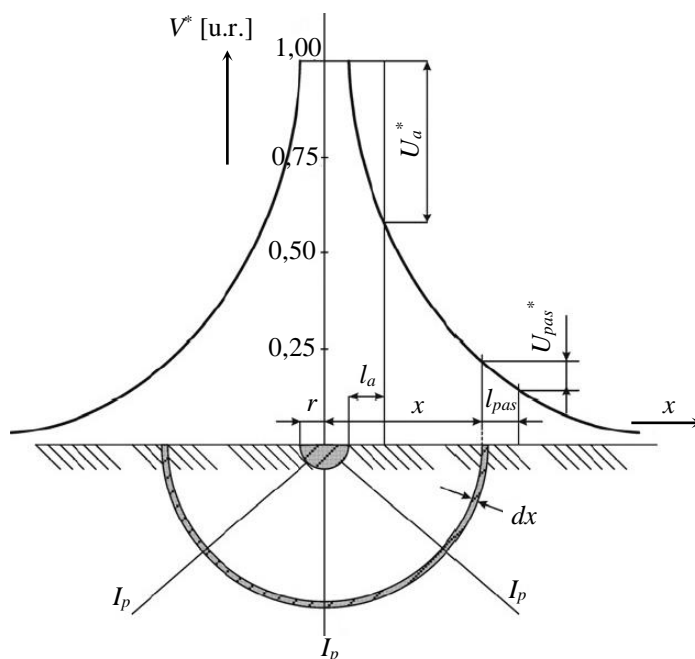


Fig. 5.5. Ilustrarea noțiunii de electrod de pământ semisferic, cu indicarea parametrilor necesari pentru calculul rezistenței prizei de pământ și repartiția potențialului la suprafața solului, în ipoteza solurilor de rezistivitate constantă

Semnificația notațiilor din figura anterioară este următoarea:

r – raza electrodului semisferic, îngropat la suprafața solului;

x – distanța măsurată, la suprafața solului, în raport cu centrul electrodului;

V^* - repartiția potențialului prizei, dat în unități relative, prin raportare la tensiunea maximă a prizei de pământ, pentru cazul trecerii unui curent de defect de o anumită intensitate, dată;

l_a – distanța pentru care se măsoară tensiunea de atingere (definită, prin normative, ca fiind de 0,8 m, în condițiile în care măsurătorile se fac pentru o distanță de 1 m);

l_{pas} – distanța pentru care se măsoară tensiunea de pas (definită, prin normative, ca fiind de 0,8 m, în condițiile în care măsurătorile se fac pentru o distanță de 1 m);

U_a^* - tensiunea de atingere, în unități relative;

U_{pas}^* - tensiunea de pas, dată, de asemenea, în unități relative.

Electrosecuritate

Potențialul unei prize de pământ, precum și repartiția potențialului la suprafața solului, în timpul trecerii curentului prin instalația de legare la pământ, sunt parametri importanți pentru dimensionarea protecției împotriva electrocutării. Pentru o priză de pământ simplă, relațiile de bază ale calculului repartiției potențialului prizei pot fi determinate pe baza modelului pământului omogen, conform notațiilor din figura 5.5.

Astfel, potențialul oricărui punct situat la distanța x de centrul electrodului prin care trece curentul I_p poate fi calculat cu o relație de forma:

$$V_x = R_p \cdot I_p \approx R_D \cdot I_p = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot x} \cdot I_p, \quad (5.2)$$

relația de calcul a rezistenței prizei de pământ fiind de forma:

$$R_p = \frac{\rho}{2 \cdot \pi} \cdot \int_r^\infty \frac{1}{x^2} \cdot dx = \frac{\rho}{2 \cdot \pi} \cdot (-x) \Big|_r^\infty = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot r}, \quad (5.3)$$

Valoarea relativă a potențialului prizei se calculează cu relația:

$$V_x^* = \frac{V_x}{V_p}, \quad (5.4)$$

în care V_p este potențialul total al prizei de pământ, presupunând că potențialul pământului de referință este egal cu zero (de fapt, căderea maximă de tensiune pe priza de pământ, la o valoare dată a intensității curentului care circulă prin aceasta).

Particularizând relația (5.2), se poate calcula potențialul la suprafața electrodului prizei de pământ, care rezultă de forma:

$$V_p = V_{x(x=r)} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot I_p. \quad (5.5)$$

Diferența de potențial dintre două puncte de pe suprafața solului, unul situat la distanța x , în raport cu centrul electrodului prizei, iar celălalt la distanța $x + l_{pas}$, în care l_{pas} se consideră, în practică, a fi egală cu 1 metru, corespunde tensiunii de pas U_{pas} :

$$U_{pas} = V_x - V_{x+l_{pas}} = \frac{\rho \cdot I_p}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{x + l_{pas}} \right) = \frac{\rho \cdot I_p}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{l_{pas}}{x \cdot (x + l_{pas})}, \quad (5.6)$$

notațiile fiind în conformitate cu figura 5.5. În mod evident, se poate discuta de o tensiune de pas numai pentru zone dispuse pe direcție radială în raport cu centrul prizei de pământ, caracterizate prin distanțe x mai mari decât raza electrodului prizei (în afara suprafeței echipotențiale a electrodului).

O relație similară poate fi scrisă pentru orice alte distanțe x și l , în particular pentru $x = r$ și $l = l_a = 1$ m, relația (5.6) permițând calculul tensiunii de atingere:

Electrosecuritate

$$U_a = V_p - V_{r+l_a} = \frac{\rho \cdot I_p}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r+l_a} \right) = \frac{\rho \cdot I_p}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{l_a}{r \cdot (r+l_a)}. \quad (5.7)$$

Atât tensiunea de pas, cât și aceea de atingere pot fi date în unități relative, prin raportarea la potențialul prizei de pământ, dat de relația (5.5).

5.1.3. Rezistența electrică și distribuția de potențial pe suprafața solului pentru construcții tipice de prize de pământ

Anterior s-au specificat câteva dintre tipurile constructive de prize de pământ, în această secțiune prezentându-se modul de calcul a rezistenței prizelor de pământ și a repartiției potențialului pe suprafața solului, pentru diferite tipuri de prize de pământ. Formele tipice de prize de pământ sunt următoarele:

- **priză de suprafață simplă** - sub forma de bandă plasată orizontal sau conductoare rectilinii sau circulare;
- **priză verticală** - cu electrozi de lungime suficientă pentru a traversa straturi de sol cu diferite conductivități; aceasta are o utilizare particulară atunci când straturile de suprafață au o conductivitate redusă comparativ cu straturile profunde sau atunci când există o limitare semnificativă a ariei suprafeței în care se realizează priza de pământ;
- **priză sub formă de rețea (priză de tip plasă)** – realizată, în mod uzual, ca o rețea plasată orizontal, la o adâncime redusă, în raport cu suprafața solului;
- **cablu cu efect de priză de pământ** – cablu a cărui manta metalică expusă, al cărui ecran sau a cărui armătură asigură o conectare la pământ, cu o rezistență electrică similară unei prize de pământ cu benzi metalice;
- **priză de pământ de fundație** – cuprinde părți metalice incluse în structuri beton, structuri care sunt în contact cu pământul, pe suprafețe mari.

O priză de pământ de suprafață, simplă, cuprinde bare metalice, rotunde sau dreptunghiulare, sau conducte, plasate orizontal sub suprafața solului, la o adâncime dată, h , așa cum se poate observa din figura 5.6. În mod uzual lungimea acestor elemente, l , este mult mai mare decât adâncimea de îngropare a lor.

Se poate face ipoteza că distribuția potențialului pe suprafața solului, determinată de circulația unui curent I_p prin priza de pământ, în direcția x , perpendiculară pe lungimea l a electrodului cilindric al prizei, este dată de relația:

$$V_x = \frac{\rho \cdot I_p}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \frac{\sqrt{l^2 + 4 \cdot h^2 + 4 \cdot x^2} + l}{\sqrt{l^2 + 4 \cdot h^2 + 4 \cdot x^2} - l}, \quad (5.8)$$

în care semnificația notațiilor este următoarea:

Electrosecuritate

V_x - potențialul pe suprafața solului, [V];

ρ - rezistivitatea solului, considerat omogen, [$\Omega \cdot m$];

l - lungimea electrodului cilindric al prizei de pământ, [m].

