

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

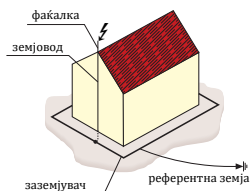
МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

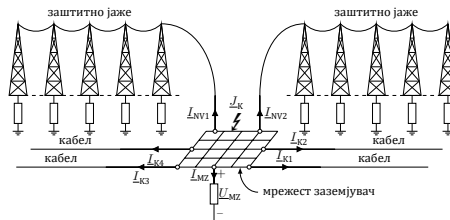
Скопје, 2017

1 / 36

Основни поими



Заземјувач како елемент на една громобранска инсталација



Заземјувачки систем на една 110 kV разводна постројка

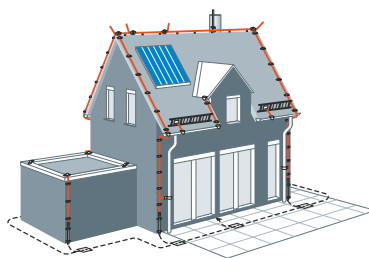
МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017

2 / 36

Основни поими



Изглед на заземјувач од еден индивидуален станбен објект

МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017

3 / 36

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

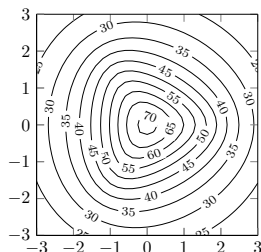
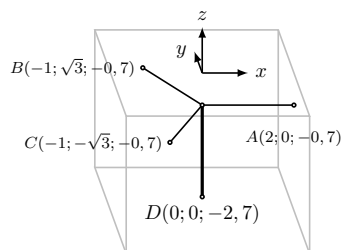
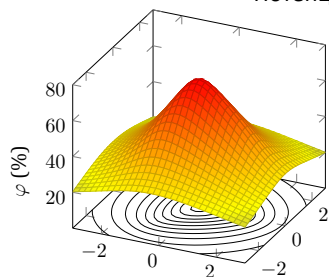
- Заземјувачките системи се сложени електрични кола – решавање на систем комплексни равенки (линеарни/нелинеарни).
- Точноста на резултатите најмногу зависи од моделите на елементите (заземјувачи, водови, кабли, спреги).
- Максвелови равенки, принцип на суперпозиција, метод „лик во огледало“.
- Карактеристики 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

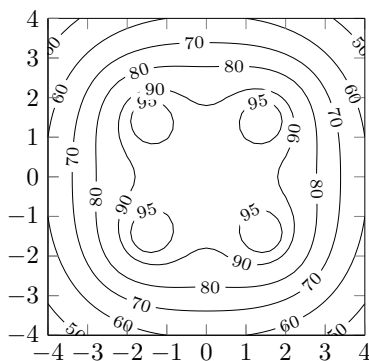
- Заземјувачите треба да создадат пат на струјата на грешка во земјата во што е можно помала преодна отпорност.
 - ▶ голема струја на куса врска за полесно функционирање на заштитата
- Елементите на заземјувачот: метални ленти или јажиња, челични цевки, метални плочи, водоводи, цевководи, метални конструкции 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 распространување на заземјувачот

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

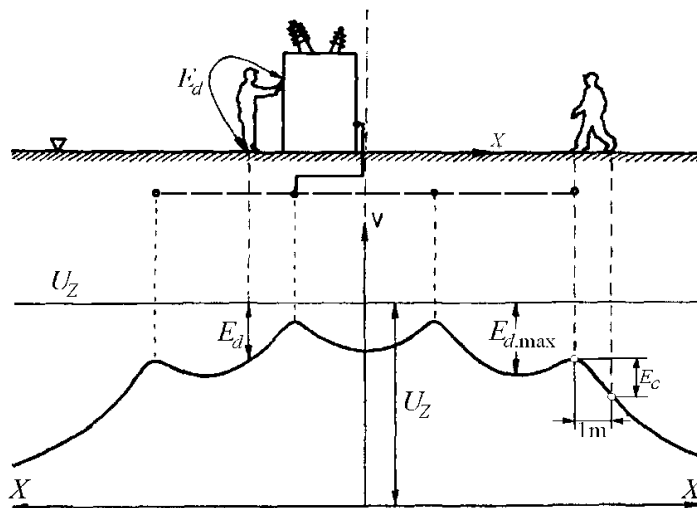
- Потенцијална разлика на допир

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

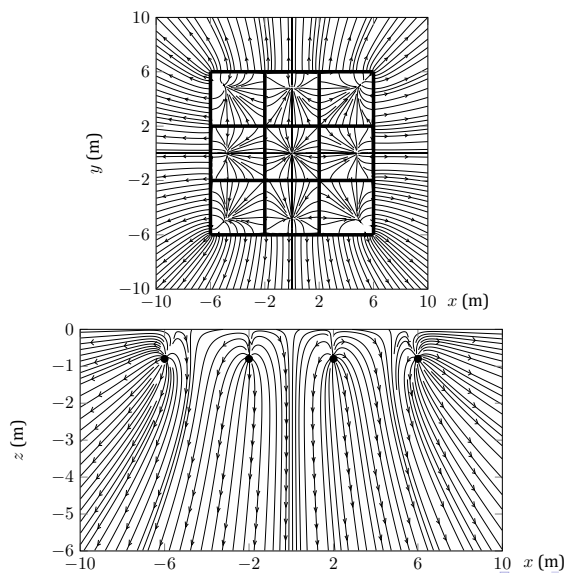
- Потенцијална разлика на чекор

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

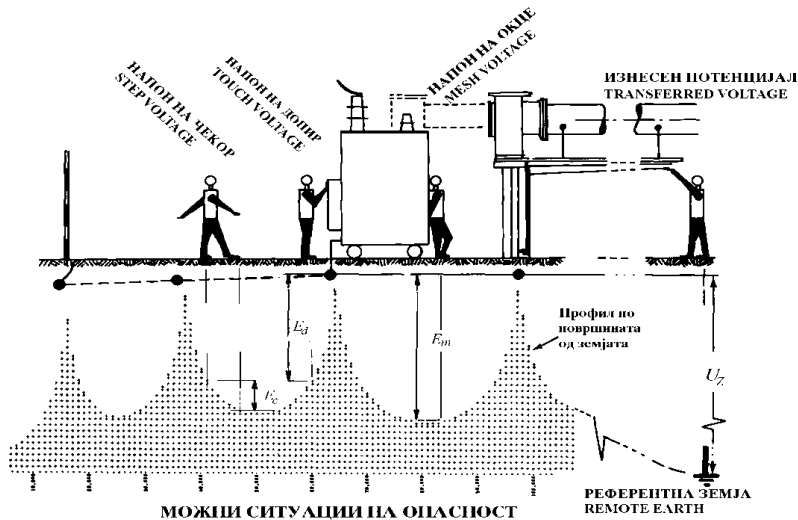
Карактеристични величини на заземјувачите



Линии на полето околу мрежест заземјувач

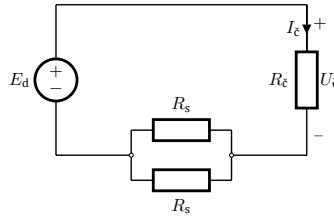
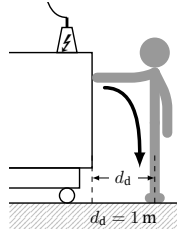


Можни ситуации на опасност



Напон на допир

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



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

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

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

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

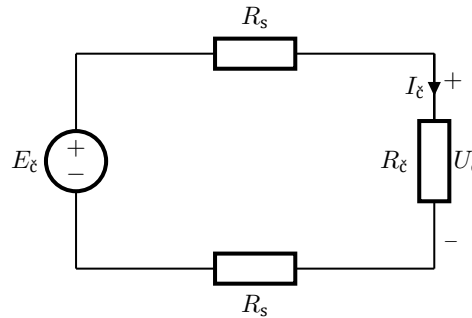
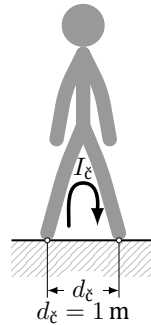
MT (ПЕЕС)

33C

Скопје, 2017

13 / 36

Напон на чекор



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

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

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

MT (ПЕЕС)

33C

Скопје, 2017

14 / 36

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.

MT (ПЕЕС)

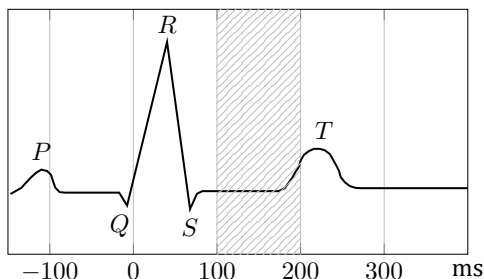
33C

Скопје, 2017

15 / 36

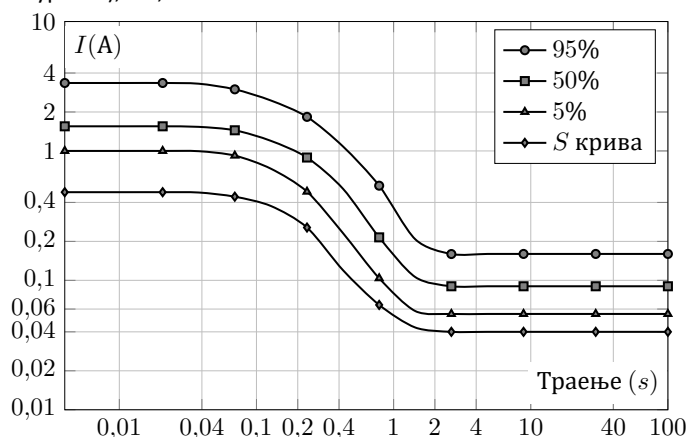
Критична фаза на срцевиот циклус

- 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 ИЕС

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

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

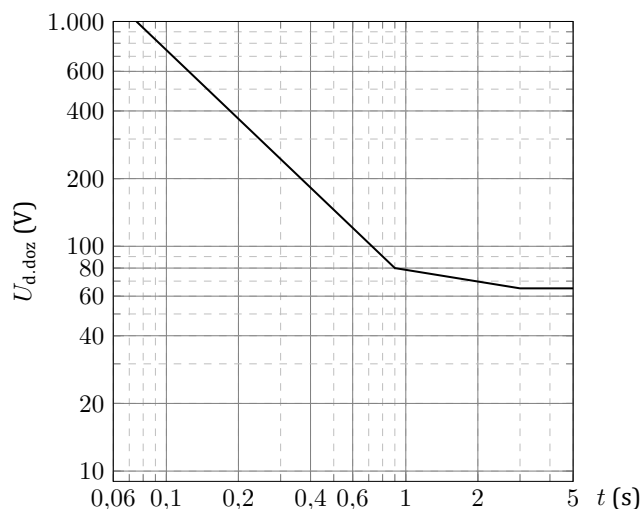
каде што $K = 116 \text{ mA}$ за лица до 50 kg , $K = 150 \text{ mA}$ за лица над 70 kg .

Количество електрицитет што ќе помине низ човековото тело

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

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

Дозволени 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

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

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

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

- 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 прегорувач 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
```

МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

22 / 36

Пример 1

$t = 1 \text{ s}$

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

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

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

