

Заземјувачи и заземјувачки системи во електроенергетските мрежи

Општо за заземјувачите и заземјувачките системи во електроенергетските мрежи

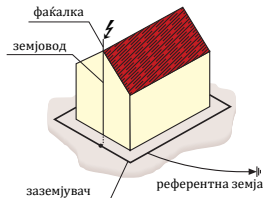
М. Тодоровски

Институт за преносни електроенергетски системи
Факултет за електротехника и информациски технологии
Универзитет Св. Кирил и Методиј

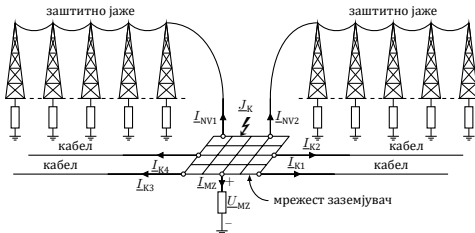
mirko@feit.ukim.edu.mk
pees.feit.ukim.edu.mk

Скопје, 2017

ОСНОВНИ ПОИМИ

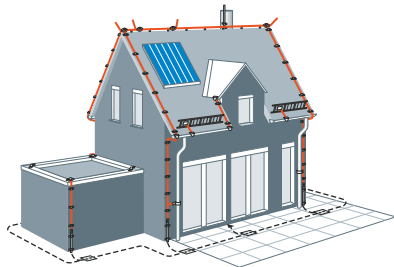


Заземјувач како елемент на една громобранска инсталација



Заземјувачки систем на една 110 kV разводна постројка

Основни поими



Изглед на заземјувач од еден индивидуален станбен објект

Цел, предмет и област на изучување

- Струи на куса врска
- Видови куси врски
- Извоз на потенцијали
- Земјоспоеви во СН мрежа
- Задача на заземјувачите: струјата на грешка да ја одведат во земја со минимални потенцијални разлики на допир и чекор
- Пораст на струјата на земјоспој
- Можности за решавање на проблемите
 - ▶ заземјување преку мал активен отпор,
 - ▶ заземјување преку мала импеданција,
 - ▶ компензација на капацитивната струја на земјоспој со помош на т.н. „Петерсенови калеми“.

Методологија за анализа и моделирање

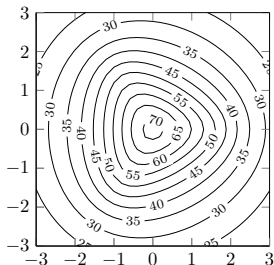
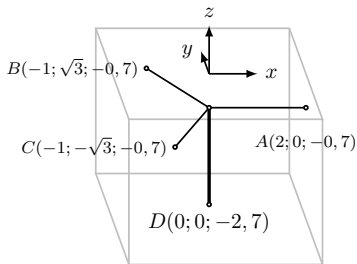
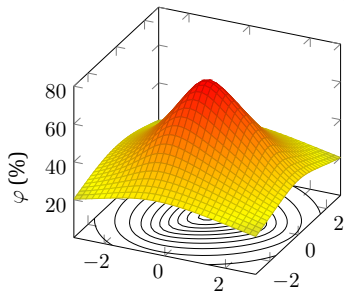
- Заземјувачките системи се сложени електрични кола – решавање на систем комплексни равенки (линеарни/нелинеарни).
- Точноста на резултатите најмногу зависи од моделите на елементите (заземјувачи, водови, кабли, спреги).
- Максвелови равенки, принцип на суперпозиција, метод „лик во огледало“.
- Карактеристики на заземјувач
 - ▶ отпорноста на распростирање R_Z ,
 - ▶ потенцијал U_Z ,
 - ▶ струја на одведување I_Z ,
 - ▶ потенцијали во околината $\varphi(x, y, z)$,
 - ▶ потенцијални разлики на допир E_d и чекор E_c .
- Примена на софтверски алатки (MATLAB). Типски заземјувачи.
- Спрегнати заземјувачи.
- Емпириски формули и приближни релации.