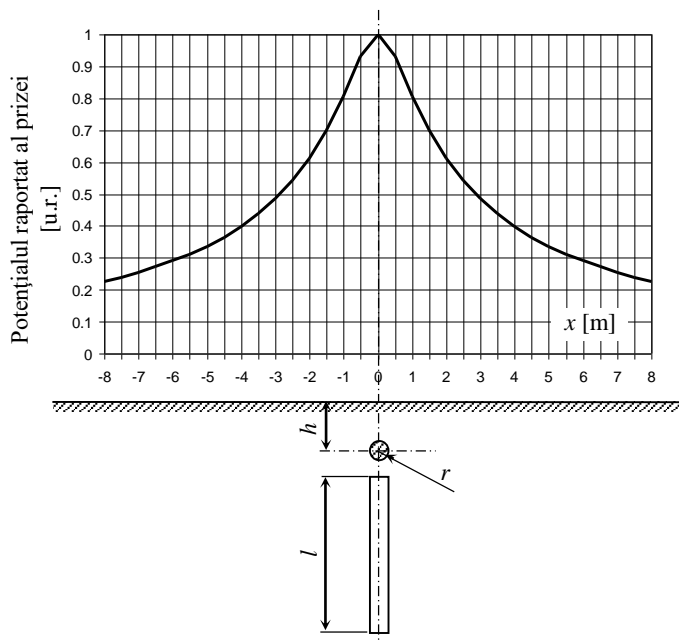


Fig. 5.6. Distribuția potențialului pe suprafața solului, perpendicular pe direcția electrodului axei electrodului cilindric, dispus în plan orizontal

Distribuția potențialului pe suprafața solului, conform relației (5.8) este indicată în figura 5.6, pentru valori particulare ale dimensiunilor electrodului prizei, și anume: lungimea electrodului, $l = 10$ m, raza electrodului cilindric, $r = 0,01$ m, adâncimea de îngropare a electrodului, $h = 0,7$ m.

Rezistența prizei de pământ realizate dintr-un electrod cilindric, simplu, plasat orizontal în sol, poate fi determinată din relația:

$$R_p = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l^2}{2 \cdot h \cdot r}, \quad (5.9)$$

semnificația notațiilor fiind corespunzătoare reprezentării grafice din figura 5.6.

În mod uzual, prizele orizontale nu sunt realizate din conductoare cilindrice, ci din bare cu secțiune rectangulară, având lățimea $b = 30 \div 40$ mm și grosimea $c = 4 \div 5$ mm. Rezistența unei prize de pământ realizată dintr-o bară rectangulară, dispusă la suprafața solului, poate fi calculată cu relația:

Electrosecuritate

$$R_p = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot l}{b}\right). \quad (5.10)$$

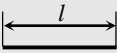
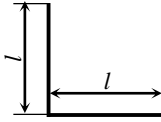

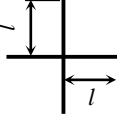
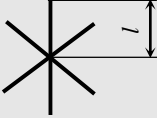
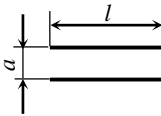
Rezistența electrică a diferitelor configurații de prize de pământ realizate cu electrozi simpli, plasați orizontal, poate fi determinată utilizând o relație cu caracter general, așa cum este relația:

$$R_p = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l_t} \cdot \ln \frac{B \cdot l^2}{2 \cdot h \cdot r_e}, \quad (5.11)$$

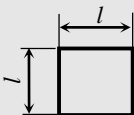
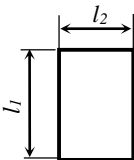
în care semnificația notațiilor este următoarea: h este adâncimea de îngropare a electrozilor prizei, l – lungimea unui electrod, l_t – suma lungimilor tuturor electrozilor prizei, r_e - raza echivalentă a profilului electrozilor, B este un parametru de construcție, dependent de configurația prizei de pământ.

Valorile factorului B , pentru diferite configurații geometrice ale prizelor de pământ de suprafață sunt date în tabelul de mai jos.

Tabelul 5.2. Valorile factorului B pentru diferite configurații geometrice ale prizelor de pământ de suprafață

| Priza de pământ | | Factorul B din relația (4.41) |
|---------------------------|---|---|
| Denumirea | Proiecția orizontală (vedere de sus a electrozilor) | |
| Linie |  | 1,00 |
| Două brațe perpendiculare |  | 1,46 |
| Trei brațe simetrice |  | 2,38 |
| Patru brațe simetrice |  | 8,45 |
| Șase brațe simetrice |  | 19,2 |
| Două brațe paralele |  | $\frac{l^2}{4 \cdot a^2}$ |

Electrosecuritate

| | | | |
|--|---|-----|------|
| Pătrat |  | | 5,53 |
| Dreptunghi, cu diferite rapoarte ale laturilor $l_1/l_2 = 1,5; 2; 3; 4$ |  | 1,5 | 5,81 |
| | | 2 | 6,42 |
| | | 3 | 8,17 |
| | | 4 | 10,4 |

Rezistența unei prize de pământ sub formă de tor, având dimensiunile date în figura 5.7, poate fi calculată cu o relație de forma:

$$R_p = \frac{\rho}{4 \cdot \pi^2 \cdot r} \cdot \ln\left(\frac{8 \cdot r}{a}\right). \quad (5.12)$$

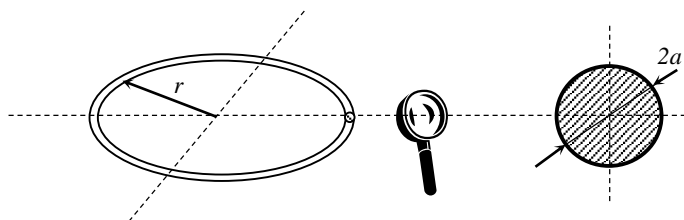


Fig. 5.7. Dimensiunile unui electrod toroidal al unei prize de pământ

Dacă un asemenea electrod este plasat la adâncimea $h = 1$ m, în raport cu suprafața solului, adâncime de instalare tipică pentru astfel de prize de pământ, rezistența prizei de pământ poate fi calculată și cu relația:

$$R_p = \frac{\rho}{4 \cdot \pi^2 \cdot r} \cdot k, \quad (5.13)$$

factorul k fiind o funcție de raportul dintre diametrul inelului și grosimea materialului din care este realizat, valoarea acestuia putând fi obținută din nomograme.

Prizele verticale au forma unor tije lungi, din metal, sau conducte, plasate vertical în sol, pentru a trece prin straturile de adâncime ale pământului. Pentru o intensitate I_p a curentului care circulă prin priza de pământ, de tip tijă verticală, potențialul la nivelul solului poate fi calculat cu relația de mai jos, valabilă în ipoteza curentului uniform distribuit, pe toată lungimea electrodului:

$$V_x = \frac{\rho \cdot I_p}{4 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{\sqrt{x^2 + l^2} - l}, \quad (5.14)$$

Electrosecuritate

în care semnificația notațiilor este următoarea: x este distanța față de axul electrodului tijă verticală, l – lungimea electrodului, ρ – rezistivitatea solului considerat omogen.

Relația aproximativă pentru calculul rezistenței unei prize de pământ verticale simple este de forma:

$$R_p = \frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \frac{4 \cdot l^2}{r^2}, \quad (5.15)$$

în care r este raza electrodului utilizat, iar l reprezintă lungimea acestuia.

În cazul unei prize, teoretice, realizată din n tije verticale, plasate în linie, echidistant, distanța dintre electrozi fiind notată cu a , conform reprezentării grafice din figura 5.8, rezistența efectivă a prizei de pământ este dată de relația:

$$\frac{1}{R_p} = k \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}, \quad (5.16)$$

în care: $R_1, R_2, R_3 \dots R_n$ sunt rezistențele prizelor de pământ, calculate pentru fiecare tijă verticală, cu relația (5.16), considerând că nu sunt afectate de prezența altor electrozi tijă, iar k este așa-numitul factor de utilizare, care satisface relația $k \geq 1$.

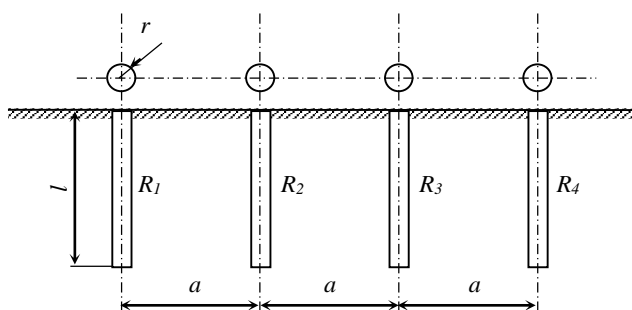


Fig. 5.8. Electrozi tijă plasați paralel:

$R_1 \dots R_4$ – rezistența individuală a prizei electrozilor tijă; a – distanța dintre electrozi;
 l – lungimea electrozilor

Valoarea factorului k este mai mare decât 1, din cauza influenței mutuale a câmpurilor electrice determinate de tijele alăturate. Ca efect, simetria circulației de curent electric, de la fiecare electrod individual, este deformată și densitatea de curent în sol este modificată. În literatura de specialitate sunt date valorile exacte ale factorului k , pentru diferite configurații ale electrozilor tijă, dispuși în paralel. În cazul configurației simple, indicate în figura 5.8, valoarea factorului k poate fi considerată ca fiind egală cu:

- pentru $a \geq 2 \cdot l$, $k \approx 1,25$;
- pentru $a \geq 4 \cdot l$, $k \approx 1$, influența mutuală dintre electrozi fiind neglijabilă.

Electrosecuritate

Prizele de pământ sub formă de rețea sunt utilizate, în special, pentru realizarea prizelor de mare extindere, așa cum sunt cele ale stațiilor electrice.