```
F =
    0.8122
```

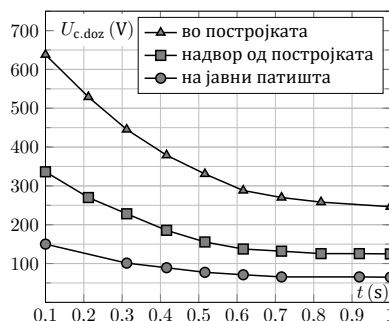
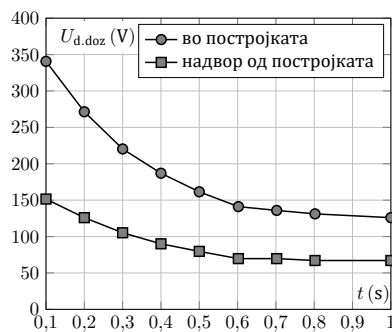
МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

23 / 36

Прописи кај нас



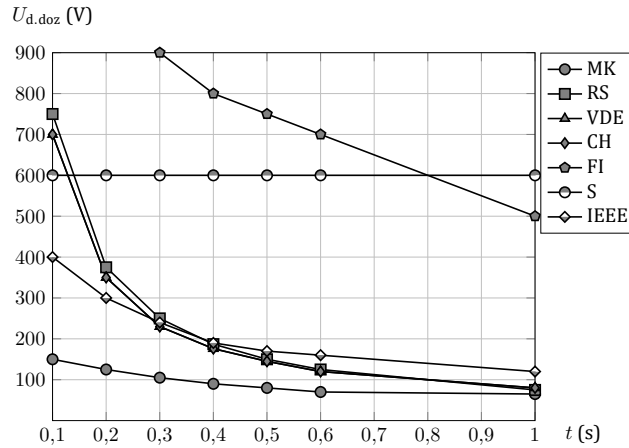
МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

24 / 36

Прописи во светот



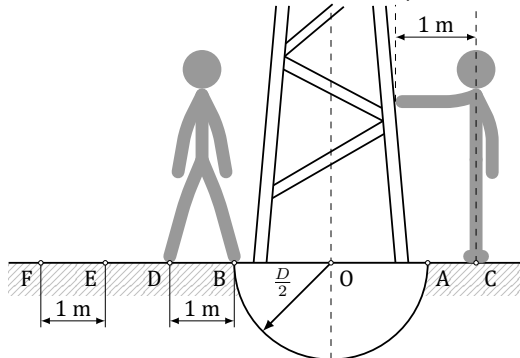
МК – Македонија, RS – Србија, VDE – препораки на VDE, CH – Швајцарија, FI – Финска, S – Шведска, IEEE – препораки на IEEE

Пример 2 – заземјувач полутопка

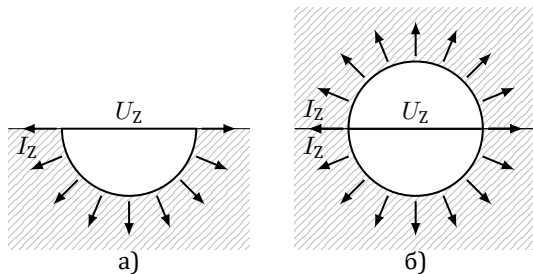
Да се пресмета отпорноста на распростирање R_Z за случајот кога пречникот на еквивалентната полутопка изнесува $D = 1,5 \text{ m}$, а земјиштето во која што е таа поставена е хомогено, со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega \text{ m}$.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Navigation icons

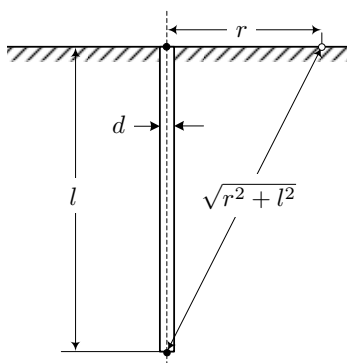
MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 28 / 36

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?



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

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

Navigation icons

MT (ПЕЕС)

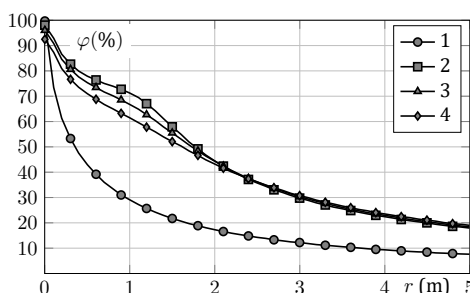
33С

Скопје, 2017 29 / 36

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 $D = 2,5 \text{ m}$ закопан на длабочина $h = 0,5 \text{ m}$
- 3 Случај кога прстенот е закопан на длабочина $h = 0,7 \text{ m}$
- 4 Случај кога прстенот е закопан на длабочина $h = 1 \text{ m}$

Navigation icons

MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 30 / 36

Пример 3

$$\begin{aligned}r_A &= d/2 = 0,05 \text{ m}; \\ \varphi_A &= U_Z = 231 \text{ V}; \\ r_B &= d/2 + 1 = 1,05 \text{ m}; \\ \varphi_B &= \frac{50}{4\pi \cdot 1,6} \cdot \ln \frac{\sqrt{1,6^2 + 1,05^2} + 1,6}{\sqrt{1,6^2 + 1,05^2} - 1,6} = 67 \text{ V (29\%);} \\ r_C &= r_B + 1 = 2,05 \text{ m}; \\ \varphi_C &= \frac{50}{4\pi \cdot 1,6} \cdot \ln \frac{\sqrt{1,6^2 + 2,05^2} + 1,6}{\sqrt{1,6^2 + 2,05^2} - 1,6} = 40 \text{ V (17,2\%);} \\ E_{d.\text{max}} &= U_Z - \varphi_B = 231 - 67 = 164 \text{ V (71\%);} \\ E_{c.\text{max}} &= \varphi_A - \varphi_B = 231 - 67 = 164 \text{ V (71\%);} \\ s_d &= 1 + 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_p = 1,075; \\ s_c &= 1 + 6 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_p = 1,3; \\ U_{d.\text{max}} &= \frac{E_{d.\text{max}}}{s_d} = \frac{164}{1,075} = 153 \text{ V (66\%);} \\ U_{c.\text{max}} &= \frac{E_{c.\text{max}}}{s_c} = \frac{164}{1,3} = 126 \text{ V (54,6\%)}.\end{aligned}$$

МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

31 / 36

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.

◀ ▶ ⏪ ⏩ ⏴ ⏵ ⏶ ⏷ ⏸ ⏹ ⏺ ⏻ ⏼ ⏽ ⏾ ⏿ 🔍

МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

32 / 36

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 $\rho_p = 5000 \Omega\text{m}$.

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

◀ ▶ ⏪ ⏩ ⏴ ⏵ ⏶ ⏷ ⏸ ⏹ ⏺ ⏻ ⏼ ⏽ ⏾ ⏿ 🔍

МТ (ПЕЕС)

33С

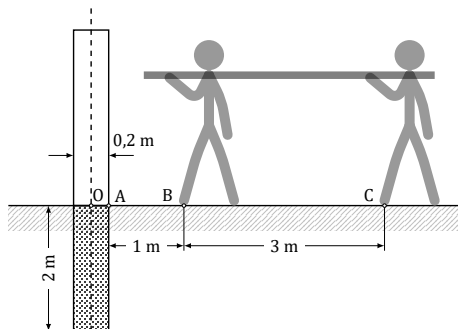
Скопје, 2017

33 / 36

Пример 5

Двајца работника носат метална цевка долга $l = 3$ m и се изложени на струен удар. Капацитивната струја што тече преку темелот е $I_Z = 40$ A. Столбот е армирано бетонски со пречник $D = 25$ cm, закопан е до $L_S = 2$ 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 $t = 3$ s



MT (ПЕЕС)

33C

Скопје, 2017 34 / 36

Пример 5

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

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

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

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

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

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

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

MT (ПЕЕС)

33C

Скопје, 2017 35 / 36

Пример 5

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

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

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

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

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

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

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

MT (ПЕЕС)

33C

Скопје, 2017 36 / 36

Заземјувачи и заземјувачки системи во електроенергетските мрежи

Карактеристики на тлото и негово влијание врз карактеристиките на заземјувачите

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

МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017

1 / 11

Специфична отпорност на тлото

- отпорноста на распростирање R_Z е директно пропорционална на специфичната отпорност ρ
- вредноста на специфичната отпорност ρ во голема мерка зависи од количеството на вода во земјата и количеството на солите растворени водата
- почвите кои имаат голем волумен на пори какви што се лапорец и глина имаат мали вредности на ρ
- цврстите компактни карпи со мал волумен на порите какви што се варовник и доломитите имаат големи вредности на ρ

МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017

2 / 11

Специфични отпорности на некои почви

Средина	ρ (Ωm)
Дестилирана вода	10000
Морска вода	1
Речна вода	20 ÷ 40
Варовник компактен	400 ÷ 3000
Распукан варовник	200 ÷ 2000
Песок	100 ÷ 800
Лапорец	20 ÷ 300
Глинен шкрилец	20 ÷ 200
Глина	10 ÷ 60
Хумус	≈ 10
Гнајс, метаморфни стени	500 ÷ 2000
Доломит	200 ÷ 10000
Сув бетон	1000000
Гранит/базалт	600 ÷ 10000
Чакал	200 ÷ 6000
Чакал со глина	80 ÷ 400
Глиновид песок	60 ÷ 150
Песочна глина	50 ÷ 60
Црвеница	20 ÷ 100
Бентонит	2 ÷ 8

МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

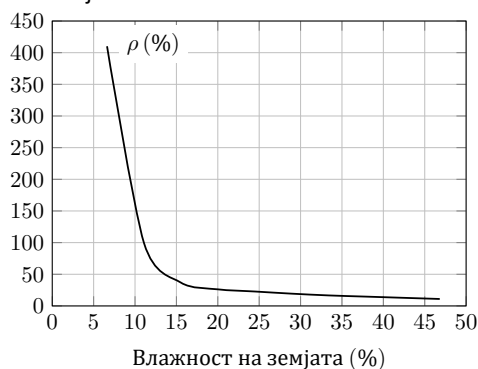
Скопје, 2017

3 / 11

Влажност на земјата

- а) сува (ρ е многу големо)
- б) влажна
- в) смрзната (ρ е многу големо)

Во мај и јуни специфичната отпорност ρ е најмала, а во септември и октомври таа е најголема.



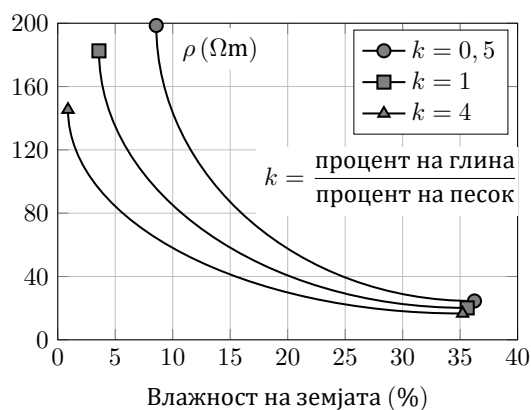
МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017 4 / 11

Зависност на ρ од односот глина/песок

- песокот има полупроводни зрна од кварц со дијаметар $0,2 \div 2$ mm и слаба способност за задржување на влагата
- глината има колоидна структура со густо збиени честички од редот 10^{-6} mm и многу поголема способност за задржување на влагата



МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017 5 / 11

Соленост на земјата

- соленоста на земјата влијае врз вредноста на ρ
- се предлага ставање на сол околу заземјувачот
 - ▶ ако процентот на солта е под 0,5% практично не влијае врз намалувањето ρ
 - ▶ процентот на сол од 0,5 % до 1 % е област на нагло намалување на ρ
 - ▶ концентрација на сол над 1% почнува да го нагрзува металот во почвата

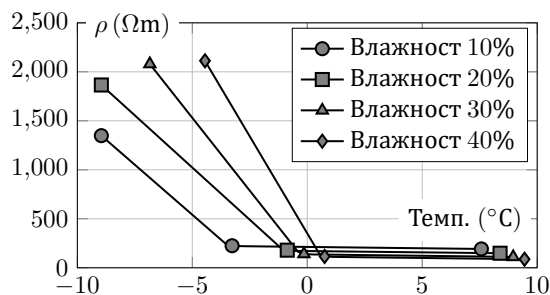
МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

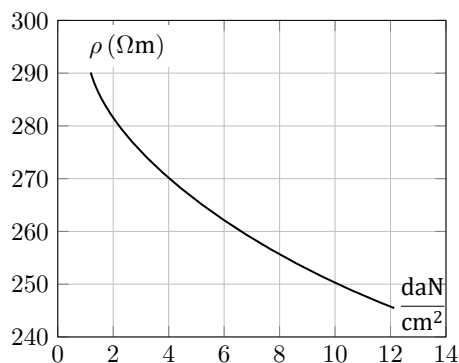
Скопје, 2017 6 / 11

Температурата на земјата

- при иста влажност на со зголемување на температурата ρ се намалува
- со смрзнувањето на земјата ρ значително се зголемува
- за да се избегне смрзнување заземјувачите треба да се постават на длабочина на која земјата не мрзне



Набиеност на земјата

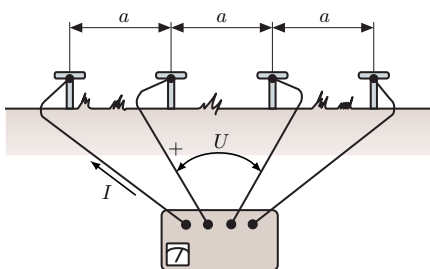


Мерење на специфичната отпорност на тлото

$$R = \mathfrak{R} \cdot \frac{\rho}{100}$$

ρ специфичната отпорност на тлото изразена во Ωm ,

\mathfrak{R} константа на заземјувачот, која е еднаква на отпорноста на распространување на заземјувачот во хомогено тло со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$.



$$\rho = 2\pi \cdot a \cdot \frac{U}{I} = 2\pi \cdot a \cdot R$$

Вредност на ρ на горниот слој со дебелина $h \approx a$. Постапката се повторува поголем број пати за $a = \{1, 2, 3, 5, 8, 10, \dots\}$ m.

Заземјувачи и заземјувачки системи во електроенергетските мрежи

Моделирање на заземјувачите со помош на компјутер

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

◀ ▶ ⏪ ⏩ ⏴ ⏵ ⏶ ⏷ ⏸ ⏹ ⏺ ⏻ ⏼ ⏽ ⏾ ⏿ 🔍

МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017

1 / 52

Основна задача на проектирањето на заземјувач

Основна задача при проектирањето и димензионирањето на заземјувачите е

- при однапред позната (дефинирана) струја на одведување I_Z ,
- при однапред позната специфична отпорност на земјата ρ и
- при однапред познато времетраење на струјата на грешка t ,

да се направи оптимален избор на заземјувач.