Задача на заземјувачите, видови заземјувачи

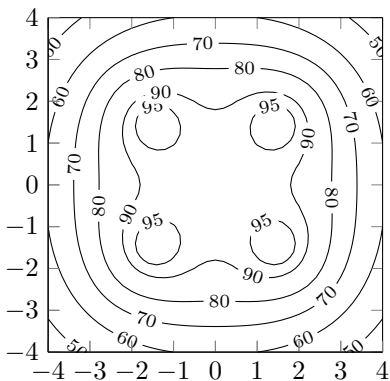
- Заземјувачите треба да создадат пат на струјата на грешка во земјата со што е можно помала преодна отпорност.
 - ▶ голема струја на куса врска за полесно функционирање на заштитата
- Елементите на заземјувачот: метални ленти или јажиња, челични цевки, метални плочи, водоводи, цевководи, метални конструкции на згради ...
- Положбата во земјата
 - ▶ хоризонтални
 - ▶ вертикални
 - ▶ коси
- Намена
 - ▶ заштитни
 - ▶ работни
 - ▶ громобрански

Карактеристични величини на заземјувачите

Потенцијална инка $\varphi(x, y)$



Еквипотенцијални линии кај 110 kV столб



Карактеристични величини на заземјувачите

- Напонот на заземјувачот

$$U_Z = \varphi_Z - \varphi_0 = \varphi_Z$$

- Отпорност на распростирање на заземјувачот

$$R_Z = \frac{\varphi_Z}{I_Z} = \frac{U_Z}{I_Z}.$$

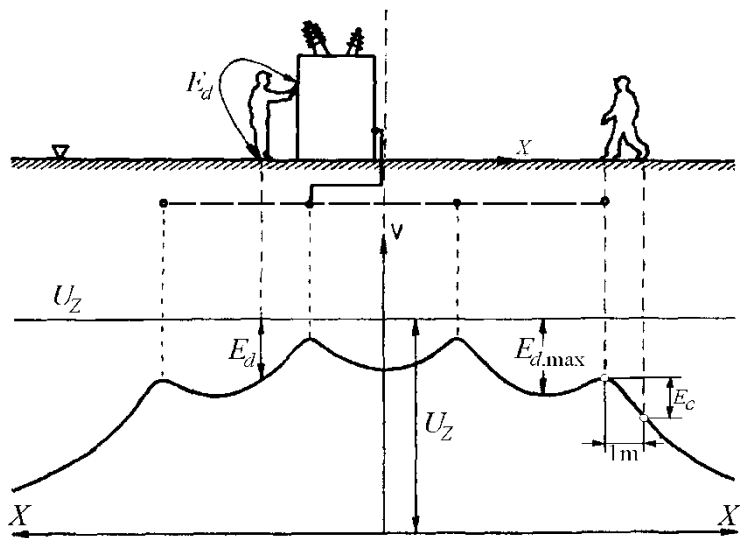
- Потенцијална разлика на допир

$$E_d = U_Z - \varphi_T \quad d_{ZT} = 1 \text{ m}$$

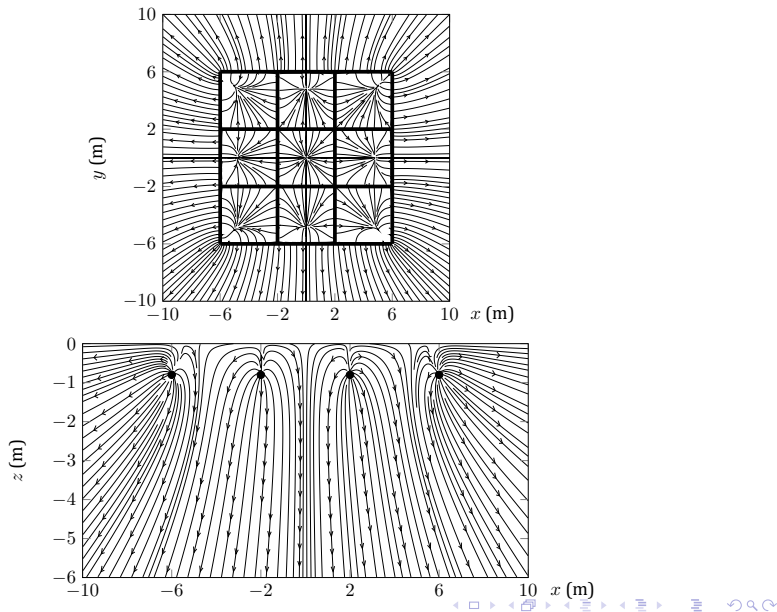
- Потенцијална разлика на чекор

$$E_c = \varphi_A - \varphi_B \quad d_{AB} = 1 \text{ m}$$

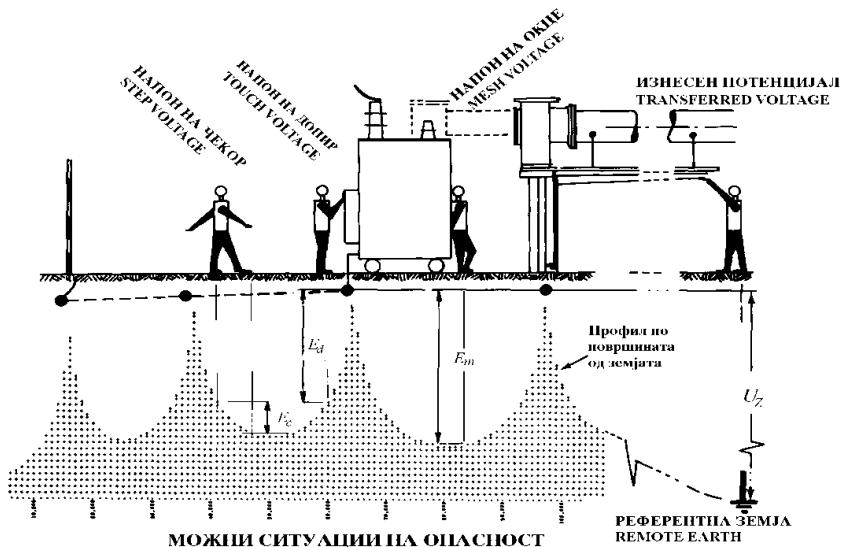
Карактеристични величини на заземјувачите



Линии на полето околу мрежест заземјувач

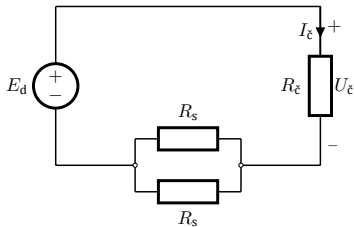
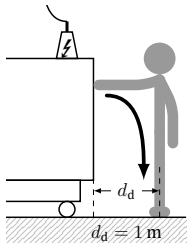


Можни ситуации на опасност



Напон на допир

Стапало како кружна плоча со пречник $D_s \approx 0,16 \text{ m}$ $R_s = \frac{\rho_P}{2 \cdot D_s} \approx 3 \cdot \rho_P$