Rezistența de dispersie a unui obiectiv poate fi aproximată, în conformitate cu standardele ANSI/IEEE (American National Standardization Institute/ Institute of Electrical and Electronic Engineers), funcție de suprafața în plan orizontal a prizei de pământ, în ipoteza în care priza de pământ este considerată, inițial, ca fiind realizată sub forma unui electrod placă, de formă circulară, dispus la suprafața solului:

$$R_p = \frac{\rho}{4} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{A}} = \frac{\rho}{4 \cdot r_{placa}}, \quad (5.17)$$

în care semnificația notațiilor este următoarea: ρ – rezistivitatea solului, considerat omogen, în $\Omega \cdot m$, A – suprafața echivalentă a electrodului placă care aproximează priza, în m^2 , r_{placa} – raza electrodului placă circulară, care aproximează priza de pământ, în m .

Ulterior s-a demonstrat că rezistența de dispersie este mai mare decât aceea estimată prin intermediul relației (5.17), relația de calcul a rezistenței de dispersie fiind de forma:

$$R_p = \frac{\rho}{4 \cdot r} + \frac{\rho}{l_t}, \quad (5.18)$$

în care r este raza electrozilor prizei de tip rețea, iar l_t reprezintă suma lungimilor conductoarelor rețelei din care este realizată priza de pământ.

Prizele de pământ aferente instalațiilor de protecție împotriva electrocutării și de protecție împotriva loviturilor de trăsnet, destinate unor spații mari sau unor instalații electrice complexe, așa cum sunt stațiile de transformare, au o structură complexă, fiind realizate atât din electrozi orizontali, de tip rețea, cât și din electrozi verticali, uneori de mare adâncime. Numai astfel de ansambluri de electrozi orizontali și verticali pot asigura obținerea unor valori mici și relativ constante în timp ale rezistenței de dispersie, simultan cu o bună distribuție a potențialelor la suprafața solului.

Pentru calculul rezistenței acestui tip de prize de pământ, complexe, standardele ANSI/IEEE recomandă utilizarea relației lui Schwarz:

$$R_p = \frac{R_1 \cdot R_2 - R_{12}^2}{R_1 + R_2 - 2 \cdot R_{12}}, \quad (5.19)$$

semnificația notațiilor fiind următoarea: R_1 – rezistența conductoarelor componentei orizontale, de tip rețea, a prizei de pământ; R_2 – rezistența tuturor tijelor verticale ale prizei de pământ; R_{12} – rezistența mutuală dintre conductoarele ce formează rețeaua orizontală și grupul de electrozi tijă verticali.

Expresiile uzual folosite pentru rezistențele din relația (5.19) sunt de următoarea formă:

Electrosecuritate

$$R_1 = \frac{\rho_1}{\pi \cdot l_1} \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot l_1}{h'} \right) + K_1 \cdot \frac{l_1}{\sqrt{A}} - K_2 \right], \quad (5.20)$$

$$R_2 = \frac{\rho_a}{2 \cdot n \cdot \pi \cdot l_2} \cdot \left[\ln \left(\frac{8 \cdot l_2}{d_2} \right) + 2 \cdot K_1 \cdot \frac{l_2}{\sqrt{A}} \cdot (\sqrt{n} - 1)^2 - 1 \right], \quad (5.21)$$

$$R_{12} = \frac{\rho_a}{\pi \cdot l_1} \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot l_1}{l_2} \right) + K_1 \cdot \frac{l_1}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right], \quad (5.22)$$

semnificația notațiilor fiind următoarea:

ρ_1 – rezistivitatea solului în zona de amplasare a componentei orizontale de tip rețea a prizei de pământ, la adâncimea h ;

ρ_a – rezistivitatea aparentă a solului din zona unui electrod tijă verticală;

l_1 – lungimea totală a conductoarelor care formează componenta sub formă de rețea orizontală a prizei de pământ;

l_2 – lungimea medie a electrozilor verticali al prizei de pământ, ce poate fi calculată ca medie aritmetică a lungimilor tijelor verticale ale prizei;

h' – adâncime echivalentă a rețelei orizontale, care se calculează astfel:

$h' = \sqrt{d_1 \cdot h}$, pentru conductoarele orizontale ale prizei de pământ, îngropate la adâncimea h , respectiv

$h' = 0,5 \cdot d_1$, pentru conductoarele orizontale ale prizei de pământ, atunci când acestea se află la suprafața solului ($h = 0$ m);

h – adâncimea de amplasare a componentei orizontale de tip rețea a prizei de pământ;

d_1 – diametrul conductoarelor din care este realizată componenta orizontală a prizei de pământ;

d_2 – diametrul electrozilor tijă, verticali, ai prizei de pământ;

A – aria suprafeței acoperite de componenta de tip rețea, orizontală, a prizei de pământ, dată de produsul $a \cdot b$, unde:

a – lungimea laturii mai scurte a dreptunghiului format de rețeaua orizontală,

b – lungimea laturii mai mari a dreptunghiului;

n – numărul de electrozi verticali ai prizei de pământ;

K_1 și K_2 – constante dependente de geometria sistemului de electrozi care formează priza de pământ și care pot fi determinați din nomograme.

5.2. Metode pentru reducerea rezistenței de dispersie a prizelor de pământ

În solurile uscate, mai ales în cele cu pământ nisipos și în amestec cu pietriș, atunci când rezistivitatea solului depășește $500 \Omega \cdot m$, adeseori este dificil de realizat prize de pământ având rezistența de dispersie suficient de mică, chiar în condițiile adăugării unui număr considerabil de electrozi verticali și orizontali.

Pentru astfel de situații, trebuie avut în vedere faptul că rezistența de dispersie a unei prize de pământ se compune din rezistența de contact, R_k , dintre suprafața electrodului și sol, din rezistența R_{sm} a solului a cărei structură a fost modificată, ca efect al instalării electrozilor prizei de pământ (afânarea solului în cazul unui electrod orizontal sau compactarea solului în cazul unui electrod vertical, introdus cu dispozitive mecanice) și din rezistența propriu-zisă, R_s , a solului natural nemodificat, aceste rezistențe fiind conectate în serie, conform schemei echivalente din figura 5.9.

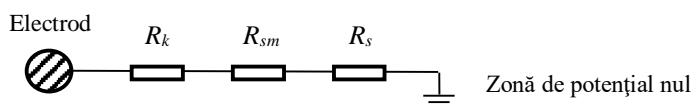


Fig. 5.9. Schema echivalentă a rezistenței de dispersie a unei prize de pământ

În metodologia de calcul a rezistenței de dispersie a prizelor de pământ nu sunt luate în calcul rezistența de contact și rezistența solului modificat, acesta fiind motivul pentru care rezistența de dispersie măsurată diferită de aceea antecalculată.

Ponderea rezistențelor R_k și R_{sm} , în rezistența de dispersie totală, este relativ mare, deoarece densitatea de curent și gradientul de potențial sunt maxime în imediata vecinătate a electrodului. În consecință, rezistența de dispersie poate fi redusă, în mod eficient, numai când aceste rezistențe pot fi menținute la valori neglijabile.

Aceste observații conduc la concluzia necesității măririi aparente a diametrului electrozilor prizelor de pământ, prin modificarea caracteristicilor solului din imediata vecinătate a electrozilor.

Cea mai simplă soluție de reducere a rezistivității solului, la contactul cu electrozii prizelor de pământ este aceea a udării solului, în vecinătatea electrozilor, sau a utilizării de săruri, precum clorura de sodiu, clorură de magneziu, clorură de calciu sau sulfat de cupru. O altă posibilitate este aceea de impregnare a solului cu soluții de sodă sau de utilizare a unor amestecuri de sol cu pilitură de fier.

Experiența de exploatare a arătat că utilizarea unor substanțe solide solubile în apă, așa cum sunt sărurile enumerate, nu este eficientă, deoarece apa provenită din precipitații, care se infiltrează pe lângă electrozii prizelor de pământ, diluează concentrația acestor soluții, în foarte scurt timp. Datorită eficienței reduse a acestei soluții practice, actualmente, utilizarea electrozilor din țevă perforată, prin interiorul

Electrosecuritate

căroră se introduce soluția de mare conductivitate, este foarte puțin utilizată, chiar dacă, în unele cazuri, rezistența de dispersie poate fi redusă, temporar, până la o cincime din valoarea inițial măsurată. Astfel de electrozi, sunt utilizați doar pentru instalații de legare la pământ provizorii, așa cum sunt cele de pe șantiere sau pentru instalații mobile etc.

O soluție tehnică viabilă, pentru reducerea rezistenței de contact și a rezistenței solului modificat din vecinătatea electrozilor prizelor de pământ, este aceea a utilizării bentonitei. Bentonita este o argilă naturală, rezultată în urma activității vulcanice și are în componența sa o cantitate semnificativă de silicat de aluminiu ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4 \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), cu urme de oxizi de fier, de potasiu de calciu și magneziu (Fe_2O_3 , K_2O , CaO , MgO) și, mai rar, de titan (TiO_2), precum și alte săruri minerale care ionizează, formând un mediu electrolitic, caracterizat printr-un pH cuprins între 8 și 10. Acest caracter al stratului de bentonită nu se degradează în timp, așa cum se întâmplă în cazul soluțiilor de săruri, care impregnează solul din vecinătatea electrozilor prizelor de pământ, deoarece sărurile fac parte din compoziția minerală a argilei bentonitice.