Оптималниот заземјувач треба да ги има следните одлики

- да ги задоволи ограничувањата за напоните на допир и чекор
- да биде економичен, т.е. да бидат потребни минимални инвестиции за неговата изведба

◀ ▶ ⏪ ⏩ ⏴ ⏵ ⏶ ⏷ ⏸ ⏹ ⏺ ⏻ ⏼ ⏽ ⏾ ⏿ 🔍

МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017

2 / 52

Решавање на заземјувач

Да се реши еден заземјувач значи да се определи отпорноста на распростирање R_Z и да се пресмета распределбата на потенцијалите $\varphi(x, y)$ по површината на земјата во неговата непосредна близина.

Постојат неколку начини на кои може да се реши заземјувач

- со директни мерења на терен,
- со експериментирање на модели во лабораторија (електролитичка када),
- со пресметки.

Постојат повеќе нумерички постапки за решавање на заземјувачите

- потенцијален метод,
- методот на парцијални површини,
- емпириски формули.

◀ ▶ ⏪ ⏩ ⏴ ⏵ ⏶ ⏷ ⏸ ⏹ ⏺ ⏻ ⏼ ⏽ ⏾ ⏿ 🔍

МТ (ПЕЕС)

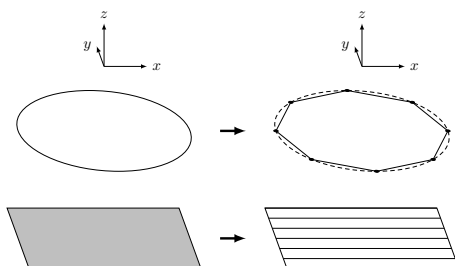
ЗЗС

Скопје, 2017

3 / 52

Потенцијален метод – претпоставки

- Заземјувачот се состои од n праволиниски елементи-спроводници кои што се меѓусебно галвански поврзани;
- Заземјувачот е поставен во неограничена хомогена средина со позната специфична отпорност ρ .
- Должината на елементите е доволно мала така што може да се занемарат падовите на напони во нив и може да се смета дека сите n елементи од заземјувачот се наоѓаат на ист потенцијал.



МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 4 / 52

Максвелови равенки

Разгледуваме заземјувач со n електроди од кои течат струи $I_1, I_2, \dots, I_k, \dots, I_n$.
Потенцијал на k -тата електрода

$$\varphi_k = r_{k1}I_1 + r_{k2}I_2 + \dots + r_{kk}I_k + \dots + r_{kn}I_n = \sum_{j=1}^n r_{kj}I_j.$$

r_{kj} – сопствени и меѓусебни отпорности

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \dots = \varphi_k = \dots = \varphi_n = U_Z.$$

$$U_Z = r_{11}I_1 + r_{12}I_2 + \dots + r_{1n}I_n,$$

$$U_Z = r_{21}I_1 + r_{22}I_2 + \dots + r_{2n}I_n,$$

⋮

$$U_Z = r_{n1}I_1 + r_{n2}I_2 + \dots + r_{nn}I_n.$$

$$\mathbf{E} \cdot U_Z = \mathbf{r} \cdot \mathbf{I}$$

$$\mathbf{E} = [1 \quad 1 \quad \dots \quad 1]^T$$

$$\mathbf{I} = [I_1 \quad I_2 \quad \dots \quad I_n]^T$$

МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 5 / 52

Пресметка на R_Z , U_Z и \mathbf{I}

$$\mathbf{E} \cdot U_Z = \mathbf{r} \cdot \mathbf{I}$$

$$I_Z = \mathbf{E}^T \cdot \mathbf{I}.$$

$$\mathbf{r}^{-1} \cdot \mathbf{E} \cdot U_Z = \mathbf{I}$$

$$\mathbf{E}^T \cdot \mathbf{r}^{-1} \cdot \mathbf{E} \cdot U_Z = \mathbf{E}^T \cdot \mathbf{I} = I_Z,$$

$$R_Z = \frac{U_Z}{I_Z} = \frac{1}{\mathbf{E}^T \cdot \mathbf{r}^{-1} \cdot \mathbf{E}}.$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{r}^{-1}$$

$$R_Z = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n y_{ij}}.$$

$$U_Z = R_Z \cdot I_Z.$$

$$\mathbf{I} = \mathbf{r}^{-1} \cdot \mathbf{E} \cdot U_Z.$$

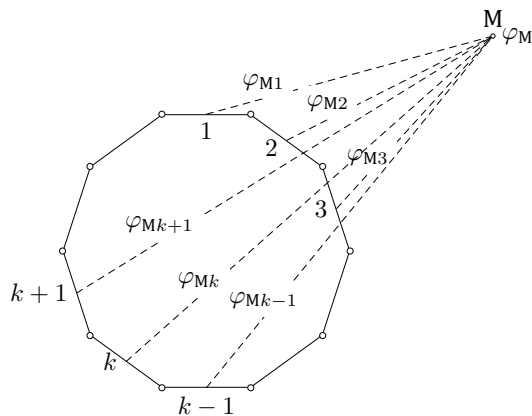
$$I_i = U_Z \cdot \sum_{j=1}^n y_{ij} = U_Z \cdot (y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in}), \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 6 / 52

Потенцијал во точка



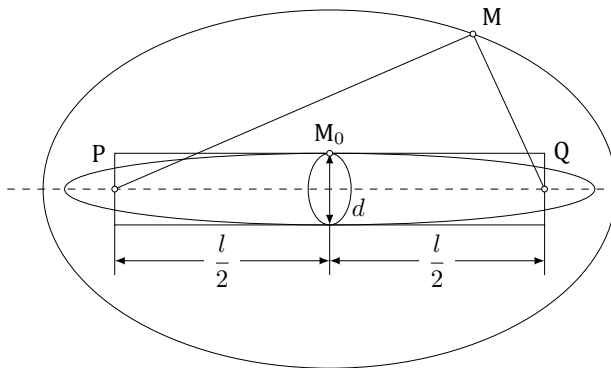
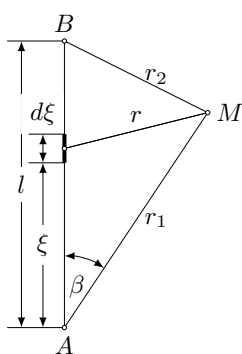
$$\varphi_M = \sum_{i=1}^n r_{iM} \cdot I_i = r_{1M} \cdot I_1 + r_{2M} \cdot I_2 + \dots + r_{n-1M} \cdot I_{n-1} + r_{nM} \cdot I_n,$$

MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 7 / 52

Заемна отпорност помеѓу спроводник и точка



- $l \gg d$ спроводникот ќе го третираме како обртен елипсоид
- линиската густина на струјата по должината на спроводникот е константна I/l

MT (ПЕЕС)

33С

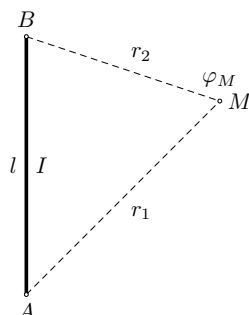
Скопје, 2017 8 / 52

Заемна отпорност помеѓу спроводник и точка

$$d\varphi_M = \frac{\rho}{4\pi} \cdot \frac{dI}{r} = \frac{\rho \cdot I}{4\pi \cdot l} \cdot \frac{d\xi}{r}$$

$$\alpha_M = \frac{\varphi_M}{I} = \frac{\rho}{4\pi \cdot l} \cdot \int_l \frac{d\xi}{r}$$

$$\alpha_M = \frac{\rho}{4\pi l} \cdot \ln \frac{r_1 + r_2 + l}{r_1 + r_2 - l}$$



MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 9 / 52

Сопствена отпорност на спроводник

Точката ($M \equiv M_0$) е на самиот спроводник точно на неговата средина

$$\alpha_M = \frac{\varphi_M}{I} = \frac{\varphi}{I} \equiv \alpha_s.$$

$$r_1 = r_2 = \sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{l^2 + d^2} = \frac{1}{2} \cdot l \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{d}{l}\right)^2}.$$

$$r_1 + r_2 = l \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{d}{l}\right)^2} \approx l \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \frac{d^2}{l^2}\right) = l + \frac{d^2}{2l}.$$

$$\alpha_s = \frac{\rho}{4\pi l} \cdot \ln \frac{r_1 + r_2 + l}{r_1 + r_2 - l} = \frac{\rho}{4\pi l} \cdot \ln \frac{2l + d^2/2l}{d^2/2l} \approx \frac{\rho}{4\pi l} \cdot \ln \frac{4l^2}{d^2}$$

$$\alpha_s = \frac{\rho}{2\pi l} \cdot \ln \frac{2l}{d}.$$

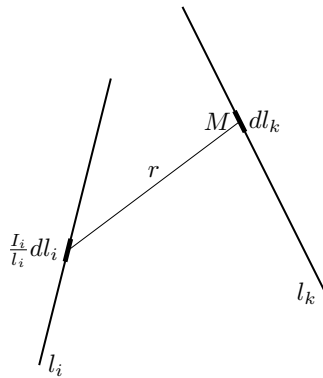
Navigation icons

MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 10 / 52

Меѓусебна отпорност помеѓу два спроводника



Методот на средни потенцијали

$$\varphi_{ik} = \frac{1}{l_k} \cdot \int_{l_k} \varphi_{iM} \cdot dl_k.$$

$$\varphi_{iM} = \frac{\rho \cdot I_i}{4\pi \cdot l_i} \cdot \int_l \frac{dl_i}{r}.$$

$$\alpha_{ik} = \frac{\varphi_{ik}}{I_i} = \frac{\rho}{4\pi \cdot l_i \cdot l_k} \cdot \int_{l_i} \int_{l_k} \frac{dl_i \cdot dl_k}{r}.$$

Нојманов (Neumann) интеграл

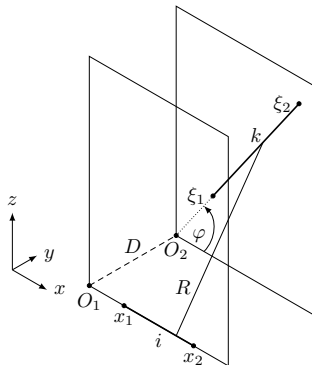
Navigation icons

MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 11 / 52

Аналитичко решение на Нојмановиот интеграл



$$\int_{x_1}^{x_2} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \frac{dx \cdot d\xi}{R} = P(x_1, \xi_1) + P(x_2, \xi_2) - P(x_1, \xi_2) - P(x_2, \xi_1),$$

$$P(x, \xi) = x \cdot \ln |\xi - x \cdot \cos \varphi + R| + \xi \cdot \ln |x - \xi \cdot \cos \varphi + R| + \frac{2D}{\sin \varphi} \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{x + \xi + R}{D} \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right),$$

$$R = R(x, \xi) = \sqrt{x^2 + \xi^2 + D^2 - 2 \cdot x \cdot \xi \cdot \cos \varphi}.$$

$$\varphi = 0: \quad P(x, \xi) = x \cdot \ln |\xi - x + R| + \xi \cdot \ln |x - \xi + R| + (x + \xi + R),$$

$$R = R(x, \xi) = \sqrt{(x - \xi)^2 + D^2}.$$

$$D = 0: \quad P(x, \xi) = x \cdot \ln |\xi - x \cdot \cos \varphi + R| + \xi \cdot \ln |x - \xi \cdot \cos \varphi + R|,$$

$$R = R(x, \xi) = \sqrt{x^2 + \xi^2 - 2 \cdot x \cdot \xi \cdot \cos \varphi}.$$

Navigation icons

MT (ПЕЕС)

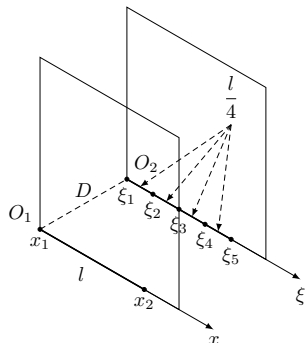
33С

Скопје, 2017 12 / 52

Нумеричко решение на Нојмановиот интеграл

Да се реши Нојмановиот интеграл, применувајќи го методот на средни потенцијали, како средна вредност од потенцијалите во $n_t = 5$ рамномерно распределени точки по должината на едниот од спроводниците. Бројни вредности: $l = 10$ m, $D = 2$ m, $\rho = 100$ Ω m.

$$\xi_j = \xi_1 + (j-1) \cdot \Delta\xi = \xi_1 + (j-1) \cdot \frac{l}{n_t-1} = 0 + (j-1) \cdot \frac{l}{n_t-1}, j = 1, 2, \dots, n_t$$



MT (ПЕЕС)

33C

Скопје, 2017

13 / 52

Нумеричко решение на Нојмановиот интеграл

$$j = 1; \quad \xi_1 = 0; \quad r_1 = D = 2 \text{ m}; \quad r_2 = \sqrt{D^2 + l^2} = 10,198 \text{ m};$$

$$\varphi_1 = \frac{\rho \cdot I}{4\pi l} \cdot \ln \frac{r_1 + r_2 + l}{r_1 + r_2 - l} = 1,840 \text{ V.}$$

j	ξ_j (m)	r_1 (m)	r_2 (m)	$r_1 + r_2$ (m)	φ_j (V)
1	0,00	2,000	10,198	12,198	1,840
2	2,50	3,202	7,762	10,964	2,451
3	5,00	5,385	5,385	10,770	2,622
4	7,50	7,762	3,202	10,964	2,451
5	10,00	10,198	2,000	12,198	1,840

$$\varphi_{sr.} = \frac{1}{n_t} \sum_{j=1}^{n_t} \varphi_j = \frac{1,840 + 2,451 + 2,622 + 2,451 + 1,840}{5} = 2,241 \text{ V.}$$

$$\alpha_m = 2,241 \Omega.$$

MT (ПЕЕС)

33C

Скопје, 2017

14 / 52

Пример 1

За претходниот пример да се направи програма во Matlab со која ќе се пресмета меѓусебната отпорност со нумеричко решавање на Нојмановиот интеграл. При тоа да се анализираат следните два случаја

- Пресметка на меѓусебната отпорност со методот на средни потенцијали со однапред зададен број на точки n_t , при што точките се рамномерно распределени по должината на вториот спроводник;
- Пресметка на меѓусебната отпорност со решавање на Нојмановиот интеграл со помош на функцијата `integral`.

MT (ПЕЕС)

33C

Скопје, 2017

15 / 52

Пример 1а