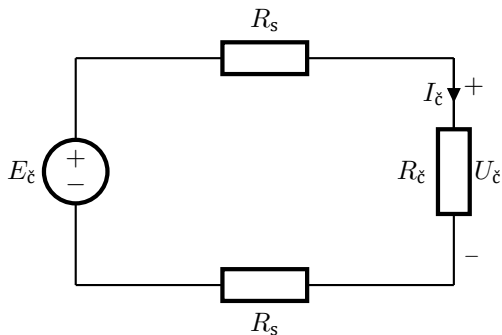
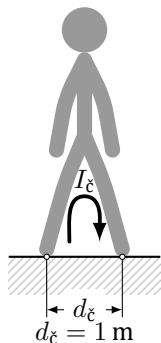
$$R_{pr} = \frac{R_s}{2} = 1,5 \cdot \rho_P,$$

$$U_d = \frac{R_{\check{c}}}{R_{\check{c}} + R_{pr}} \cdot E_d = \frac{R_{\check{c}}}{R_{\check{c}} + R_s/2} \cdot E_d$$

$$U_d = \frac{E_d}{s_d}$$

$$s_d = 1 + \frac{R_s}{2R_{\check{c}}} \quad R_{\check{c}} = 1000 \Omega \quad s_d \approx 1 + 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_P$$

Напон на чекор



$$U_c = \frac{R_c}{R_c + 2 \cdot R_s} \cdot E_c = \frac{E_c}{s_c},$$

$$s_c = 1 + 2 \cdot \frac{R_s}{R_c}$$

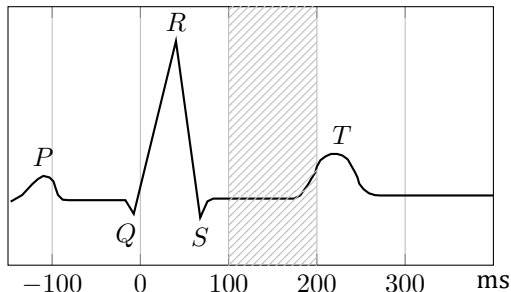
$$s_c = 1 + 6 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_p$$

Електричен удар и ефекти од струјата

I_{ξ} (mA)	Дејство на струјата
< 1	Не се чувствува.
$1 \div 9$	Благи безболни реакции. Можна е управувана контракција на мускулите и отпуштање на делот под напон.
$10 \div 20$	Грчење на мускулите и болки во рацете и градите. Отпуштањето на делот под напон најчесто не е можно. По завршувањето на струјниот удар организмот останува без последици.
$20 \div 50$	Се чувствуваат големи болки и настапува силна контракција на мускулите. Дишењето е отежнато.
$50 \div 100$	Доколку се работи за трајно дејство, можна е и вентрикуларна фибрилација на срцето.
$100 \div 500$	Вентрикуларната фибрилација е мошне веројатна.
> 500	Настануваат изгорници на местото на допирот. Настапува општ мускулен тонус којшто ја спречува појавата на фибрилација.