Bentonita este puternic higroscopică, nu este corozivă, este stabilă și are o rezistivitate foarte mică, de numai $2,5 \Omega \cdot \text{m}$, la o umezire a sa de 300 %. Prin umezire, volumul bentonitei crește semnificativ, chiar de până la 13 ori în raport cu volumul său în stare uscată, astfel încât aderă foarte bine la orice suprafață cu care se află în contact. La o expunere directă la radiația solară, bentonita crează o peliculă uscată, care nu permite uscarea, în profunzime, a stratului.

Prepararea suspensiei activate de bentonită constituie faza cea mai dificilă a întregului proces. Astfel, dacă tehnologia de realizare a suspensiei este greșită, rezistivitatea acesteia rezultă mare, în principal datorită formării de aglomerări de material solid, aglomerări care rămân în stare uscată. De cele mai multe ori, se amestecă, în procente masice, 20 % bentonită cu 80 % apă, în recipiente a căror capacitate trebuie să fie mai mare de 100 l.

Suspensia coloidală de bentonită se introduce în șanțurile electrozilor orizontali și în găurile forate ale electrozilor verticali, astfel încât electrozii să fie înconjurați de un strat având grosimea de $3 \div 5$ cm, din această suspensie.

În cazul electrozilor verticali, dacă solul este pietros, prin producerea unei mici explozii la partea inferioară a orificiului forat, se obține o rețea de mici ramificații și de microfisuri, în care pătrunde suspensia de bentonită, reducându-se, considerabil, rezistența de contact.

Pentru prizele de pământ ale instalațiilor ce funcționează în curent continuu, utilizarea bentonitei nu este recomandată, deoarece accentuează procesele electrolitice care determină deteriorarea electrozilor.

În soluri foarte uscate, acest procedeu nu este eficient, deoarece, în timp, apa din suspensia de bentonită migrează în solul în care este turnată. Procedeu este foarte

Electrosecuritate

eficient, însă, în regiuni cu soluri nisipoase, pietroase sau stâncoase, caracterizate prin rezistivitate electrică mare.

În prezența bentonitei, ca material special cu rezistivitate foarte redusă, dispus în jurul electrozilor prizelor de pământ, atât rezistența totală a acestora, cât și repartiția potențialelor devin mai bune, pentru toate scopurile exploataării. Un exemplu de repartiție a potențialului în vecinătatea unui electrod tijă, în absența și respectiv în prezența stratului de bentonită, este dat în figura 5.10.

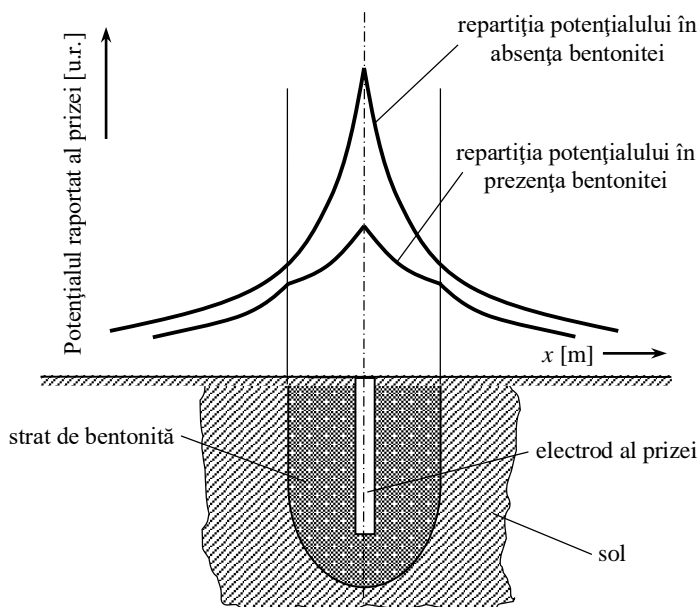


Fig.5.10. Repartiția potențialului unei prize de pământ verticale simple, în prezența și în absența unui strat de bentonită

5.3. Verificarea instalațiilor de legare la pământ

Instalațiile de protecție prin legare la pământ se verifică, în primul rând, la punerea în funcțiune a instalațiilor electrice pe care le deservește, după care se fac verificări periodice ale instalațiilor de legare la pământ de protecție, pentru a reduce, la minimum posibil, riscul de electrocutare prin atingere indirectă, de exemplu, în urma întreruperii circuitelor de legare la pământ sau corodării excesive a electrozilor prizei de pământ.

Verificarea stării fizice a unei instalații de legare la pământ, la un moment dat, implică verificarea vizuală a unor elemente, însă componenta predominantă a testării implică efectuarea de măsurători asupra următorilor parametri principali:

- rezistența de dispersie a prizei de pământ;

Electrosecuritate

- tensiunea totală pe priza de pământ, tensiunile accidentale de atingere și de pas, precum și tensiunile ce pot să apară prin cuplaj rezistiv;
- continuitatea electrică a legăturilor dintre elementele instalației de legare la pământ.

5.3.1. Măsurarea rezistenței de dispersie a prizelor de pământ

Pentru măsurarea rezistenței unei prize de pământ, aceasta trebuie separată de restul instalației de legare la pământ. Procedând în acest fel, se măsoară rezistența de dispersie a prizei de pământ. Pentru a asigura o protecție corectă împotriva electrocutării prin atingere indirectă, instalația de legare la pământ de protecție, și nu numai priza de pământ, trebuie să aibă o rezistență maximă acceptată.

În aceste condiții valoarea măsurată a rezistenței de dispersie a prizei de pământ nu trebuie să depășească valorile maxime admise de norme, pentru rezistențele instalațiilor de legare la pământ, astfel:

- 4Ω - pentru prize de pământ utilizate exclusiv în scopul protecției împotriva electrocutării prin atingere indirectă;
- 10Ω - pentru prize de pământ utilizate exclusiv pentru deservirea instalațiilor de paratrăsnete;
- 1Ω - pentru prize de pământ utilizate în comun, în scopul asigurării securității electrice și al descărcării la pământ a curenților de trăsnet.

Măsurarea rezistenței de dispersie a prizelor de pământ se efectuează numai în curent alternativ. Se evită, astfel, alterarea rezultatelor măsurătorilor de către tensiuni externe, de polarizație, care ar putea să apară în cazul în care măsurătorile ar fi făcute în curent continuu. În aceste condiții, se măsoară, de fapt, impedanța prizei de pământ, la frecvența tensiunii sursei aparatului de măsură sau a altei surse externe, utilizate pentru măsurători.

În continuare vor fi prezentate principalele metode de măsurare a rezistenței de dispersie a unei prize de pământ.

a. Metoda amper-metrului și voltmetrului

Această metodă mai este cunoscută și sub numele de metoda celor trei puncte, sau metoda 62%. Pentru măsurarea rezistenței de dispersie a unei prize de pământ, R_p , sunt necesari doi electrozi suplimentari, așa cum rezultă din schema de principiu dată în figura 5.11. Electrocul notat cu R_A este electrocul auxiliar de curent (numit și priză de curent), iar electrocul notat cu R_S este electrocul auxiliar de potențial (numit și priză sondă sau priză de potențial).

Electrosecuritate

În circuitul reprezentat în figura 5.11.a, valoarea rezistenței de dispersie a prizei de pământ rezultă, conform legii lui Ohm:

$$R_p = \frac{U}{I_p}, \quad (5.23)$$

în care U este tensiunea măsurată de voltmetru, iar I_p intensitatea curentului care se închide prin prizei de pământ.

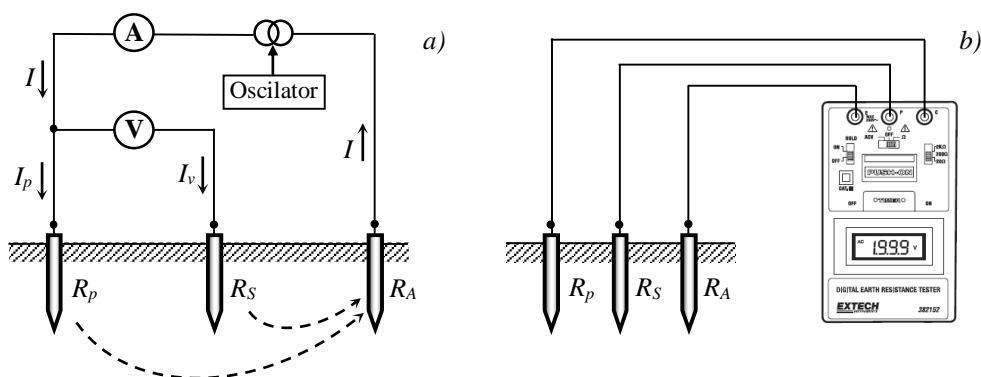


Fig.5.11. Schema de principiu a măsurării rezistenței de dispersie a prizei de pământ

Eroarea de măsurare poate fi, însă, inacceptabil de mare dacă electrozii auxiliari, de măsură, mai ales electrozul prizei auxiliare de curent, nu sunt dispuși într-o manieră corespunzătoare, în raport cu prizei de pământ de măsurat. În imediata apropiere a electrozilor prizei, respectiv a suprafețelor electrozilor prin care trece curentul în sol, rezistența electrică a solului are cea mai mare valoare, deoarece curentul trece printr-un volum mic din solul respectiv. Pe măsura depărtării de suprafața electrozilor prizei, volumul de sol, prin care trece curentul, crește din ce în ce mai mult. În consecință, și rezistența electrică pe care o manifestă solul, la circulația unui curent electric, scade pe măsura depărtării de electrozii prizei, astfel încât, la o anumită distanță, această rezistență electrică poate fi considerată neglijabil de mică.