```
../programi/r_meg_2_lenti/par_lenti.m
1 function Z = par_lenti()
2 Z.rho = 100;
3 Z.L = [
4     0 0 -1 10 0 -1
5     0 2 -1 10 2 -1
6     ];
```

```
../programi/r_meg_2_lenti/r_meg_2_lenti_sum.m
1 function Rm = r_meg_2_lenti_sum(datoteka,nt)
2 Z = feval(datoteka); rho = Z.rho; L = Z.L;
3 [xp,yp,zp,xk,yk,zk] = ...
4     deal(L(:,1),L(:,2),L(:,3),L(:,4),L(:,5),L(:,6));
5 d1 = sqrt((xk(1)-xp(1))^2 + (yk(1)-yp(1))^2 + (zk(1)-zp(1))^2);
6 xt = linspace(xp(2),xk(2),nt);
7 yt = linspace(yp(2),yk(2),nt);
8 zt = linspace(zp(2),zk(2),nt);
9 r1 = sqrt((xp(1)-xt).^2 + (yp(1)-yt).^2 + (zp(1)-zt).^2);
10 r2 = sqrt((xk(1)-xt).^2 + (yk(1)-yt).^2 + (zk(1)-zt).^2);
11 fi = rho/(4*pi*d1)*log((r1+r2+d1)/(r1+r2-d1));
12 Rm = mean(fi);
```

```
>> Rm = r_meg_2_lenti_sum('par_lenti',5)
Rm =
    2.2407
```

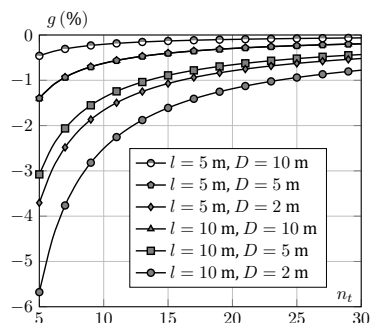
MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 16 / 52

Пример 1а – грешка

```
../programi/r_meg_2_lenti/greska_nt.m
1 Rm_tocno = 2.3756;
2 interval = 5:30;
3 g = [];
4 for nt = interval
5     Rm = r_meg_2_lenti_sum('par_lenti',nt);
6     g = [g (Rm/Rm_tocno - 1)*100];
7 end
8 plot(interval,g); grid;
```



MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 17 / 52

Пример 1б

$$\int_0^1 (ax^2 + 3x + b) dx,$$

за $a = 2$ и $b = -1$ решението е $2/3 + 3/2 - 1 = 1,1667$.

```
../programi/r_meg_2_lenti/int_parabola.m
1 a = 2;
2 b = -1;
3 f = @(x) a*x.^2 + 3*x + b;
4 I = integral(f,0,1)
```

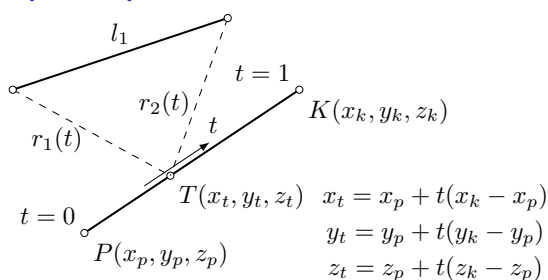
```
>> int_parabola
I =
    1.1667
```

MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 18 / 52

Пример 16



$$R_m = \frac{\rho}{4\pi l_1} \int_0^1 \ln \frac{r_1(t) + r_2(t) + l_1}{r_1(t) + r_2(t) - l_1} \cdot dt$$

MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

19 / 52

Пример 16

```

../programi/r_meg_2_lenti/nojman_2_lenti.m
1 function I = nojman_2_lenti(t, xp, yp, zp, xk, yk, zk, d1)
2 xt = xp(2) + t*(xk(2)-xp(2));
3 yt = yp(2) + t*(yk(2)-yp(2));
4 zt = zp(2) + t*(zk(2)-zp(2));
5 dx1 = xt-xp(1);
6 dy1 = yt-yp(1);
7 dz1 = zt-zp(1);
8 dx2 = xt-xk(1);
9 dy2 = yt-yk(1);
10 dz2 = zt-zk(1);
11 r1 = sqrt(dx1.^2 + dy1.^2 + dz1.^2);
12 r2 = sqrt(dx2.^2 + dy2.^2 + dz2.^2);
13 I = log((r1+r2+d1)/(r1+r2-d1));
    
```

```

../programi/r_meg_2_lenti/r_meg_2_lenti_int.m
1 function Rm = r_meg_2_lenti_int(datoteka)
2 Z = feval(datoteka); rho = Z.rho; L = Z.L;
3 [xp,yp,zp,xk,yk,zk] = ...
4 deal(L(:,1),L(:,2),L(:,3),L(:,4),L(:,5),L(:,6));
5 d1 = sqrt((xk(1)-xp(1))^2 + (yk(1)-yp(1))^2 + (zk(1)-zp(1))^2);
6 f = @(t) nojman_2_lenti(t, xp, yp, zp, xk, yk, zk, d1);
7 Rm = rho/(4*pi*d1)*integral(f,0,1);
    
```

```

>> Rm = r_meg_2_lenti_int('par_lenti')
Rm =
    2.3756
    
```

MT (ПЕЕС)

33С

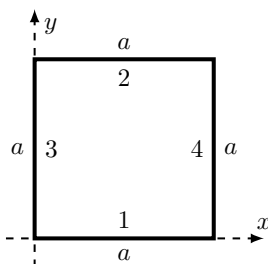
Скопје, 2017

20 / 52

Пример 2

Да се формира матрицата r на заземјувач во форма на квадрат со страница $a = 10$ m, поставен во неограничена хомогена спроводна средина со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$. Заземјувачот е изведен од бакарно јаже со пресек $\text{Cu}50 \text{ mm}^2$ и пречник $d = 9$ mm. Колкава ќе биде отпорноста на распространување на заземјувачот во наведените услови.

$$\alpha_s = \frac{\rho}{2\pi a} \cdot \ln \frac{2a}{d} = \frac{100}{2\pi \cdot 10} \cdot \ln \frac{2 \cdot 10}{9 \cdot 10^{-3}} = 12,2649 \Omega$$



MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

21 / 52

Пример 2 – меѓусебни отпорности

```

../programi/r_meg_2_lenti/kvadrat.m
1 function Z = kvadrat()
2 Z.rho = 100;
3 Z.L = [
4     0  0  -1  10  0  -1
5     0 10  -1  10  10  -1
6     0  0  -1  0  10  -1
7     10 0  -1  10  10  -1
8     ];

../programi/r_meg_2_lenti/r_meg_n_lenti.m
1 function R = r_meg_n_lenti(datoteka)
2 Z = feval(datoteka); rho = Z.rho; L = Z.L;
3 [xp,yp,zp,xk,yk,zk] = ...
4     deal(L(:,1),L(:,2),L(:,3),L(:,4),L(:,5),L(:,6));
5 n = length(xp);
6 R = zeros(n);
7 for i = 1:n
8     d1 = sqrt((xk(i)-xp(i))^2 + (yk(i)-yp(i))^2 + (zk(i)-zp(i))^2);
9     for j = i+1:n
10        k = [i j];
11        [xp1,yp1,zp1,xk1,yk1,zk1] = ...
12            deal(xp(k),yp(k),zp(k),xk(k),yk(k),zk(k));
13        f = @(t) nojman_2_lenti(t,xp1,yp1,zp1,xk1,yk1,zk1,d1);
14        R(i,j) = rho/(4*pi*d1)*integral(f,0,1);
15        R(j,i) = R(i,j);
16    end
17 end

```

MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 22 / 52

Пример 2 – меѓусебни отпорности

```

>> R = r_meg_n_lenti_int('kvadrat')
R =
     0     0.7435     1.4027     1.4027
     0.7435     0     1.4027     1.4027
     1.4027     1.4027     0     0.7435
     1.4027     1.4027     0.7435     0

```

```

>> R = R + 12.2649*eye(4)

```

$$r = \begin{bmatrix} 12,2649 & 0,7435 & 1,4027 & 1,4027 \\ 0,7435 & 12,2649 & 1,4027 & 1,4027 \\ 1,4027 & 1,4027 & 12,2649 & 0,7435 \\ 1,4027 & 1,4027 & 0,7435 & 12,2649 \end{bmatrix} \Omega$$

$$y = \begin{bmatrix} 0,08371 & -0,00309 & -0,00869 & -0,00869 \\ -0,00309 & 0,08371 & -0,00869 & -0,00869 \\ -0,00869 & -0,00869 & 0,08371 & -0,00309 \\ -0,00869 & -0,00869 & -0,00309 & 0,08371 \end{bmatrix} S$$

$$R_Z = \frac{1}{\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 y_{ij}} = \frac{1}{0,2529} = 3,954 \Omega.$$

MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 23 / 52

Метод „лик во огледало“

- Реалните заземјувачи можат да бидат поставени само во ограничена средина, закопани во земјата на длабочина h под површината.
- Влијанието на површината на земјата се опфаќа со воведување на лик на заземјувачот поставен симетрично во однос на површината на земјата.
- Бидејќи имаме струи I_i и I'_i од елементот i и неговиот лик i' ($I_i = I'_i$) елементите r_{ij} ќе бидат

$$r_{ij} = \alpha_{ij} + \alpha'_{ij},$$

- Потенцијал во точката M

$$\varphi_{iM} = r_{iM} \cdot I_i = (\alpha_{iM} + \alpha'_{iM}) \cdot I_i.$$

- Потенцијал во точката M ако таа е на површината од земјата

$$\varphi_{iM} = r_{iM} \cdot I_i = 2 \cdot \alpha_{iM} \cdot I_i.$$

MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 24 / 52

Пример 3

Заземјувачот во форма на квадрат да се реши за случајот кога е тој поставен во ограничена спроводна хомогена средина со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$, закопан на длабочина $h = 1 \text{ m}$. Колкав е потенцијалот φ во тежиштето T од квадратот, а колкав во точката на површината од земјата T_0 над самото тежиште. Бројни вредности: $a = 10 \text{ m}$, $d = 9 \text{ mm}$, $h = 1 \text{ m}$, $I_Z = 10 \text{ A}$, $\rho = 100 \Omega\text{m}$.

```
../programi/zaz/kvadrat_d.m
1 function Z = kvadrat_d()
2 Z.Iz = 10;
3 Z.rho = 100;
4 Z.L = [
5     0  0  -1  10  0  -1  9
6     0  10  -1  10  10  -1  9
7     0  0  -1  0  10  -1  9
8     10  0  -1  10  10  -1  9
9     ];
```

Пример 3 – програма (1)

```
../programi/zaz/zaz.m
1 function [r,Rz,Uz,I,L] = zaz(datoteka)
2 if isstruct(datoteka)
3     Z = datoteka;
4 else
5     Z = feval(datoteka);
6 end
7 rho = Z.rho; L = Z.L; n = size(L,1);
8 L = [L; L];
9 L(n+1:end,[3 6]) = -L(n+1:end,[3 6]);
10 [xp,yp,zp,xk,yk,zk,dp] = ...
11     deal(L(:,1),L(:,2),L(:,3),L(:,4),L(:,5),L(:,6),L(:,7)/1000);
12 r = zeros(n,2*n);
13 rs = zeros(n,1);
14 for i = 1:n
15     d1 = sqrt((xk(i)-xp(i))^2 + (yk(i)-yp(i))^2 + (zk(i)-zp(i))^2);
16     rs(i) = rho/(2*pi*d1)*log(2*d1/dp(i));
17     for j = i+1:2*n
18         k = [i j];
19         [xp1,yp1,zp1,xk1,yk1,zk1] = ...
20             deal(xp(k),yp(k),zp(k),xk(k),yk(k),zk(k));
21         f = @(t) nojman(t,xp1,yp1,zp1,xk1,yk1,zk1,d1);
22         r(i,j) = rho/(4*pi*d1)*integral(f,0,1);
23         if j<= n
24             r(j,i) = r(i,j);
25         end
```

Пример 3 – програма (2)

```
26     end
27 end
28 r = r(:,1:n) + r(:,n+1:end) + diag(rs);
29 Y = r^-1;
30 Rz = 1/sum(Y(:));
31 Uz = Rz*Z.Iz;
32 I = Uz*sum(Y,2);
```

Пример 3 – решение