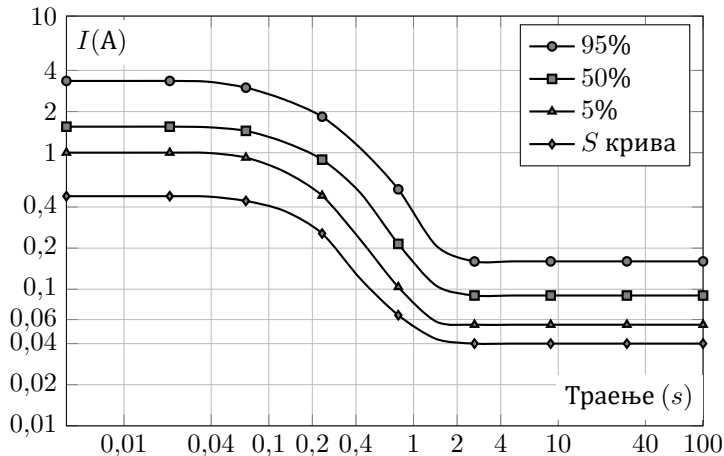
Критична фаза на срцевиот циклус

- Вентрикуларната фибрилација ќе настапи без оглед на големината на струјата ако струјниот удар е покус од $1/3$ од еден срцев циклус и е во S-T фазата.
- Ако струјниот удар е подолг од $1/3$ од еден срцев циклус појавата е неизвесна и зависи од големината и траењето на ударот.



Ризик според IЕС

Зависноста на големината на струјата од нејзиното траење за разни веројатности за појава на вентрикуларна фибрилација: 0% (*S* крива на сигурност), 5%, 50% и 95%.



Останати критериуми за опасност

Количество топлина во телото на човекот за време на ударот

$$W = \int_0^t i^2(t) \cdot dt$$

IEEE: Std 80-2000

$$I_{\text{doz}} = \frac{K}{\sqrt{t}}; \quad 0,03 \text{ s} \leq t \leq 3 \text{ s},$$

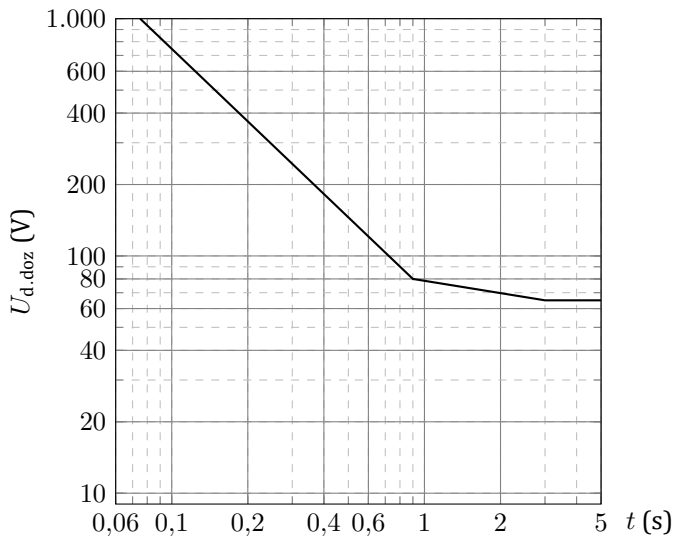
каде што $K = 116 \text{ mA}$ за лица до 50 kg , $K = 150 \text{ mA}$ за лица над 70 kg .

Количество електрицитет што ќе помине низ човековото тело

$$Q = \int_0^t i(t) \cdot dt,$$

$$U_{\text{d.doz}} = U_{\text{c.doz}} = \frac{75}{t} (\text{V}).$$

Дозвољени напони на допир според VDE 0141



Веројатност за вентрикуларна фибрилација

- I_F струја која предизвикува вентрикуларна фибрилација
- I_{F50} струја која предизвикува вентрикуларна фибрилација кај 50% луѓе
- $R_N = N(0, 1)$ случајна величина со нормална (гаусова) распределба

$$\log I_F = \log I_{F50} + 0,18 \cdot N(0, 1)$$

$$I_F = I_{F50} \cdot 10^{0,18 \cdot R_N}.$$

$$I_{F50}(A) = \begin{cases} 1,6 & t \leq 0,1 \text{ s}; \\ 0,16/t & 0,1 \text{ s} \leq t \leq 2 \text{ s}; \\ 0,08 & t > 2 \text{ s}. \end{cases}$$

- Струја I со траење t ќе предизвика фибрилација со веројатност $P = F(x)$

$$x = \frac{1}{0,18} \cdot \log \frac{I}{I_{F50}}.$$

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} \cdot dt,$$

Пример 1

При дефект на електромотор од една работна машина доаѓа до директен спој на куќиштето од машината со дефектната фаза така што таа го добива потенцијалот на фазниот спроводник $U_f = U_n / \sqrt{3} = 400 / \sqrt{3} = 231 \text{ V}$.