În mod cu totul similar, densitatea de curent este maximă în imediata apropiere a electrozilor prizei și scade pe măsura depărtării de aceștia, deoarece secțiunile în sol, prin care circulă curentul, cresc continuu. La o anumită distanță de electrozii prizei, densitatea de curent devine neglijabil de mică, practic egală cu zero, datorită secțiunii de trecere foarte mari a solului prin care circulă curentul. În aceeași măsură scad și potențialele diferitelor puncte de pe sol, acestea fiind proporționale cu densitatea de curent. Astfel, la o anumită distanță de electrozii prizei, se ajunge într-o zonă în care potențialul este foarte mic, zonă denumită zonă de potențial nul.

În conformitate cu cele prezentate anterior, două posibile diagrame de repartire a potențialelor în circuitul de măsurare sunt prezentate în figura 5.12.

Electrosecuritate

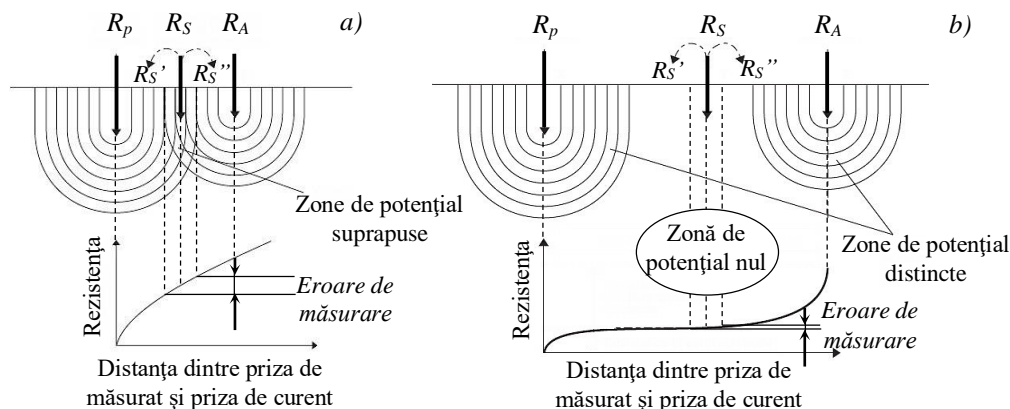


Fig.5.12. Diagrame de repartiție a potențialelor și identificare erorii de măsurare a rezistenței prizelor de pământ, funcție de distanța dintre priza de măsurat și priza de curent

În diagrama din figura 5.12.a, zonele de potențial ale prizei de pământ și electrodului prizei auxiliare de curent se suprapun, astfel încât electrodul auxiliar de potențial se va afla, practic în orice condiții, într-o zonă cu potențial diferit de zero, rezultând o eroare de măsurare inadmisibil de mare. În diagrama din figura 5.12.b, se observă că între priza de pământ și electrodul auxiliar de curent există o zonă de potențial nul (pentru fiecare dintre prizele de pământ – de măsură și de măsurat – se ajunge în afara zonei de rezistență efectivă a prizei, când rezistența poate fi considerată neglijabilă). Numai în astfel de condiții eroarea de măsurare este acceptabilă.

Pentru determinarea zonei de potențial nul, într-o configurație dată a prizei de pământ ce urmează a fi măsurate, se poate proceda astfel:

- se execută un montaj de tipul celui reprezentat în figura 5.11.a, fără a fi necesar ampermetru, iar sursa de alimentare putând fi alta decât aceea proprie a unui aparat de măsură a rezistenței de dispersie a prizelor de pământ;
- se citesc tensiunile măsurate de voltmetru având o bornă legată la electrodul prizei iar cealaltă la electrodul de potențial, sondă care se mută la diferite distanțe față de electrodul prizei de măsurat;
- pe măsura depărtării de priza de măsurat, valorile tensiunii măsurate cresc, această creștere fiind din ce în ce mai mică, pentru o aceeași distanță de îndepărtare a electrodului sondă, pe aceeași direcție;
- atunci când creșterea devine foarte mică, valorile măsurate de voltmetru rămânând aproximativ constante, înseamnă că s-a ajuns cu electrodul auxiliar de potențial în zona de potențial nul, iar valoarea măsurată a tensiunii reprezintă tocmai tensiunea totală a prizei, la valoarea intensității curentului care a fost stabilită prin priză;

Electrosecuritate

- dacă nu se înregistrează această scădere a pantei potențialului, pe măsura depărtării de priza de pământ de măsurat, atunci zonele de rezistență efectivă ale prizei de pământ și electrodului auxiliar de curent se suprapun; cei doi electrozi fiind prea apropiați, nu crează o zonă de potențial nul între ei (figura 4.a), pentru o măsurătoare acceptabilă trebuind să fie mărită distanța dintre priza de măsurat și electrodul auxiliar al prizei de curent.

În cazul măsurării prizelor de pământ simple (teoretic punctiforme), electrozii se dispun coliniar sau în vârfurile unui triunghi isoscel, conform reprezentării grafice din figura 5.13.

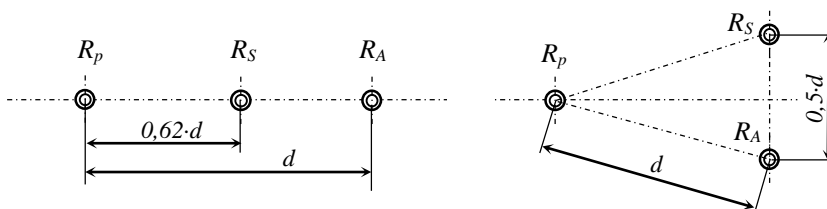


Fig.5.13. Dispunerea electrozilor circuitului de măsurare a rezistenței prizelor simple

În ceea ce privește distanța dintre electrodul prizei de pământ supuse măsurării și electrodul auxiliar de curent, chiar și în cazul prizelor simple, nu pot fi date valori foarte sigure, atâta timp cât această distanță depinde, în mod implicit, de diametrul electrodului prizei de măsurat, de lungimea sa și de omogenitatea solului în care este plasat. Unii autori arată că distanța dintre electrodul prizei de pământ supuse măsurării și electrodul auxiliar de curent ar trebui să fie de ordinul a $35 \div 40$ m. Unii constructori de aparate dau aceste distanțe minime în domeniul $10 \div 20$ m, iar alții dau distanțele funcție de adâncimea de instalare a prizei simple și de diametrul electrodului acesteia.

În cazul prizelor de pământ complexe, dispunerea electrozilor poate fi mai dificilă, fiind dependentă de dimensiunile grilei formate de către electrozii prizei de pământ. Trei variante de dispunere a electrozilor auxiliari de măsură sunt exemplificate în construcția grafică din figura 5.14.

Rezultate suficient de precise se pot obține, în oricare dintre variantele de dispunere a electrozilor prezentate în figura 5.14, dacă se respectă și niște distanțe minime de pozare a acestora, în raport cu conturul extern al prizei de pământ măsurate, distanțe care sunt date funcție de parametrul notat cu D , astfel:

- dacă $D \leq 10$ m, distanța dintre electrozii adiacenți = $1,5 \cdot 20 = 30$ m;
- dacă $10 < D < 40$ m, distanța dintre electrozii adiacenți $\geq 1,5 \cdot 40 = 60$ m;
- dacă $D \geq 40$ m, distanța dintre electrozii adiacenți $\geq 1,5 \cdot D$.

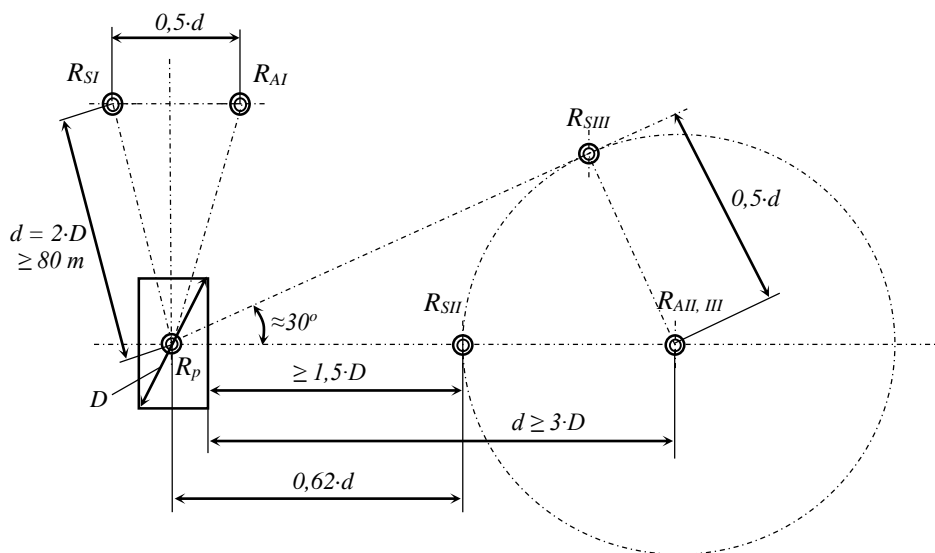


Fig.5.14. Scheme de principiu de dispunere a electrozilor auxiliari:
I – dispunere în vârfurile unui triunghi isoscel; II – dispunere coliniară;
III – dispunere în vârfurile unui triunghi dreptunghic.