```
>> r = zaz('kvadrat_d')
```

```
r =  
14.6405  1.4742  2.5778  2.5778  
1.4742  14.6405  2.5778  2.5778  
2.5778  2.5778  14.6405  1.4742  
2.5778  2.5778  1.4742  14.6405
```

$$y = \begin{bmatrix} 0,07254 & -0,00341 & -0,01106 & -0,01106 \\ -0,00341 & 0,07254 & -0,01106 & -0,01106 \\ -0,01106 & -0,01106 & 0,07254 & -0,00341 \\ -0,01106 & -0,01106 & -0,00341 & 0,07254 \end{bmatrix} S.$$

$$\sum y_{ij} = 4 \cdot 0,07254 - 4 \cdot 0,00341 - 8 \cdot 0,01106 = 0,1881 S.$$

$$R_Z = \frac{1}{0,1881} = 5,316 \Omega.$$

$$U_Z = R_Z \cdot I_Z = 5,316 \cdot 10 = 53,16 V.$$

$$I_1 = U_Z \cdot \sum_{j=1}^4 y_{1j} = 53,16 \cdot (0,07254 - 0,00341 - 2 \cdot 0,01106) = 2,5 A.$$

$$I_2 = I_3 = I_4 = I_1 = 2,5 A.$$

Navigation icons

MT (PEEC)

33C

Kronje, 2017

28 / 52

Пример 3 – решение

$$r_1 = \sqrt{(0-5)^2 + (0-5)^2 + (-1-(-1))^2} = 7,0711 m$$

$$r_2 = \sqrt{(10-5)^2 + (0-5)^2 + (-1-(-1))^2} = 7,0711 m$$

$$\varphi_1 = \frac{\rho \cdot I_1}{4\pi l_1} \ln \frac{r_1 + r_2 + l_1}{r_1 + r_2 - l_1} = \frac{100 \cdot 2,5}{4\pi \cdot 10} \ln \frac{7,0711 + 7,0711 + 10}{7,0711 + 7,0711 - 10} = 3,5068 V,$$

$$r_1 = \sqrt{(0-5)^2 + (0-5)^2 + (1-(-1))^2} = 7,3485 m$$

$$r_2 = \sqrt{(10-5)^2 + (0-5)^2 + (1-(-1))^2} = 7,3485 m$$

$$\varphi'_1 = \frac{\rho \cdot I_1}{4\pi l_1} \ln \frac{r_1 + r_2 + l_1}{r_1 + r_2 - l_1} = \frac{100 \cdot 2,5}{4\pi \cdot 10} \ln \frac{7,3485 + 7,3485 + 10}{7,3485 + 7,3485 - 10} = 3,3020 V$$

$$\varphi_T = 4 \cdot (\varphi_1 + \varphi'_1) = 4 \cdot (3,5068 + 3,3020) = 27,2352 V.$$

Navigation icons

MT (PEEC)

33C

Kronje, 2017

29 / 52

Пример 3 – решение

$$r_1 = \sqrt{(0-5)^2 + (0-5)^2 + (-1-0)^2} = 7,1414 m$$

$$r_2 = \sqrt{(10-5)^2 + (0-5)^2 + (-1-0)^2} = 7,1414 m$$

$$\varphi_0 = \frac{\rho \cdot I_1}{4\pi l_1} \ln \frac{r_1 + r_2 + l_1}{r_1 + r_2 - l_1} = \frac{100 \cdot 2,5}{4\pi \cdot 10} \ln \frac{7,1414 + 7,1414 + 10}{7,1414 + 7,1414 - 10} = 3,4520 V,$$

$$\varphi_{T0} = 8 \cdot \varphi_0 = 8 \cdot 3,4520 = 27,6160 V.$$

```
../programi/zaz/resi_kvadrat.m
```

```
1 [R,Rz,Uz,I,L] = zaz('kvadrat_d');  
2 rho = 100;  
3 T = [  
4     5 5 -1  
5     5 5 0  
6     ];  
7 I = [I; I];  
8 for i=1:2  
9     fi(i) = pot_tocka(T(i,:),I,L,rho);  
10 end  
11 fprintf('fi(%i) = %.4f V\n',[1:2]' fi')');
```

```
>> resi_kvadrat  
fi(1) = 27.2355 V  
fi(2) = 27.6158 V
```

Navigation icons

MT (PEEC)

33C

Kronje, 2017

30 / 52

Потенцијал во точка

```
../programi/zaz/pot_tocka.m
1 function fi = pot_tocka(T,I,L,rho)
2 fi = 0;
3 n = size(L,1);
4 for i = 1:n
5     [P,Q] = deal(L(i,1:3),L(i,4:6));
6     d = norm(P-Q);
7     r1 = norm(P-T);
8     r2 = norm(Q-T);
9     fi = fi + rho*I(i)/(4*pi*d)*log((r1+r2+d)/(r1+r2-d));
10 end
```

MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

31 / 52

Пример 4

За заземјувачот од примерот 3 да се нацрта потенцијалната инка за потенцијалите на површината на земјата во областа $x \in [-5, 15]$ m и $y \in [-5, 15]$ m. Да се нацртаат и еквипотенцијалните линии во истата област. Потенцијалите да се изразат во проценти од напонот на заземјувачот.

```
../programi/zaz/kvadrat_inka.m
1 [R,Rz,Uz,I,L] = zaz('kvadrat_d');
2 I = [I; 1];
3 rho = 100;
4 [X,Y] = meshgrid(-5:0.5:15,-5:0.5:15);
5 [m,n] = size(X);
6 fi = zeros(m,n);
7 for i = 1:m
8     for j = 1:n
9         T = [X(i,j) Y(i,j) 0];
10        fi(i,j) = pot_tocka(T,I,L,rho)/Uz*100;
11    end
12 end
13 figure; surf(X,Y,fi);
14 figure; [c,h] = contour(X,Y,fi,0:5:100); clabel(c,h); colorbar;
```

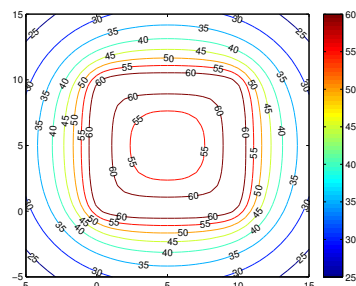
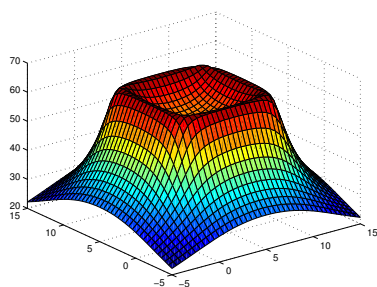
MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

32 / 52

Пример 4



MT (ПЕЕС)

33С

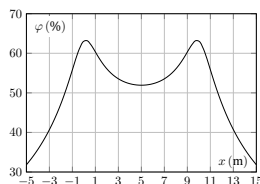
Скопје, 2017

33 / 52

Пример 5

За заземјувачот од примерот 3 да се нацрта промената на потенцијалот на површината на земјата по права линија од точката (-5,5) до точката (15,5). Пресметките да се направат за 50 точки по должина на линијата, а потенцијалите да се изразат во проценти од напонот на заземјувачот.

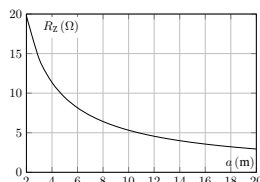
```
../programi/zaz/kvadrat_potlin.m
1 [R,Rz,Uz,I,L] = zaz('kvadrat_d');
2 I = [I; I];
3 rho = 100;
4 X = linspace(-5,15,50);
5 for i = 1:50
6     fi(i) = pot_tocka([X(i) 5 0],I,L,rho)/Uz*100;
7 end
8 plot(X,fi); grid
```



Пример 6

За заземјувач во форма на квадрат поставен во тло со $\rho = 100 \Omega\text{m}$ да се нацрта зависноста на отпорноста R_Z во функција од должината на страната на квадратот a . Да се земе дека a се менува од 2 m до 20 m со чекор од 1 m.