- Да се оцени колкава е веројатноста P работникот што работел во тој момент со машината и дошол под напон на допир од $U_d = U_f$ да загине од ударот ако осигурувачот којшто го штити моторот од машината прегорува за $t = 0,25 \text{ s}$.
- Колкав би бил ризикот ако уредот се штити со несоодветно избран (калемен) осигурувач кој ќе прегори за време $t = 1 \text{ s}$.

Во пресметките да земе $R_{\xi} = 1000 \Omega$.

Пример 1

$$I_{\xi} = \frac{U_d}{R_{\xi}} = \frac{231}{1000} = 0,231 \text{ A.}$$

$$I_{F50} = \frac{0,16}{t} = \frac{0,16}{0,25} = 0,64 \text{ A.}$$

$$x = \frac{1}{0,18} \cdot \log \frac{I_{\xi}}{I_{F50}} = \frac{1}{0,18} \cdot \log \frac{0,231}{0,64} = -2,46.$$

Од прилогот 1 имаме

за $x = x_1 = -2,4$ отчитуваме $F(x_1) = 0,00820$

за $x = x_2 = -2,5$ отчитуваме $F(x_2) = 0,00621$.

$$F(x) = F(x_1) + \frac{F(x_2) - F(x_1)}{x_2 - x_1} \cdot (x - x_1);$$

$$F(-2,46) = 0,00820 + \frac{0,00621 - 0,00820}{-2,5 + 2,4} \cdot (-2,46 + 2,4) = 0,007.$$

```
../programi/kaus.m
```

```
1 function F = gaus(x)
2 funkcija = @(t) exp(-t.^2/2);
3 F = integral(funkcija,-1000,x)/sqrt(2*pi);
```

```
>> F = gaus(-2.46)
```

```
F =
0.0069
```

Пример 1

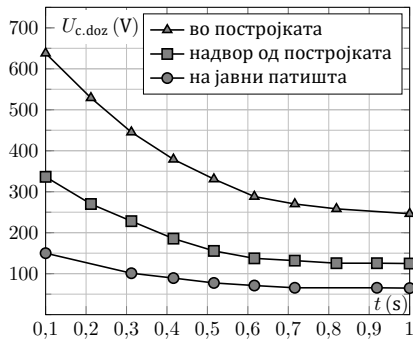
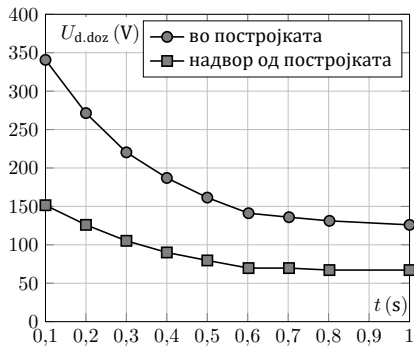
$$t = 1 \text{ s}$$

$$I_{F50} = \frac{0,16}{t} = \frac{0,16}{1} = 0,16 \text{ A.}$$

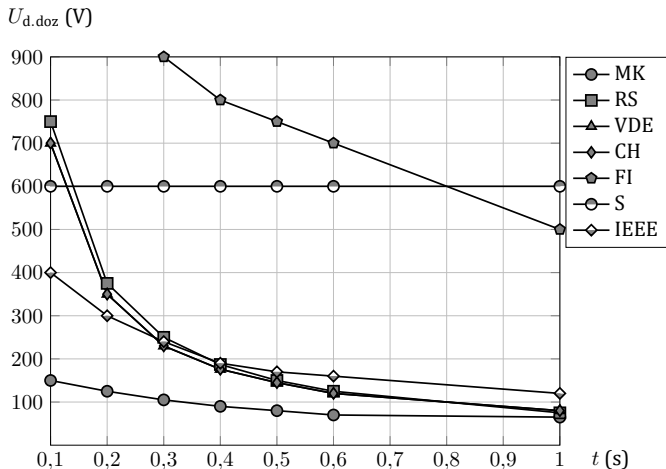
$$x = \frac{1}{0,18} \cdot \log \frac{I_c}{I_{F50}} = \frac{1}{0,18} \cdot \log \frac{0,231}{0,16} = 0,886.$$

```
>> F = gaus(0.886)
F =
    0.8122
```