În standardul românesc SR EN 60529 se face precizarea că electrodul auxiliar de potențial trebuie să se afle într-o zonă de potențial nul, creată în timpul măsurătorilor între priza de pământ de măsurat și electrodul auxiliar de curent, astfel încât distanța dintre electrozi trebuie să fie egală cu $2 \div 5 \cdot D$, în care D reprezintă cea mai mare diagonală a terenului în care este instalată priza de pământ. De asemenea, se face precizarea că, în cazul prizelor de pământ extinse, determinarea zonei de potențial nul se face prin încercări.

b. Metoda compensării

O altă metodă de măsurarea a rezistenței de dispersie a prizelor de pământ, bazată, de asemenea, pe utilizarea a trei electrozi în circuitul de măsurare, este metoda compensării (metoda Behrend). În cazul acestei metode, căderea de tensiune pe priza de pământ se compensează printr-o tensiune variabilă, obținută într-un montaj potențiomtric, așa cum este cel reprezentat în figura 5.15.

Electrosecuritate

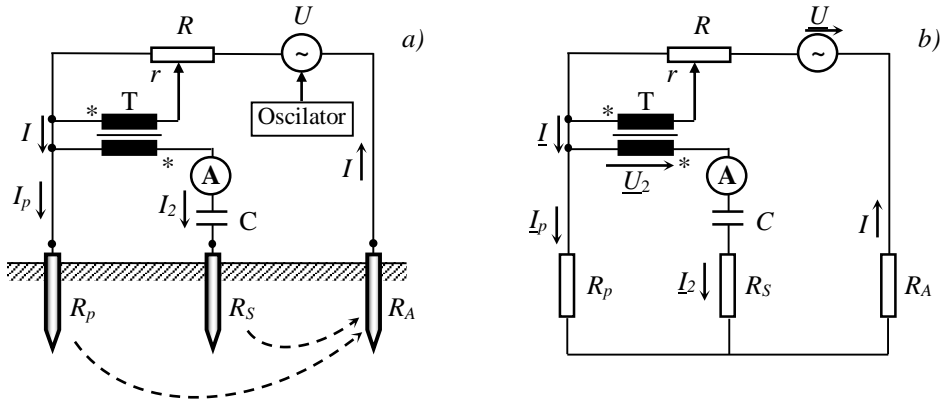


Fig.5.15. Principiul metodei de măsurare a rezistenței de dispersie a prizelor de pământ prin metoda compensării: a) – schema de principiu; b) – schema electrică echivalentă.

În componența schemei de măsurare intră, pe lângă cei trei electrozi deja cunoscuți de la metoda prezentată anterior, o sursă de tensiune alternativă de mică putere (sursa de tensiune continuă a aparatului și un oscilator de joasă frecvență), un reostat calibrat și cu posibilitatea de citire a valorii rezistenței introduse în circuitul de măsură, r , un transformator, T , cu raport de transformare reglabil, $k = 1; 10; 100; \dots$, un condensator, C , destinat desensibilizării circuitului de măsură la curenți continui și un aparat de măsură a intensității curentului. Modul de dispunere în circuit a transformatorului asigură defazarea cu 180° a tensiunii din primar, pentru a realiza efectul de compensare a tensiunii.

Potențiometrul alimentează, cu o tensiune reglabilă, primarul transformatorului T . În circuitul din secundarul transformatorului, legea a doua a lui Kirchhoff poate fi scrisă sub forma:

$$\underline{U}_2 = \underline{Z}_2 \cdot \underline{I}_2 - R_p \cdot \underline{I}_p, \quad (5.24)$$

în care \underline{Z}_2 reprezintă impedanța echivalentă a circuitului format din rezistența electrodului auxiliar de potențial, R_s , capacitatea de filtrare a componentei continue, C , și impedanța proprie a aparatului de măsură curent.

Prin deplasarea cursorului potențiometrului se modifică tensiunea U_2 și, implicit, intensitatea curentului din circuitul aparatului de măsură, I_2 . Atunci când aparatul de măsură curent indică $I_2 = 0$, circuitul este echilibrat și, deci, tensiunea din secundarul transformatorului este egală cu tensiunea totală a prizei de pământ, iar intensitatea curentului, prin primarul transformatorului, este egală cu aceea a curentului care circulă prin priza de pământ de măsurat, adică:

Electrosecuritate

$$\begin{cases} \underline{U}_p = \underline{U}_2 \\ \underline{I}_p = \underline{I} \end{cases} \quad (5.24)$$

Detaliind expresiile de mai sus, pentru regimul compensat, se obțin relațiile:

$$\underline{U}_p = R_p \cdot \underline{I}_p = R_p \cdot \underline{I}; \quad (5.25)$$

$$\underline{U}_2 = \frac{1}{k} \cdot \frac{r}{R} \cdot \underline{U} = \frac{1}{k} \cdot \frac{r}{R} \cdot (R \cdot \underline{I}) = \frac{1}{k} \cdot r \cdot \underline{I}, \quad (5.26)$$

k reprezentând raportul de transformare al transformatorului, R rezistența totală a reostatului, iar r partea din rezistența reostatului de pe care se alimentează primarul transformatorului.

Din relațiile (5.24), (5.25) și (5.26) se obține:

$$R_p = \frac{1}{k} \cdot r, \quad (5.27)$$

rezistența de dispersie a prizei de pământ rezultând, direct, prin citirea raportului de transformare setat și a valorii rezistenței reostatului, pentru care compensarea tensiunii este perfectă.

Evitarea introducerii unor erori de măsură, generate de către curenți paraziți alternativi care circulă prin alte trasee, poate fi realizată prin utilizarea unei frecvențe în circuitul de măsurare diferite de frecvența industrială a rețelelor electrice. Este uzuală utilizarea frecvenței de 75 Hz.

c. Metoda celor două puncte

O metodă simplificată de măsurare a rezistenței de dispersie a prizelor de pământ simple, prevăzută în normativul ANSI/IEEE 80-1986 ca și în cărțile tehnice ale unor aparate destinate măsurării parametrilor prizelor de pământ, este metoda celor două puncte sau metoda simplificată. Având în vedere relativa simplitate a schemei de măsurare, această metodă poate fi utilizată ca și metodă de monitorizare a rezistenței unei prize de pământ, însă numai în condițiile în care se știe, deja, că priza de pământ are o rezistență de dispersie mică și este realizată într-un sol de rezistivitate mică.

Această metodă este utilă în zonele în care densitatea construcțiilor sau instalațiilor este relativ mare, fiind dificil de găsit locuri convenabile de instalare a celor doi electrozi auxiliari, necesari în aplicarea metodei standard.

Schema de principiu a metodei simplificate rezultă din figura 5.16.

Electrosecuritate

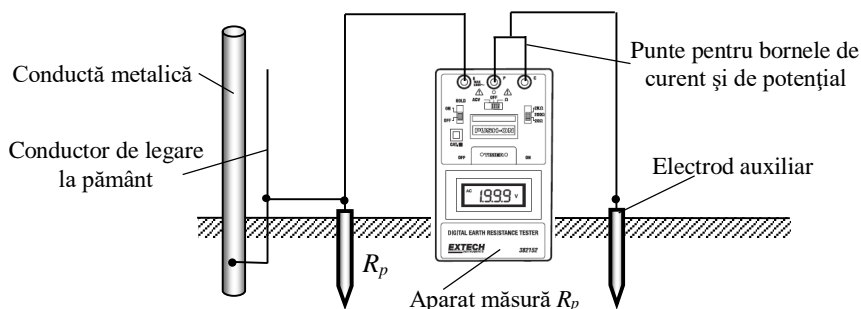


Fig.5.16. Schema de principiu a metodei celor două puncte

Metoda nu este la fel de precisă ca și metoda standard a voltmetrului și ampermetrului (metoda celor trei puncte sau metoda 62 %), rezultatele sunt influențate de distanța dintre electrodul prizei de pământ testate și electrodul auxiliar introdus în pământ sau conectat la o conductă metalică a rețelei de apă. Rezistența proprie a conductoarelor de conexiune la aparatul de măsură trebuie scăzută din valoarea măsurată de aparat. Metoda nu poate fi considerată metodă standard, dar poate fi utilizată ca metodă aproximativă, pentru prizele din spații restrânse, cu restricțiile precizate anterior.

5.3.2. Măsurarea tensiunilor de atingere și de pas

Măsurarea rezistenței de dispersie a prizei de pământ a unui obiectiv nu dă informații directe și certe relativ la riscul expunerii la tensiuni accidentale periculoase. Acesta este motivul pentru care, în continuarea operațiilor de măsurare a rezistenței de dispersie a prizelor de pământ, se determină repartiția potențialelor, a tensiunilor de atingere și de pas și, implicit, a coeficienților de atingere și de pas ai prizei măsurate.