```
../programi/zaz/kvadrat_promenliv.m
1 Z = feval('kvadrat_d');
2 i = find(Z.L == 10);
3 Rz_site = [];
4 for a = 2:20
5     Z.L(i) = a;
6     [R, Rz] = zaz(Z);
7     Rz_site = [Rz_site; Rz];
8 end
9 plot(2:20,Rz_site); grid
```



Пример 7

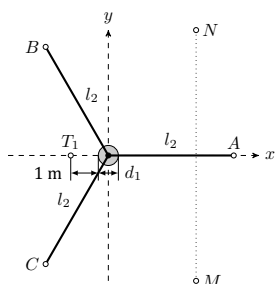
Еден армирано-бетонски столб од надземен вод е поставен во тло со специфична отпорност $\rho = 180 \Omega\text{m}$. Должината на делот од столбот закопан во земјата изнесува $l_1 = 2$ m и тој може да се еквивалентира со метален цилиндер со пречник $d_1 = 30$ cm. столбот е заземјен со 3 поцинкувани ленти закопани на длабочина $h = 1$ m. Лентите формираат симетрична ѕвезда, нивната должина е $l_2 = 10$ m и тие се со димензии 30×4 mm ($d_2 = 22$ mm). Во заземјувачот се инјектира струја на грешка $I_Z = 240$ A.

За заземјувачот се познати матриците

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} 47,0 & 9,1 & 9,1 & 9,1 \\ 9,1 & 23,8 & 4,1 & 4,1 \\ 9,1 & 4,1 & 23,8 & 4,1 \\ 9,1 & 4,1 & 4,1 & 23,8 \end{bmatrix} \Omega; \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} 25 & -7 & -7 & -7 \\ -7 & 46 & -4 & -4 \\ -7 & -4 & 46 & -4 \\ -7 & -4 & -4 & 46 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3} \text{ S},$$

во кои првата редица и колона се однесуваат на делот од столбот закопан во земјата.

Пример 7



- Отпорноста на распростирање R_Z и напонот на заземјувачот U_Z ,
- Струите на одведување во земјата од одделните електроди на заземјувачот,
- Напонот на допир во точката T_1 на површината на земјата која се наоѓа на оддалеченост од 1 m од работ на столбот. Да се земе предвид и пречникот на столбот,
- Да се пресмета веројатноста за смртен исход за човек кој е изложен на напон на допир во точката T_1 ако времето на реагирање на заштитата е 0,4 секунди. Отпорноста на човекот изнесува 1000Ω ,
- Најголемиот напон на чекор ако е позната промената на потенцијалот на површината на земјата по правецот $M - N$, при што координатите на точките се $M(7, -10)$ и $N(7, 10)$. Кривата на промена на потенцијалот е прикажана на сликата, а бројните вредности се дадени во табелата,
- Напонот на заземјувачот во случајот кога заземјувачот би имал само една лента наместо

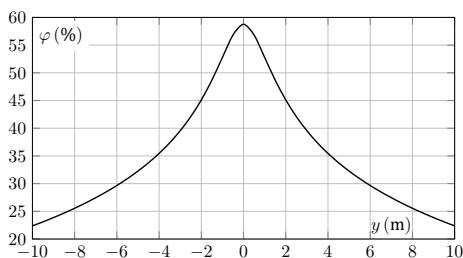
МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

37 / 52

Пример 7



y (m)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
φ (%)	58,8	56,8	52,8	48,7	45,1	42,1	39,5	37,4	35,5	33,8	32,3
y (m)	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	
φ (%)	30,9	29,7	28,5	27,5	26,5	25,6	24,7	23,9	23,1	22,4	

МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

38 / 52

Пример 7а,б

$$R_Z = \frac{1}{\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 y_{ij}} = \frac{1}{(25 + 3 \cdot 46 - 6 \cdot 7 - 6 \cdot 4) \cdot 10^{-3}} = 10,309 \Omega,$$

$$U_Z = R_Z \cdot I_Z = 10,309 \cdot 240 = 2474,227 \text{ V}.$$

$$I = y \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot U_Z = \begin{bmatrix} 25 - 7 - 7 - 7 \\ 46 - 7 - 4 - 4 \\ 46 - 7 - 4 - 4 \\ 46 - 7 - 4 - 4 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3} \cdot 2474,227 = \begin{bmatrix} 9,897 \\ 76,701 \\ 76,701 \\ 76,701 \end{bmatrix} \text{ A}.$$

МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

39 / 52

Пример 7в

$$\begin{aligned}r_1 &= \sqrt{(0 - (-1.15))^2 + (0 - 0)^2 + (0 - 0)^2} = 1,15 \text{ m}, \\r_2 &= \sqrt{(0 - (-1.15))^2 + (0 - 0)^2 + (-2 - 0)^2} = 2,307 \text{ m}, \\ \varphi_1 &= \frac{\rho \cdot I_1}{4\pi l_1} \ln \frac{r_1 + r_2 + l_1}{r_1 + r_2 - l_1} = \frac{180 \cdot 9,897}{4\pi \cdot 2} \ln \frac{1,15 + 2,307 + 2}{1,15 + 2,307 - 2} = 93,601 \text{ V}, \\r_1 &= \sqrt{(0 - (-1.15))^2 + (0 - 0)^2 + (-1 - 0)^2} = 1,524 \text{ m}, \\r_2 &= \sqrt{(10 - (-1.15))^2 + (0 - 0)^2 + (-1 - 0)^2} = 11,195 \text{ m}, \\ \varphi_2 &= \frac{\rho \cdot I_2}{4\pi l_2} \ln \frac{r_1 + r_2 + l_2}{r_1 + r_2 - l_2} = \frac{180 \cdot 76,701}{4\pi \cdot 10} \ln \frac{1,524 + 11,195 + 10}{1,524 + 11,195 - 10} = 233,239 \text{ V}, \\r_1 &= \sqrt{(0 - (-1.15))^2 + (0 - 0)^2 + (-1 - 0)^2} = 1,524 \text{ m}, \\r_2 &= \sqrt{(-5 - (-1.15))^2 + (5\sqrt{3} - 0)^2 + (-1 - 0)^2} = 9,53 \text{ m}, \\ \varphi_3 &= \frac{\rho \cdot I_3}{4\pi l_3} \ln \frac{r_1 + r_2 + l_3}{r_1 + r_2 - l_3} = \frac{180 \cdot 76,701}{4\pi \cdot 2} \ln \frac{1,524 + 9,53 + 2}{1,524 + 9,53 - 2} = 328,994 \text{ V}, \\ \varphi &= 2 \cdot \varphi_1 + 2 \cdot \varphi_2 + 4 \cdot \varphi_3 = 2 \cdot 93,601 + 2 \cdot 233,239 + 4 \cdot 328,994 = 1969,656 \text{ V}, \\ U_d &= \frac{U_Z - \varphi}{1 + 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \rho} = \frac{2474,227 - 1969,656}{1 + 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 180} = 397,3 \text{ V}.\end{aligned}$$

МТ (ПЕЕС)

33С

Сконје, 2017

40 / 52

Пример 7г

$$\begin{aligned}I &= \frac{397,3}{1000} = 397,3 \text{ mA}, \\ I_{F50} &= \frac{0,16}{0,4} = 400 \text{ mA}, \\ x &= \frac{1}{0,18} \log \frac{I}{I_{F50}} = \frac{1}{0,18} \log \frac{397,3}{400} = -0,0163, \\ p &= F(x) = 0,5\end{aligned}$$

МТ (ПЕЕС)

33С

Сконје, 2017

41 / 52

Пример 7д

$$\begin{aligned}\Delta\varphi_1 &= \varphi(y=0) - \varphi(y=1) = 58,8 - 52,8 = 6 \%, \\ \Delta\varphi_2 &= \varphi(y=0,5) - \varphi(y=1,5) = 56,8 - 48,7 = 8,1 \%, \\ \Delta\varphi_3 &= \varphi(y=1) - \varphi(y=2) = 52,8 - 45,1 = 7,7 \%, \\ \Delta\varphi_4 &= \varphi(y=1,5) - \varphi(y=2,5) = 48,7 - 42,1 = 6,6 \%, \\ &\vdots \\ E_c &= \frac{8,1}{100} \cdot U_Z = \frac{8,1}{100} \cdot 2474,227 = 200,412 \text{ V}, \\ U_c &= \frac{E_c}{1 + 6 \cdot 10^{-3} \cdot \rho} = \frac{200,412}{1 + 6 \cdot 10^{-3} \cdot 180} = 96,352 \text{ V}.\end{aligned}$$

МТ (ПЕЕС)

33С

Сконје, 2017

42 / 52

Пример 7г

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} 47,0 & 9,1 \\ 9,1 & 23,8 \end{bmatrix} \Omega,$$
$$\mathbf{y} = \mathbf{r}^{-1} = \begin{bmatrix} 0,023 & -0,009 \\ -0,009 & 0,045 \end{bmatrix} \text{ S.}$$

$$R_Z = \frac{1}{(23 + 45 - 2 \cdot 9) \cdot 10^{-3}} = 20 \Omega,$$

$$U_Z = R_Z \cdot I_Z = 20 \cdot 240 = 4800 \text{ V.}$$

MT (ПЕЕС)

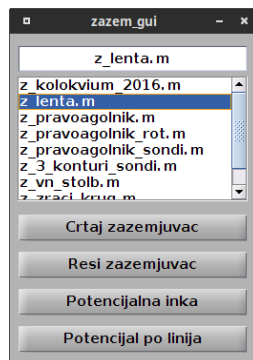
33С

Скопје, 2017

43 / 52

Програма за решавање заземјувачи

<http://pees.feit.ukim.edu.mk/predmeti/zs/zazem.zip>



MT (ПЕЕС)

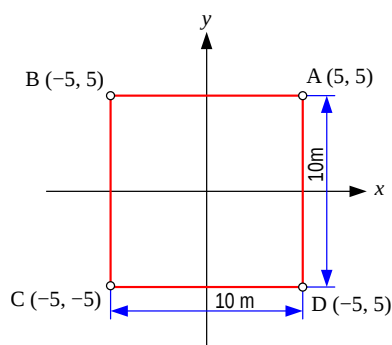
33С

Скопје, 2017

44 / 52

Задачи

Задача 1. Да се формира матрицата \mathbf{r} на заземјувач во форма на квадрат со страница $a = 10 \text{ m}$, поставен на длабочина $h = 0,5 \text{ m}$ во хомогена спроводна средина со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega \text{ m}$. Заземјувачот е изведен од бакарно јаже со пресек 50 mm^2 и пречник $d = 9 \text{ mm}$. Колкава ќе биде отпорноста на распространување на заземјувачот во наведените услови? Колкави струи се одведуваат во земјата од секоја одделна страна на квадратот?



MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

45 / 52

Задачи

Задача 2. Да се повторат пресметките од задачата 1 за случајот кога заземјувачот е изведен од бакарно јаже со пресек 70 mm^2 и пречник $d = 11 \text{ mm}$. За колку проценти е намалена отпорноста на распростирање во овој случај?

Задача 3. Да се повторат пресметките од задачата 1 за случајот кога заземјувачот е поставен на длабочина $h = 1 \text{ m}$. За колку проценти е намалена отпорноста на распростирање во овој случај?

Задача 4. Да се одреди зависноста на отпорот на распростирање од должината на страната a на заземјувачот од задачата 1. Зависноста да се нацрта за вредности на a од множеството $\{5, 10, 15 \text{ и } 20 \text{ m}\}$.

Задача 5. Да се повторат пресметките од задачата 1 за случајот кога заземјувачот е изведен во форма на правоаголник со димензии на страните од $12,5 \text{ m}$ и 8 m (повторно опфаќа површина од 100 m^2). Што се случува со отпорноста на распростирање и струите на одведување од елементите на заземјувачот?

← □ ▶ ↻ 🔍

МТ (ПЕЕС)

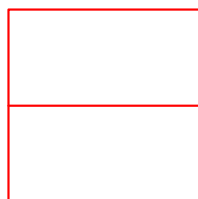
ЗЗС

Скопје, 2017

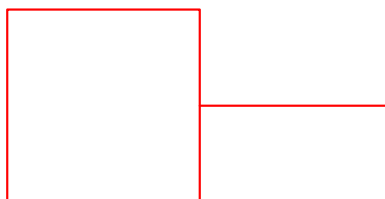
46 / 52

Задачи

Задача 6. За подобрување на карактеристиките на заземјувачот од задачата 1 е предложено да се стави уште една дополнителна електрода со должина од 10 m како на сликата. Да се испита која од двете варијанти е подобра во поглед на отпорноста на распростирање и струите на одведување од неговите елементите.



а)



б)

← □ ▶ ↻ 🔍

МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017

47 / 52

Пример 8

Заземјувач со должина $l = 10 \text{ m}$, изработен од бакарно јаже со пречник $d = 9 \text{ mm}$ се наоѓа во неограничена средина со $\rho = 100 \Omega \text{m}$. Струјата на одведување е $I_Z = 10 \text{ A}$. Да се пресмета R_Z и распределбата на потенцијалите во околината заземјувачот. Колкава ќе биде отпорноста R'_Z ако се зголеми пречникот на заземјувачот на вредност $d' = 200 \text{ mm}$?

$$R_Z = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{2l}{d} = \frac{100}{2\pi \cdot 10} \cdot \ln \frac{2 \cdot 10}{0,009} = 12,265 \Omega.$$

$$U_Z = R_Z \cdot I_Z = 12,265 \cdot 10 = 122,65 \text{ V}.$$

Еквипотенцијалните линии се геометриско место на точки за кои важи

$$\varphi = \frac{\rho \cdot I_Z}{4\pi l} \cdot \ln \frac{R_1 + R_2 + l}{R_1 + R_2 - l} = \text{const} \quad \Leftarrow \quad \text{елипса}$$

$$R_1 + R_2 = \frac{K+1}{K-1} \cdot l = \text{const.};$$

$$K = \exp \left(\frac{4\pi l \cdot \varphi}{\rho \cdot I_Z} \right).$$

← □ ▶ ↻ 🔍

МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017

48 / 52

Пример 8

Фокусите на елипсата се $(-c, 0)$ и $(c, 0)$ каде што $c = l/2$

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1,$$

$$R_1 + R_2 = 2a,$$
$$b^2 = a^2 - c^2.$$

$$a = \frac{K+1}{K-1} \cdot \frac{l}{2},$$
$$b = \frac{2\sqrt{K}}{K-1} \cdot \frac{l}{2}.$$

Равенка на елипсата

$$x = a \cdot \cos \alpha,$$
$$y = b \cdot \sin \alpha, \quad 0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$$

МТ (ПЕЕС)

33С

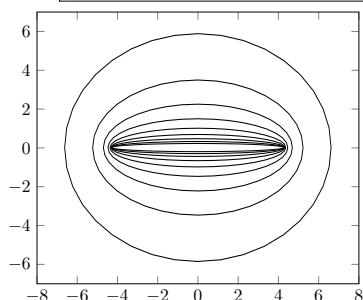
Скопје, 2017

49 / 52

Пример 8

../programi/primeri/primer_1.m