Прописи кај нас



Прописи во светот



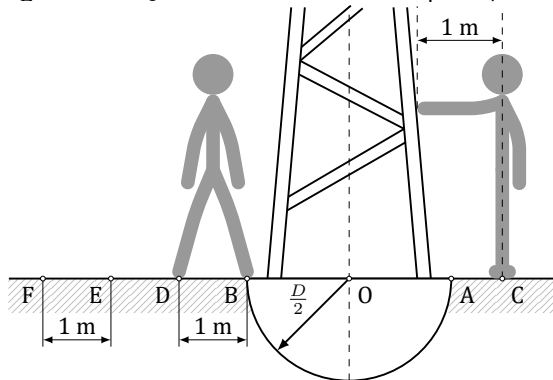
МК – Македонија, RS – Србија, VDE – препораки на VDE, CH – Швајцарија,
FI – Финска, S – Шведска, IEEE – препораки на IEEE

Пример 2 – заземљувач полутопка

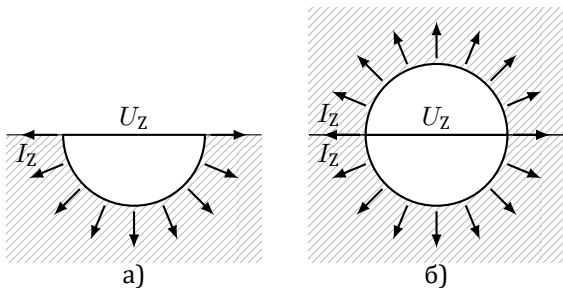
Да се пресмета отпорноста на распростирање R_Z за случајот кога пречникот на еквивалентната полутопка изнесува $D = 1,5 \text{ m}$, а земјиштето во која што е таа поставена е хомогено, со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$.

Ако е $I_Z = 30 \text{ A}$ колкави ќе бидат U_Z , $E_{d.\text{max}}$ и $E_{c.\text{max}}$.

Колкава ќе биде потенцијалната разлика на чекор на која ќе се изложи човек кој со своите стопала ги премостил точките E и F што се наоѓаат на растојанија $r_E = 4 \text{ m}$ и $r_F = 5 \text{ m}$ и лежат на ист правец. Познато е и $r_C = 1,5 \text{ m}$.



Пример 2



$$J = \frac{2I_Z}{4\pi r^2} = \frac{I_Z}{2\pi r^2} \quad J = \sigma \cdot E = \frac{E}{\rho} \quad E = \frac{\rho \cdot I_Z}{2\pi \cdot r^2}$$

$$\varphi_r = \varphi_\infty + \int_r^\infty E(r) \cdot dr = 0 + \int_r^\infty \frac{\rho \cdot I_Z}{2\pi \cdot r^2} \cdot dr = \frac{\rho \cdot I_Z}{2\pi \cdot r}$$

$$U_Z = \varphi_{r=R} = \frac{\rho \cdot I_Z}{2\pi \cdot R} \quad R_Z = \frac{U_Z}{I_Z} = \frac{\rho}{\pi \cdot D}$$

$$R_Z = \frac{\rho}{\pi D} = \frac{100}{\pi \cdot 1,5} = 21,221 \Omega;$$

$$U_Z = R_Z \cdot I_Z = 21,221 \cdot 30 = 637 \text{ V}$$

Пример 2

$$\varphi = U_Z \cdot \frac{R}{r} = U_Z \cdot \frac{D}{2r}; \quad r \geq R.$$

$$\varphi_A = \varphi_B = U_Z = 637 \text{ V};$$

$$\varphi_C = 637 \cdot \frac{1,5}{2 \cdot 1,5} = 319 \text{ V};$$

$$\varphi_D = 637 \cdot \frac{1,5}{2 \cdot 1,75} = 273 \text{ V};$$

$$\varphi_E = 637 \cdot \frac{1,5}{2 \cdot 4} = 119 \text{ V};$$

$$\varphi_F = 637 \cdot \frac{1,5}{2 \cdot 5} = 96 \text{ V}.$$

$$E_c = \varphi_E - \varphi_F = 119 - 96 = 23 \text{ V}.$$

$$s_d = 1 + 0,0015 \cdot \rho = 1,15;$$

$$U_{d.\max} = E_{d.\max} / s_d = 318 / 1,15 = 277 \text{ V};$$

$$s_c = 1 + 0,006 \cdot \rho = 1,60;$$

$$U_{c.\max} = E_{c.\max} / s_c = 364 / 1,60 = 228 \text{ V}.$$

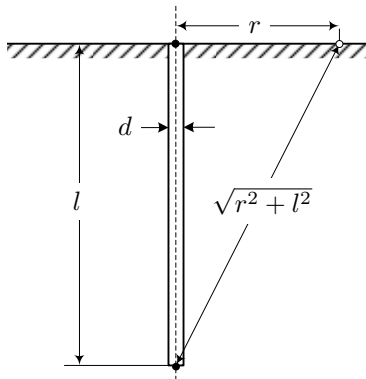
$$E_{d(C)} = U_Z - \varphi_C = 637 - 319 = 318 \text{ V}.$$