Tensiunile de atingere și de pas pot fi măsurate prin metode directe sau indirecte. În cazul instalațiilor extinse, așa cum sunt stațiile de transformare și ansamblurile industriale, este preferabilă utilizarea metodei indirecte a voltmetrului și ampermetrului, care permite și trasarea curbelor echipotențiale din zona de instalare a echipamentelor.

a. Metoda indirectă

Pentru efectuarea acestor măsurători, prin metoda ampermetrului și voltmetrului, se utilizează o schemă asemănătoare celei folosite la determinarea rezistenței de dispersie a prizei de pământ și a tensiunii totale pe priza de pământ, U_p , așa cum rezultă și din figura 5.17. Schemele de măsură ale acestei metode se prezintă sub două variante: varianta cu doi electrozi de potențial (figura 5.17.b) și varianta cu un electrod de potențial (figura 5.17.c). În prima variantă, potențialul de referință este potențialul solului (zero), iar în a doua variantă, potențialul de referință este acela al prizei de pământ, la circulația

Electrosecuritate

prin aceasta a curentului din circuitul electrodului auxiliar de curent. În practică, este preferată varianta cu un singur electrod de potențial, datorită preciziei mai bune a rezultatelor. Indiferent de varianta folosit, rămâne valabilă condiția utilizării unui voltmetru cu impedanță de intrare mare, condiție obligatorie pentru obținerea unor rezultate corecte, atâta timp cât rezistența de dispersie a sondelor de potențial este relativ mare (sute de $k\Omega$), ele fiind formate din electrozi de oțel bătuiți în pământ la foarte mică adâncime ($5 \div 8$ cm) sau plăci speciale (figura 5.17.d) dispuse pe suprafețele dure, așa cum sunt cele din beton sau pavaj, a căror suprafață de contact cu solul este de aproximativ 200 cm^2 și a căror greutate este de 30 kg.

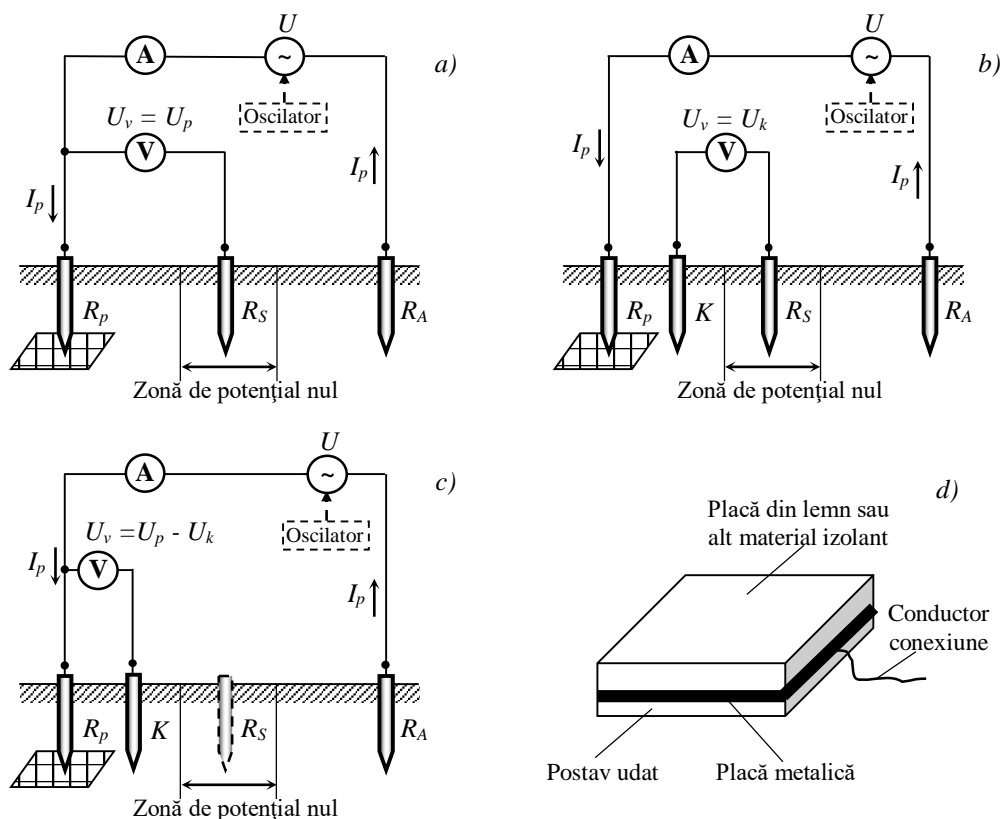


Fig. 5.17. Scheme de principiu pentru măsurarea distribuției potențialelor prin metoda indirectă a ampermetrului și voltmetrului: a) schema pentru măsurarea rezistenței de dispersie; b) – schema pentru măsurarea distribuției potențialelor în varianta cu doi electrozi; c) – schema pentru măsurarea distribuției potențialelor în varianta cu un electrod; d) – electrod ce se utilizează ca priză sondă pe suprafețe dure.

În figura 5.17, notațiile au următoarea semnificație:

U – valoarea efectivă a tensiunii alternative furnizate de sursă;

U_v – tensiunea indicată de voltmetru;

Electrosecuritate

U_p – tensiunea totală a prizei de pământ;

U_k – potențialul sau tensiunea la nivelul sondelor de potențial;

I_p – intensitatea curentului care circulă prin priza de pământ (curentul care circulă prin circuitul voltmetrului se neglijează datorită impedanței interne mari a acestuia);

R_p – priza de pământ testată;

R_A – priza auxiliară de curent;

R_S și K – sonde de potențial.

În varianta cu două sonde de potențial, tensiunea măsurată este egală cu diferența de potențial a punctului de măsură, în raport cu zona de potențial nul, $U_v = U_k$, iar în varianta cu o sondă de potențial se măsoară diferența dintre potențialul total al prizei de măsurat și potențialul punctului curent k . În acest fel, potențialul punctului curent rezultă din relația:

$$U_k = U_p - U_v, \quad (5.28)$$

tensiunea totală a prizei, U_p , este măsurată prin citirea voltmetrului, atunci când acesta este racordat la electrodul prizei auxiliare de potențial, R_s , instalat în zona de potențial nul, încă din etapa anterioară, a măsurării rezistenței de dispersie.

Dacă se determină valorile potențialelor U_k în diferite puncte de pe sol, se poate obține diagrama de distribuție a potențialelor la suprafața solului, formată din curbe de variație a potențialului, pe diferite direcții, prin prelucrarea cărora se pot obține curbele echipotențiale de pe suprafața solului, din vecinătatea prizei de pământ prin care se realizează circuitul de curent și din vecinătatea diferitelor echipamente. De exemplu, în cazul stațiilor de transformare, conectarea sursei de măsură la priza de pământ verificată se face în punctele unde este cel mai probabil să circule curentii de scurtcircuit monofazat reali, așa cum sunt punctele neutre ale transformatoarelor, conexiunile la pământ ale descărcătoarelor, ale cuțitelor de legare la pământ, punctele de montare a scurtcircuitoarelor mobile etc.; determinarea tensiunilor de atingere și de pas trebuie să se facă în apropierea punctelor menționate și a diferitelor carcase conductoare care ar putea ajunge accidental sub tensiune, precum și din zonele de circulație aflate în interiorul și în apropierea instalațiilor electrice închise sau îngrădite.

Chiar dacă liniile echipotențiale de tensiuni procentuale din U_p , trasate pe planul instalației, dau informații complete asupra eventualelor zone de risc de expunere la tensiuni accidentale periculoase, în practica curentă se utilizează metoda mai simplă și, adesea mai sugestivă, de trasare a distribuției potențialelor pe anumite direcții de interes, așa cum sunt căile de acces la anumite echipamente.

Odată trasate curbele de repartiție a potențialelor, pot fi calculați coeficienții tensiunilor de atingere și de pas. Astfel, pentru tensiunea de atingere, dată de relația:

$$U_a = U_p - U_{k(1m)}, \quad (5.29)$$

Electrosecuritate

în care $U_{k(1m)}$ este tensiunea măsurată într-un punct situat la distanța de 1 m de carcasa în raport cu care se măsoară tensiunea de atingere, rezultă coeficientul de atingere:

$$k_a = \frac{U_p - U_{k(1m)}}{U_p}. \quad (5.30)$$

Tensiunea de pas, U_{pas} , la care poate fi supus un om, se determină cu relația:

$$U_{pas} = U_{k1} - U_{k2}, \quad (5.31)$$

unde U_{k1} și U_{k2} sunt tensiunile măsurate atunci când sonda de potențial K (vezi figura 5.17) este amplasată în punctele k_1 și respectiv k_2 de pe suprafața solului, tensiuni definite ca diferență de potențial dintre potențialul punctului respectiv și potențialul zero al unui punct din zona de potențial nul. Chiar dacă tensiunea de pas este definită pentru o distanță de 0,8 m între punctele de măsură, în timpul testelor se consideră puncte de pe sol situate la distanța de un metru.