```
1 l = 10; rho = 100; Iz = 10; Uz = 122.65;
2 figure; axis equal; hold on
3 for fi = 10:5:50
4     K = exp(4*pi*l*(fi/100*Uz)/(rho*Iz));
5     a = (K + 1)/(K - 1)*l/2;
6     b = 2*sqrt(K)/(K - 1)*l/2;
7     alfa = (0:10:360)/180*pi;
8     x = a*cos(alfa);
9     y = b*sin(alfa);
10    plot(x,y,'-k');
11 end
12 xlim([-8 8]); ylim([-7 7]);
```



густината на екивпотенцијалните линии е најголема во непосредна близина околу заземјувачот

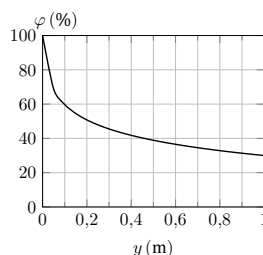
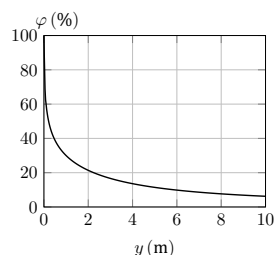
МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

50 / 52

Пример 8



- На растојание $y = 0, 1$ m од заземјувачот φ паѓа на 60% од U_Z . Тоа значи дека 40% од отпорот со кој земјиштето се спротивставува на одведувањето на струјата отпаѓа на првите 10 cm околу заземјувачот.
- Ако го зголемиме пречникот на заземјувачот на вредноста $d' = 20$ cm, тогаш φ на заземјувачот ќе биде $\varphi = 0, 6 \cdot U_Z$, без да дојде до промена на струјата и промена на потенцијалите во преостанатиот околен простор.
- Со таквото зголемување на пречникот сме совладале 40% од отпорот со кој плото се спротивставува на течењето на струјата, т.е. сме ја намалиле отпорноста на распространување на заземјувачот за 40%.

МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

51 / 52

Пример 8

$$R'_Z = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{2l}{d'} = \frac{100}{2\pi \cdot 10} \cdot \ln \frac{2 \cdot 10}{0,2} = 7,329 \Omega \approx 0,6 \cdot R_Z.$$

- Намалувањето на отпорноста на заземјувачите со зголемување на нивниот пречник е скап и непрактичен. Но од оваа анализа произлегува еден многу важен заклучок.
- За намалување на R_Z многу важен фактор е квалитетот на земјиштето во околината на заземјувачот, особено во првите десетина см околу електродите.
- За намалување на R_Z се применуваат материјали со ниско ρ : бентонит со $\rho = 3 \div 8 \Omega\text{m}$ или ситна просеана хумусна земја или глина со слој од најмалку 10 см.

Заземјувачи и заземјувачки системи во електроенергетските мрежи

Решавање на спрегнати заземјувачи

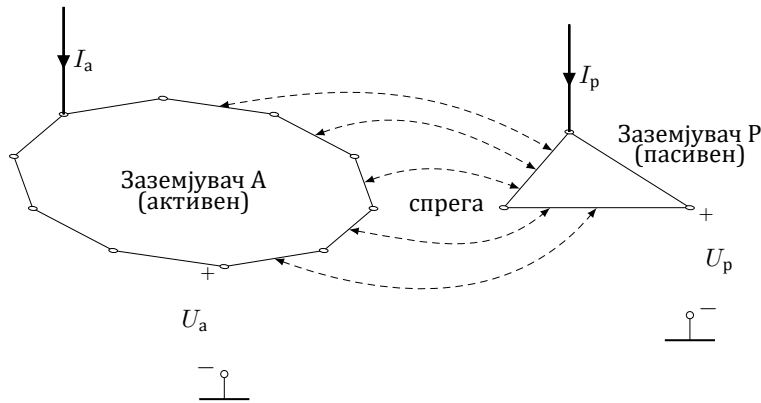
М. Тодоровски

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

Активен и пасивен заземјувач



$$U_p = Z_{ek} \cdot I_p \quad (Z_{ek} = R_{Zp}, Z_{ek} = \infty)$$

Равенки за спрегнати заземјувачи

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{aa} & r_{ap} \\ r_{pa} & r_{pp} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_p \end{bmatrix}$$

$$U_a = \mathbf{E}_a \cdot U_a,$$

$$U_p = \mathbf{E}_p \cdot U_p,$$

U_a и U_p се напоните на заземјувачите, \mathbf{E}_a и \mathbf{E}_p се колони со n_a односно n_p единици

$$I_a = (\mathbf{E}_a)^T \cdot \mathbf{I}_a$$

$$U_p = -Z_{ek} \cdot I_p = -I_p / Y_{ek},$$

$$Y_{ek} \cdot U_p + I_p = 0,$$

$$Y_{ek} \cdot U_p + (\mathbf{E}_p)^T \cdot \mathbf{I}_p = 0.$$

Равенки за спрегнати заземјувачи

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_a \cdot U_a \\ \mathbf{E}_p \cdot U_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{aa} & r_{ap} \\ r_{pa} & r_{pp} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{I}_a \\ \mathbf{I}_p \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_a \cdot U_a \\ \mathbf{E}_p \cdot U_p \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_{aa} & r_{ap} \\ r_{pa} & r_{pp} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{I}_a \\ \mathbf{I}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{N}_a \\ \mathbf{N}_p \end{bmatrix}$$

\mathbf{N}_a и \mathbf{N}_p се колони со n_a и n_p нули, соодветно

$$\begin{bmatrix} r_{aa} & r_{ap} & -\mathbf{E}_a & \mathbf{N}_a \\ r_{pa} & r_{pp} & \mathbf{N}_p & -\mathbf{E}_p \\ (\mathbf{E}_a)^T & (\mathbf{N}_p)^T & 0 & 0 \\ (\mathbf{N}_a)^T & (\mathbf{E}_p)^T & 0 & Y_{ek} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{I}_a \\ \mathbf{I}_p \\ U_a \\ U_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{N}_a \\ \mathbf{N}_p \\ I_a \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{I}_a \\ \mathbf{I}_p \\ U_a \\ U_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{N}_a \\ \mathbf{N}_p \\ I_a \\ 0 \end{bmatrix},$$

Равенки за спрегнати заземјувачи

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} r_{aa} & r_{ap} & -\mathbf{E}_a & \mathbf{N}_a \\ r_{pa} & r_{pp} & \mathbf{N}_p & -\mathbf{E}_p \\ (\mathbf{E}_a)^T & (\mathbf{N}_p)^T & 0 & 0 \\ (\mathbf{N}_a)^T & (\mathbf{E}_p)^T & 0 & Y_{ek} \end{bmatrix}.$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_a \\ \mathbf{I}_p \\ U_a \\ U_p \end{bmatrix} = \mathbf{C} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{N}_a \\ \mathbf{N}_p \\ I_a \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \mathbf{B}^{-1}$$

$$R_{aa} = \frac{U_a}{I_a} = C_{mm}$$

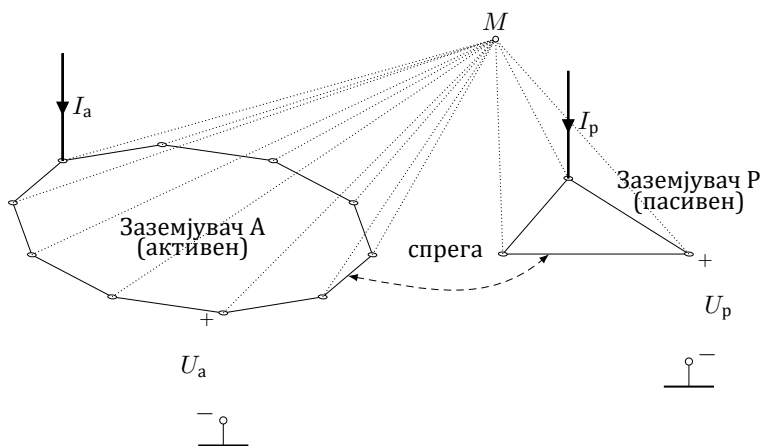
$$R_{ap} = \frac{U_p}{I_a} = C_{m+1,m}$$

$$m = n_a + n_p + 1$$

Матрица \mathbf{B}

$\xleftrightarrow{\hspace{10em} n_a + n_p + 2 \hspace{10em}}$										
$\xleftrightarrow{\hspace{4em} n_a \hspace{4em}}$				$\xleftrightarrow{\hspace{4em} n_p \hspace{4em}}$				$\xleftrightarrow{\hspace{1em} 1 \hspace{1em}}$	$\xleftrightarrow{\hspace{1em} 1 \hspace{1em}}$	
r_{11}	r_{12}	\cdots	r_{1,n_a}	r_{1,n_a+1}	\cdots	r_{1,n_a+n_p}	-1	0		
r_{21}	r_{22}	\cdots	r_{2,n_a}	r_{2,n_a+1}	\cdots	r_{2,n_a+n_p}	-1	0		
\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\vdots		
$r_{n_a,1}$	$r_{n_a,2}$	\cdots	r_{n_a,n_a}	r_{n_a,n_a+1}	\cdots	r_{n_a,n_a+n_p}	-1	0		
$r_{n_a+1,1}$	$r_{n_a+1,2}$	\cdots	r_{n_a+1,n_a+1}	r_{n_a+1,n_a+1}	\cdots	r_{n_a+1,n_a+n_p}	0	-1		
\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\vdots		
$r_{n_a+n_p,1}$	$r_{n_a+n_p,2}$	\cdots	$r_{n_a+n_p,n_a+1}$	$r_{n_a+n_p,n_a+1}$	\cdots	$r_{n_a+n_p,n_a+n_p}$	0	-1		
1	1	\cdots	1	0	\cdots	0	0	0		
0	0	\cdots	0	1	\cdots	1	0	Y_{ek}		

Потенцијал во точка создаден од спрегнати заземјувачи



$$\varphi_M = (\mathbf{r}_{aM})^T \cdot \mathbf{I}_a + (\mathbf{r}_{pM})^T \cdot \mathbf{I}_p.$$

MT (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017 7 / 24

Изведен потенцијал на работниот заземјувач кај ТС СН/НН

- Поради несиметрија во мрежата потенцијалот на неутралниот спроводник не е нула и може да биде неколку десетини волти.
 - ▶ За да се спречи тоа неутралниот спроводник се заземјува во ТС СН/НН (**работен заземјувач**), а и по должината на кабелот со кој се напојуваат потрошувачите.
- Работниот заземјувач, ако е засебен, треба да биде под што е можно помало влијание на заштитниот заземјувач на постројката. Тие два заземјувача да бидат доволно оддалечени еден од друг (ако растојанието е ≥ 20 m се смета дека е се во ред и без проверки).
- Понекогаш работниот и заштитниот заземјувач се изведуваат како еден единствен заземјувач – **здружено заземјување**.

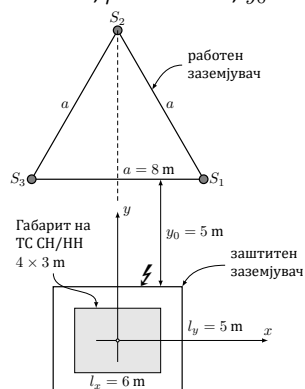
MT (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017 8 / 24

Пример 1

Да се пресмета изведениот потенцијал на работниот заземјувач од заштитниот заземјувач. Заштитниот заземјувач е правоаголник со $l_x \times l_y = 6 \times 5$ m, закопан на $h_{ZZ} = 0,8$ m, додека работниот заземјувач е триаголник со $a = 8$ m, закопан на $h_{RZ} = 0,8$ m и има три сонди со $l_S = 3$ m и $d_S = 63,5$ mm. Спроводниците на заземјувачите се со $d = 22$ mm, $\rho = 300 \Omega\text{m}$, $y_0 = 5$ m, $U_a = 100$ V.



MT (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017 9 / 24

Пример 1

```
../programi/zaz/raboten_zastiten.m
1 function Z = raboten_zastiten()
2 Z.Iz = 1;
3 Z.Yek = 0;
4 Z.rho = 300;
5 A = [ 3 2.5 -0.8]; B = [-3 2.5 -0.8];
6 C = [-3 -2.5 -0.8]; D = [ 3 -2.5 -0.8];
7 Z.L1 = [
8     A B 22
9     B C 22
10    C D 22
11    D A 22
12    ];
13 S1=[4 7.5 -0.8]; S3=[-4 7.5 -0.8]; S2=[0 7.5+4*sqrt(3) -0.8];
14 Z.L2 = [
15    S1 S2      22
16    S2 S3      22
17    S3 S1      22
18    S1 S1-[0 0 3] 63.5
19    S2 S2-[0 0 3] 63.5
20    S3 S3-[0 0 3] 63.5
21    ];
```

Пример 1

```
../programi/zaz/resi_raboten_zastiten.m
1 Z = raboten_zastiten;
2 na = size(Z.L1,1);
3 np = size(Z.L2,1);
4 Z.L = [Z.L1; Z.L2];
5 R = zaz(Z);
6 [Ea,Na,Ep,Np] = ...
7 deal(ones(na,1),zeros(na,1),ones(np,1),zeros(np,1));
8 B = [
9     R      [-Ea; Np] [Na; -Ep]
10    Ea' Np'      0      0
11    Na' Ep'      0      Z.Yek
12    ];
13 rezultat = B^-1 * [Na; Np; 1; 0];
14 rezultat = 100/rezultat(end-1)*rezultat;
15 Ia = rezultat(1:na)
16 Ip = rezultat(na+1:na+np)
17 Ua = rezultat(end-1)
18 Up = rezultat(end)
```

$$\begin{aligned} U_a &= 100 \text{ V}; & U_p &= 19,723 \text{ V} = 19,7\% U_a; \\ I_a &= 4,034 \text{ A}; & I_p &= 0; \\ Z_{aa} &= (U_a/I_a)_{I_p=0} = 24,789 \Omega; & Z_{ap} &= (U_p/I_a)_{I_p=0} = 4,889 \Omega. \end{aligned}$$

Пример 1

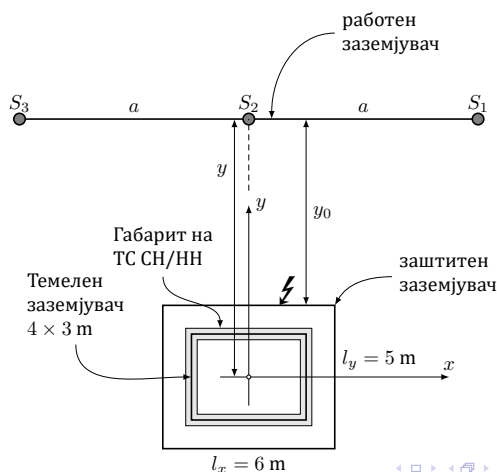
$$Z_{ek} = (5 + j0) \Omega$$

Приближно одговара на случајот кога неутралниот спроводник е заземјен на три столбни места по должината на изводот со заземјувачи чија што отпорност на распространење во просек изнесува $R_S = 15 \Omega$.

$$\begin{aligned} U_a &= 100 \text{ V}; & U_p &= 4,373 \text{ V} = 4,37\% U_a; \\ I_a &= 4,207 \text{ A}; & I_p &= 0; \\ Z_{aa} &= (U_a/I_a)_{I_p=0} = 23,773 \Omega; & Z_{ap} &= (U_p/I_a)_{I_p=0} = 1,040 \Omega. \end{aligned}$$

Задача 1

Да се определи $U_{RZ}(\%) = f(\xi)$, $\xi = y/\sqrt{A}$. Со y е означено растојанието помеѓу тежиштето на заштитниот заземјувач и средината на работниот заземјувач, додека $A = l_x \cdot l_y$. Останатите податоци се дадени во книгата.



МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

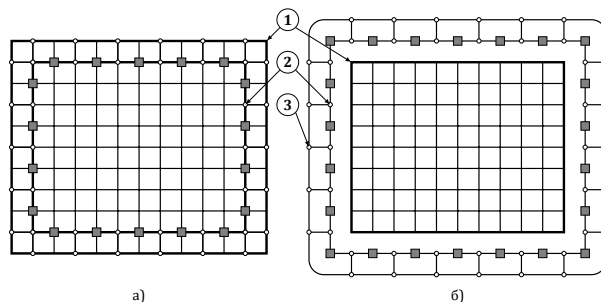
Скопје, 2017

13 / 24

Заземјување на металната ограда на ТС

Постојат две можности при изборот на локацијата и димензиите на металната ограда на една постројка

- оградата се наоѓа во внатрешноста на габаритот опфатен со заштитниот заземјувач на постројката,
- оградата излегува од габаритот опфатен со заштитниот заземјувач.



1) мрежест заземјувач, 2) ограда, 3) заземјувач на оградата

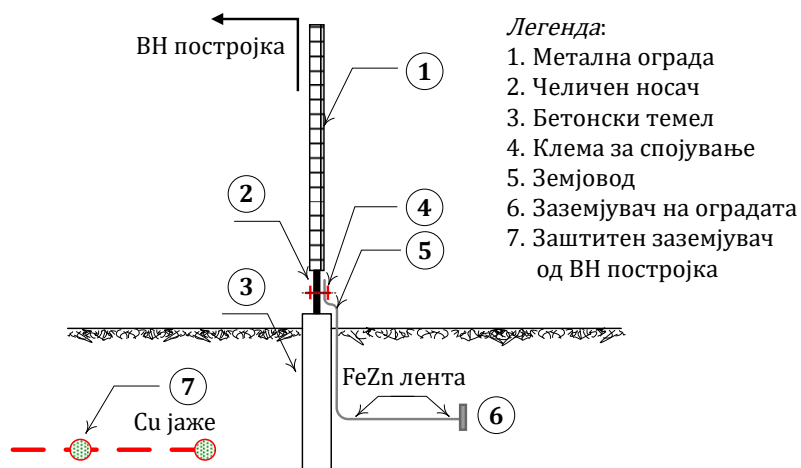
МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017

14 / 24

Заземјување на металната ограда на ТС



МТ (ПЕЕС)

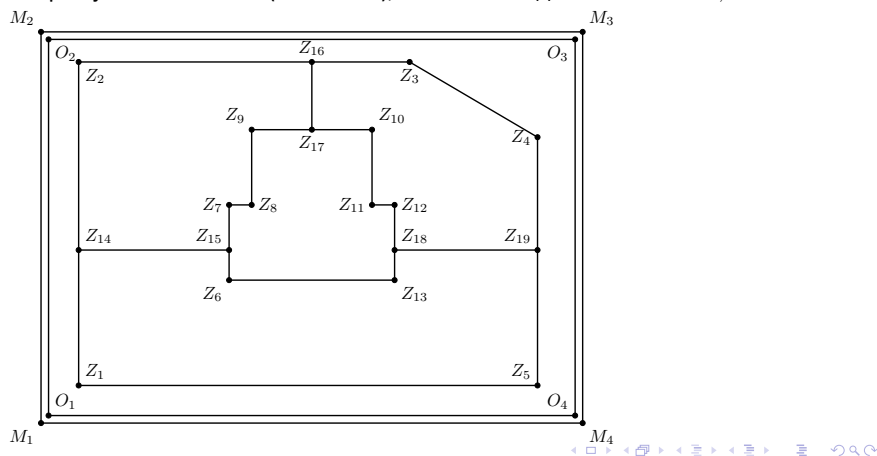
ЗЗС

Скопје, 2017

15 / 24

Задача 2 – ТС 35/10 kV Оморане 2

Со помош на Matlab да се пресмета вредноста на изнесениот потенцијал, во (V) и во (%), што ќе го прими металната ограда од ТС 35/10 kV/kV, чијшто заштитен заземјувач е скициран на сликата. Заштитниот заземјувач е изведен од бакарно јаже Cu 50 mm² ($d = 9$ mm), закопано на длабочина $h = 0,8$ m.



Задача 2 – точки на заземјувачот, резултат

координати изразени во метри		
Z ₁ (4, 4)	Z ₁₀ (43, 38)	Z ₁₉ (65, 22)
Z ₂ (4, 47)	Z ₁₁ (43, 28)	O ₁ (0, 0)
Z ₃ (48, 47)	Z ₁₂ (46, 28)	O ₂ (0, 50)
Z ₄ (65, 37)	Z ₁₃ (46, 18)	O ₃ (70, 50)
Z ₅ (65, 4)	Z ₁₄ (4, 22)	O ₄ (70, 0)
Z ₆ (24, 18)	Z ₁₅ (24, 22)	M ₁ (-1, -1)
Z ₇ (24, 28)	Z ₁₆ (35, 47)	M ₂ (-1, 51)
Z ₈ (27, 28)	Z ₁₇ (35, 38)	M ₃ (71, 51)
Z ₉ (27, 38)	Z ₁₈ (46, 22)	M ₄ (71, -1)

$$\begin{aligned}
 U_a &= 55,3 \text{ V}; & U_p &= 28 \text{ V} = 50,6\% U_a; \\
 I_a &= 20 \text{ A}; & I_p &= 0; \\
 Z_{aa} &= (U_a/I_a)_{I_p=0} = 2,765 \Omega; & Z_{ap} &= (U_p/I_a)_{I_p=0} = 1,4 \Omega.
 \end{aligned}$$

Задача 2 – податоци (1)

../programi/ne_web/omorane.m