$$E_{d.\max} = E_{d(C)} = 318 \text{ V}.$$

$$E_{c.\max} = E_{c(B-D)} = \varphi_B - \varphi_D = 637 - 273 = 364 \text{ V}.$$

Пример 3

Столб за НН вод е поставен во тло со $\rho = 50 \Omega\text{m}$. Должината закопана во земјата е $l = 1,6 \text{ m}$, а челичната арматура има дијаметар $d = 10 \text{ cm}$. Да се утврди дали постојат опасни напони на допир и чекор при земјоспој. Колкава струја I_Z ќе се одведува од темелот на столбот во земјата во тој случај?



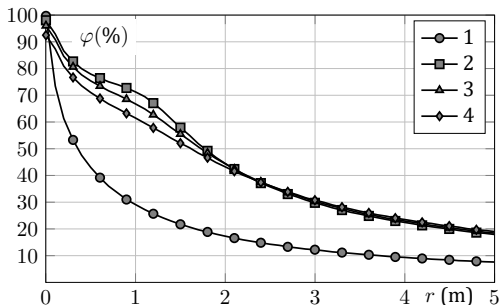
$$R_Z = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{4l}{d}$$

$$\varphi(r) = \frac{\rho \cdot I_Z}{4\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{\sqrt{l^2 + r^2} + l}{\sqrt{l^2 + r^2} - l}, \quad r > d/2,$$

Пример 3

$$R_Z = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{4l}{d} = \frac{50}{2\pi \cdot 1,6} \cdot \ln \frac{4 \cdot 1,6}{0,1} = 20,685 \Omega.$$

$$I_Z = \frac{U_f}{R_Z} = \frac{U_n / \sqrt{3}}{R_Z} = \frac{231}{20,685} = 11,165 \text{ A}.$$



- 1 Без прстен за обликување на потенцијалот
- 2 Со прстен со пречник $D = 2,5$ m закопан на длабочина $h = 0,5$ m
- 3 Случај кога прстенот е закопан на длабочина $h = 0,7$ m
- 4 Случај кога прстенот е закопан на длабочина $h = 1$ m

Пример 3

$$r_A = d/2 = 0,05 \text{ m};$$

$$\varphi_A = U_Z = 231 \text{ V};$$

$$r_B = d/2 + 1 = 1,05 \text{ m};$$

$$\varphi_B = \frac{50}{4\pi \cdot 1,6} \cdot \ln \frac{\sqrt{1,6^2 + 1,05^2} + 1,6}{\sqrt{1,6^2 + 1,05^2} - 1,6} = 67 \text{ V (29\%);}$$

$$r_C = r_B + 1 = 2,05 \text{ m};$$

$$\varphi_C = \frac{50}{4\pi \cdot 1,6} \cdot \ln \frac{\sqrt{1,6^2 + 2,05^2} + 1,6}{\sqrt{1,6^2 + 2,05^2} - 1,6} = 40 \text{ V (17,2\%)}.$$

$$E_{d.\text{max}} = U_Z - \varphi_B = 231 - 67 = 164 \text{ V (71\%)},$$

$$E_{c.\text{max}} = \varphi_A - \varphi_B = 231 - 67 = 164 \text{ V (71\%)}.$$

$$s_d = 1 + 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_p = 1,075;$$

$$s_c = 1 + 6 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_p = 1,3.$$

$$U_{d.\text{max}} = \frac{E_{d.\text{max}}}{s_d} = \frac{164}{1,075} = 153 \text{ V (66\%);}$$

$$U_{c.\text{max}} = \frac{E_{c.\text{max}}}{s_c} = \frac{164}{1,3} = 126 \text{ V (54,6\%)}.$$

Пример 3

За намалување на напоните на допир и чекор се прави „обликување на потенцијалот“. Се поставуваат на кружни прстени околу столбот на различни длабочини.

- намалување на отпорноста на распростирање R_Z и зголемување на струјата на земјоспој и
- поволно обликување на потенцијалот со што се намалуваат потенцијалните разлики на допир и чекор во околината на столбот.