Coeficientul de pas se calculează cu relația:

$$k_{pas} = \frac{U_{k1} - U_{k2}}{U_p}. \quad (5.32)$$

În mod evident, coeficienții de atingere și de pas, mărimi raportate la tensiunea totală a prizei de pământ, dau informații asupra riscului producerii unei electrocutări prin atingere indirectă, într-o instalație dată, indiferent de valoarea curentului care se închide prin priza de pământ (dacă se face abstracție de efectele pe care le are circulația curenților intenși prin prizele de pământ). În realitate, valorile tensiunilor de atingere și de pas sunt acelea determinate de curentul de scurtcircuit și nu pot fi măsurate decât în momentul producerii unui defect, motiv pentru care procedura se numește *determinare pe viu a tensiunilor de atingere și de pas*. Efectuarea unor astfel de măsurători este, în mod evident, foarte dificilă, motiv pentru care se folosesc surse separate de energie, având un curent nominal cât mai mare (transformatoare de sudare, grupuri electrogene), spre deosebire de cazul măsurării rezistenței de dispersie a prizelor de pământ, când sursa de energie este de foarte mică putere (internă aparatului de măsură). Valorile obținute în urma măsurătorilor nu se compară, în mod direct, cu valorile maxime admise din normative. Totuși, atâta timp cât nu apar efecte de uscare a solului, la trecerea curentului de defect (deconectare rapidă a tronsoanelor de rețea cu defect de izolație), se păstrează relațiile de directă proporționalitate pentru domenii largi ale curenților. Astfel, valori apropiate de cele reale ale tensiunilor de atingere și de pas se obțin multiplicând valorile măsurate cu raportul dintre intensitatea curentului real de defect și aceea a curentului din circuitul de măsurare.

Electrosecuritate

Pentru determinarea tensiunii efective la care este supus omul, trebuie să se țină seama atât de distribuția potențialelor la suprafața solului, cât și de rezistența electrică pe care o au tălpile omului și care diminuează intensitatea curentului care se închide prin corp. Această rezistență, notată cu R , în cele ce urmează, depinde de rezistivitatea solului, ρ , astfel:

- pentru determinarea tensiunii de atingere, $R_{ta} = 1,5 \cdot \rho$;
- pentru determinarea tensiunii de pas, $R_{pas} = 6 \cdot \rho$;

Pe lângă aceste rezistențe, în normative se definește un coeficient de amplasament la atingere, α_a , și un coeficient de amplasament de pas, α_{pas} , conform relațiilor:

$$\alpha_a = \frac{R_h + R_{ta}}{R_h}, \quad (5.33)$$

$$\alpha_{pas} = \frac{R_h + R_{tpas}}{R_h}, \quad (5.34)$$

în care R_h reprezintă rezistența convențională a corpului uman la atingere indirectă, $R_h = 3000 \Omega$.

În STAS 12604/5-90 sunt indicate valori ale coeficientului de amplasament la atingere și ale coeficientului de amplasament de pas, în cazul acoperirii solului cu straturi izolante de pietriș, beton sau asfalt. Astfel, $\alpha_a = 2$ și $\alpha_{pas} = 5$ pentru piatră spartă, depusă în strat cu o grosime de 15 cm, pentru dale de beton sau pentru straturi de asfalt cu grosimea de 2 cm.

Cunoscând coeficienții de atingere și de pas ai unei prize de pământ, coeficienții de amplasament și tensiunea totală a prizei, în regim de defect, pot fi determinate tensiunile la care este expus omul, în situație de atingere și de pas:

$$U_{ha} = R_h \cdot I_h = U_p \cdot \frac{k_a}{\alpha_a}, \quad (5.35)$$

$$U_{hpas} = R_h \cdot I_h = U_p \cdot \frac{k_{pas}}{\alpha_{pas}}. \quad (5.36)$$

Instalația de legare la pământ este corespunzătoare, din punctul de vedere al riscului de electrocutare prin atingere indirectă, dacă tensiunile de atingere și de pas, la care este expus omul, sunt mai mici decât valorile normate.

În mod evident, pentru calculul tensiunilor de atingere și de pas, la care este supus omul, și pentru verificarea condiției de încadrare a acestora în limitele acceptabile pot fi folosite rezultate ale măsurătorilor prin metoda indirectă, a ampermetrului și voltmetrului, descrisă anterior. Astfel, din diagrama de distribuție a potențialelor la suprafața solului, pot fi calculați coeficienții maximi de atingere și de pas (pentru zonele

Electrosecuritate

din diagrama de distribuție a potențialelor în care curbele echipotențiale sunt mai apropiate între ele). Se calculează coeficienții de amplasament funcție de rezistivitatea solului sau se preiau din normative și, în fine, pot fi calculate tensiunile de atingere și de pas la care este supus omul.

b. Metoda directă

Tensiunile de atingere și de pas pot fi măsurate și prin intermediul unei metode directe, în conformitate cu schemele reprezentate în figura 5.18. Voltmetrul indică direct tensiunea la care este supus omul, măsurând căderea de tensiune pe o rezistență calibrată de 3000Ω , dimensionată astfel încât să fie stabilă la curentul de măsură, pe durata măsurării, și verificată cu un aparat de clasă de precizie 1 sau mai mică, putând fi considerată rezistență etalon. Impedanța internă a voltmetrului trebuie să fie mult mai mare decât rezistența R_h , fiind de preferat utilizarea unui voltmetru electronic.

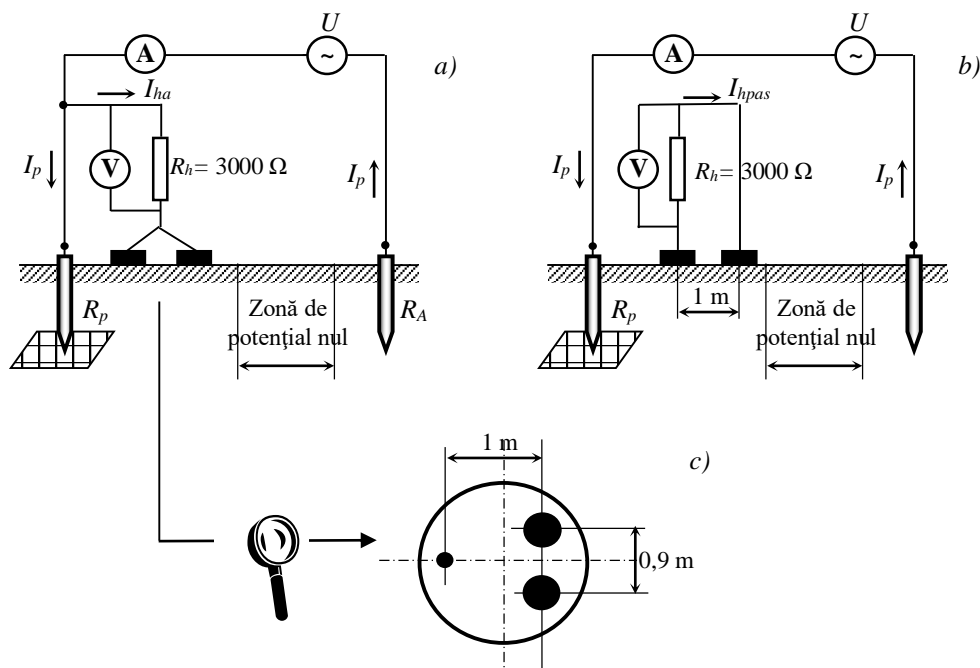


Fig.5.18. Scheme de principiu pentru măsurarea tensiunilor de atingere și de pas prin metoda directă: a) măsurarea tensiunii de atingere; b) – măsurarea tensiunii de pas; c) – detaliu de dispunere a electrozilor (tălpi) pe suprafața solului.

Electrosecuritate

Electrozii placă, care simulează tălpile picioarelor omului, sunt realizați din tablă de oțel cu grosimea de 10 mm, de formă circulară - având diametrul de 160 mm, sau de formă pătrată – având lungimea laturii de 150 mm. Este necesar ca sub aceste plăci să se interpună o placă din plumb, deformabilă, care să poată urmări eventualele denivelări ale suprafeței solului, pe care acestea sunt așezate. Plăcile inferioare, confecționate din tablă de plumb, au aceleași dimensiuni ca și plăcile de oțel, cu excepția grosimii, care este de $1,5 \div 2$ mm.

Pe durata efectuării măsurătorilor, pe fiecare placă trebuie amplasată o greutate de 35 kg, care simulează greutatea corpului, iar distanțele dintre electrozi sau dintre electrozi și carcasa metalică a unui echipament sunt de un metru, conform figurii 10.

Valorile măsurate corespund curentului stabilit prin circuitul de măsură. Acestea se raportează la valoarea reală a curentului de defect prin înmulțire cu coeficientul:

$$k_{def} = \frac{I_{p\max}}{I_{p\text{măsură}}}, \quad (5.37)$$

în care $I_{p\max}$ reprezintă intensitatea curentului maxim de defect care se încheie prin priza de pământ, în instalația pe care aceasta o deservește, iar $I_{p\text{măsură}}$ intensitatea curentului prin priză în regim de măsurare.

Pentru verificarea calității prizei de pământ, valorile măsurate ale tensiunilor de atingere și de pas, înmulțite cu coeficientul k_{def} , se compară cu valorile maxime admise prin reglementările în vigoare. Folosirea unui miliampermetru pentru măsurarea directă a curentului prin corpul uman, I_h , în circuitul rezistenței R_h , poate introduce erori la măsurare, datorită înserierii rezistenței ampermetrului cu rezistența etalon R_h . Din acest motiv, intensitatea curentului prin corpul uman se obține indirect, aplicând legea lui Ohm, pe rezistența R_h .