Пример 4

Да се оцени дали е можно елиминирање на опасноста од појава на превисок напон на допир и чекор во претходниот пример (кога столбот е без дополнителен прстен) ако на површината од земјата околу него се постави слој од чакал или ситно кршен камен, во форма на круг со радиус најмалку 1,15 m и со дебелина од најмалку 10 cm.

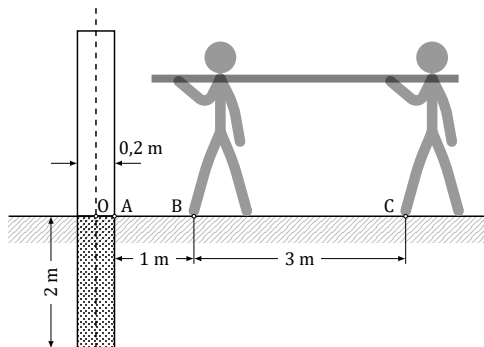
Со мерења се утврдило дека специфичната отпорност на површинскиот слој од чакал или од ситен кршен камен, дури и кога е тој влажен, изнесува најмалку $\rho_p = 5000 \Omega m$.

$$s_d = 1 + 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_p = 8,5; \quad U_{d.\max} = \frac{E_{d.\max}}{s_d} = \frac{164}{8,5} = 19 \text{ V};$$
$$s_c = 1 + 6 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_p = 31; \quad U_{c.\max} = \frac{E_{c.\max}}{s_c} = \frac{164}{31} = 5 \text{ V}.$$

Пример 5

Двајца работника носат метална цевка долга $l = 3 \text{ m}$ и се изложени на струен удар. Капацитивната струја што тече преку темелот е $I_Z = 40 \text{ A}$. Столбот е армирано бетонски со пречник $D = 25 \text{ cm}$, закопан е до $L_S = 2 \text{ m}$ ($\rho = 100 \Omega\text{m}$). Да се пресмета:

- потенцијалите φ_B и φ_C во стојните точки на двајцата работника
- струјата низ работниците ($R_{\xi} = 1000 \Omega$)
- веројатноста тие да настрадаат ако струјата на се исклучува за $t = 3 \text{ s}$



Пример 5

$$R_Z = \frac{\rho}{2\pi \cdot L_S} \cdot \ln \frac{4L_S}{D_S} = \frac{100}{2\pi \cdot 2} \cdot \ln \frac{4 \cdot 2}{0,2} = 29,355 \Omega.$$

$$U_Z = R_Z \cdot I_Z = 29,355 \cdot 40 = 1174 \text{ V}.$$

$$\varphi(r) = \frac{\rho \cdot I_Z}{4\pi \cdot L_S} \cdot \ln \frac{\sqrt{L_S^2 + r^2} + L_S}{\sqrt{L_S^2 + r^2} - L_S}, \quad r \geq \frac{D_S}{2},$$

$$r_A = \frac{D_S}{2} = 0,1 \text{ m}; \quad \varphi_A = U_Z = 1174 \text{ V} (100\%);$$

$$r_B = \frac{D_S}{2} + 1 = 1,1 \text{ m}; \quad \varphi_B = \frac{100 \cdot 40}{4\pi \cdot 2} \cdot \ln \frac{\sqrt{2^2 + 1,1^2} + 2}{\sqrt{2^2 + 1,1^2} - 2} = 433 \text{ V} (36,8\%);$$

$$r_C = r_B + 1 = 4,1 \text{ m}; \quad \varphi_C = \frac{100 \cdot 40}{4\pi \cdot 2} \cdot \ln \frac{\sqrt{2^2 + 4,1^2} + 2}{\sqrt{2^2 + 4,1^2} - 2} = 150 \text{ V} (12,7\%).$$

$$E_d = \varphi_B - \varphi_C = 433 - 150 = 283 \text{ V} (24,1\%).$$

Пример 5

$$R_s = 3 \cdot \rho_p = 3 \cdot 100 = 300 \Omega.$$

$$R_d = R_s/2 = 150 \Omega$$

$$I_{\xi} = \frac{E_d}{2 \cdot (R_{\xi} + R_{pr})} = \frac{283}{2 \cdot (1000 + 150)} = 0,123 \text{ A.}$$

$$t > 2 \text{ s}; \quad I_{F50} = \frac{0,16}{t} = \frac{0,16}{2} = 0,08 \text{ A.}$$

$$x = \frac{1}{0,18} \cdot \log \frac{I_{\xi}}{I_{F50}} = \frac{1}{0,18} \cdot \log \frac{0,123}{0,08} = 1,506.$$

$$P = F(x) = F(1,506) = 0,935;$$

$$I_{\xi} = 70,7 \text{ mA}; \quad x = 0,695; \quad P = F(x) \approx 0,755 (75,5\%).$$