```

1 function Z = omorane()
2 Z.Iz = 20;
3 Z.Yek = 0;
4 Z.rho = 250;
5 Z1 = [ 4 4 -0.8];
6 Z2 = [ 4 47 -0.8];
7 Z3 = [48 47 -0.8];
8 Z4 = [65 37 -0.8];
9 Z5 = [65 4 -0.8];
10 Z6 = [24 18 -0.8];
11 Z7 = [24 28 -0.8];
12 Z8 = [27 28 -0.8];
13 Z9 = [27 38 -0.8];
14 Z10 = [43 38 -0.8];
15 Z11 = [43 28 -0.8];
16 Z12 = [46 28 -0.8];
17 Z13 = [46 18 -0.8];
18 Z14 = [ 4 22 -0.8];
19 Z15 = [24 22 -0.8];
20 Z16 = [35 47 -0.8];
21 Z17 = [35 38 -0.8];
22 Z18 = [46 22 -0.8];
23 Z19 = [65 22 -0.8];
24 Z.L1 = [
25     Z1 Z2 9

```


Задача 2 – податоци (2)

```
26 | Z2 Z3 9
27 | Z3 Z4 9
28 | Z4 Z5 9
29 | Z5 Z1 9
30 | Z6 Z7 9
31 | Z7 Z8 9
32 | Z8 Z9 9
33 | Z9 Z10 9
34 | Z10 Z11 9
35 | Z11 Z12 9
36 | Z12 Z13 9
37 | Z13 Z6 9
38 | Z14 Z15 9
39 | Z16 Z17 9
40 | Z18 Z19 9
41 | ];
42 | M1 = [-1 -1 -0.5];
43 | M2 = [-1 51 -0.5];
44 | M3 = [71 51 -0.5];
45 | M4 = [71 -1 -0.5];
46 | Z.L2 = [
47 | M1 M2 22
48 | M2 M3 22
49 | M3 M4 22
50 | M4 M1 22
51 | ];
```

Извоз на потенцијали во станбени објекти

- Каблите со спроводен надворешен плашт (тип IPO) пренесуваат потенцијал на заземјувачите на објекти во близина.
 - ▶ Потенцијалот ќе се пренесе на сите метални делови во објектот бидејќи тие се заземјени.
 - ▶ Ако во објектот е во целост направено „изедначување на потенцијалите“ не постои опасност, без оглед на големината на потенцијалот.
 - ▶ „Изедначување на потенцијалите“ е галванско поврзување на сите метални делови и инсталации и нивно поврзување со заземјувачот.

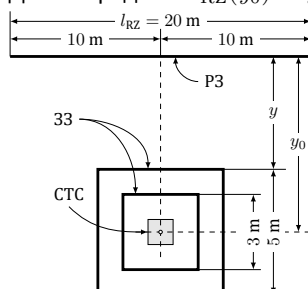
Задача 3

Заштитниот заземјувач на една трансформаторска станица е формиран со помош на две квадратни контури, изведени од поцинкувана челична лента FeZn 30×4 ($d = 22$ mm). Првиот квадрат има страница $a_1 = 3$ m и е закопан на длабочина $h_1 = 0,5$ m, додека вториот е со димензија $a_2 = 5$ m и е закопана на длабочина $h_2 = 1$ m.

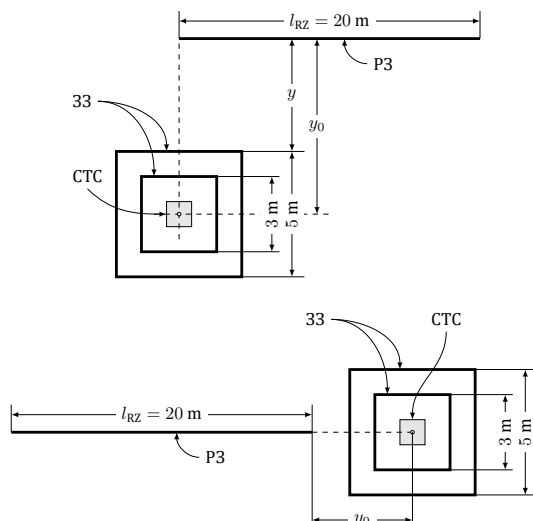
Работниот заземјувач е од поцинкувана челична лента FeZn 30×4 ($d = 22$ mm) со должина $l_{RZ} = 20$ m, закопана на длабочина $h_{RZ} = 0,8$ m.

$\rho = 300 \Omega m$, $I_Z = 40$ A.

Да се определи $U_{RZ}(y_0)$ за y_0 од множеството: 5, 10, 15, 20 и 25 m.



Задача 3



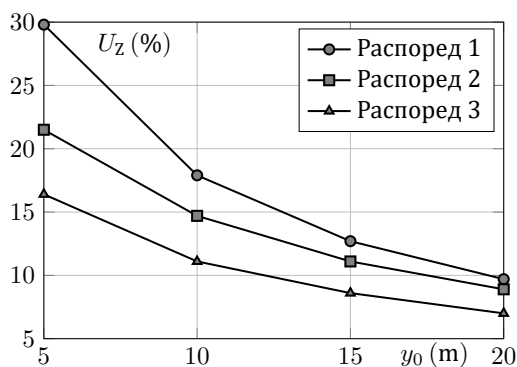
МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017

22 / 24

Задача 3 – решение



МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017

23 / 24

Задача 4

Отпорноста на распространяње на заштитниот заземјувач од столбната трансформаторска станица од задачата 3, пресметана со програма во Matlab изнесува $R_Z = \text{---} \Omega$. Да се пресмета колкава ќе биде таа после поставувањето на челична водоводна цевка со неограничена должина и со надворешен пречник $d_2 = 25,4 \text{ mm}$, на длабочина $h = 0,8 \text{ m}$ и на растојание $\delta = 0,5 \text{ m}$ од работ на надворешниот прстен на заземјувачот.

Напатствие. Проблемот да се реши со помош на програма слична на користената во примерот 4.1. Притоа челичната цевка може да се моделира како пасивен заземјувач составен од два хоризонтални елемента, секој со должина од по 500 m, поставени центрирано во однос на самата столбна ТС, слично како работниот заземјувач во задачата 3 – распоред 1.

МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017

24 / 24

Заземјувачи и заземјувачки системи во електроенергетските мрежи

Типски заземјувачи на надземните водови и нивни карактеристики

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

МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017

1 / 58

Основно за заземјувачите на столбовите

Задачи на заземјувачот на еден столб

- успешно да ја одведе струјата на молњата во земјата кога ќе дојде до директно атмосферско празнење во надземниот вод, без да дојде до појава на повратен прескок и
- во случајот на еднофазна куса врска, струјата да ја спроведе во земјата така што на површината од земјата нема да се појават опасни потенцијали.
- од двете причини заземјувачот треба да има што е можно помала преодна отпорност према земјата.

Основни карактеристики на заземјувачот

- отпорноста на распростирање R_Z за наизменична струја;
- максималната потенцијална разлика на допир $E_{d,max}$;
- максималната потенцијална разлика на чекор $E_{c,max}$;
- импулсната отпорност на распростирање R_i за импулсни струи, каква што е струјата на молњата.

МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017

2 / 58

Технички препораки

- Техничките прописи и препораки се, во принцип, договорни правила на однесување, теориски докажани и практично проверени.
- Водат сметка за техничката сигурност на погонот, условите за безопасност и слично, а водат сметка и за економичноста и рационалноста на применетото техничко решение.
- Му оставаат на проектантот можност за широк избор темелен на проверена традиција, инженерско искуство и на интуицијата.
- Применувајќи ги препораките треба безусловно да бидат задоволени и извесни технички норми со кои се обезбедува сигурност во погонот.

МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017

3 / 58

Правилник за техничките нормативи ...

„Правилник за техничките нормативи за изградба на надземни електроенергетски водови со номинален напон од 1 kV до 400 kV“

- Избор на заземјувачи се темелеше единствено на интуицијата и инженерското искуство на проектантот.
- Отсуствуваше нормирањето на ризикот за испад на надземниот вод под дејство на атмосферските празнења.
- Не се водеше сметка за вредноста на ρ на тлото по должината на трасата од надземниот вод
- Отсуствуваше и било каква оптимизација на цената на чинењето на заземјувачкиот систем.

◀ ▶ ⏪ ⏩ ⏴ ⏵ ⏶ ⏷ ⏸ ⏹ ⏺ ⏻ ⏼ ⏽ ⏾ ⏿ 🔍 ↻

МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017

4 / 58

Избор на заземјувачкиот систем на НВ со оглед на еднофазните куси врски

- Со изборот треба да се постигнат услови за безбедност во поглед на појавата на опасни напони на допир и чекор во непосредната околина на столбот.
- Надземните водови што се во мрежа со заземјена неутрална точка (кај нас при $U_n \geq 110$ kV) мораат да имаат уреди за брзо автоматско исклучување при земјоспој.
- Околу секоја стопа од темелот на столбот треба да се постави 1 или 2 прстена со најмала длабочина на вкопување од 0,5 m.
- Ако се поставува и уште еден дополнителен прстен околу сите 4 стопи на темелот неговата големина и позиција во однос на стопите од темелот треба да биде таква што ќе се постигне поволно обликување на потенцијалот.

◀ ▶ ⏪ ⏩ ⏴ ⏵ ⏶ ⏷ ⏸ ⏹ ⏺ ⏻ ⏼ ⏽ ⏾ ⏿ 🔍 ↻

МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017

5 / 58

Избор на заземјувачкиот систем на НВ со оглед на еднофазните куси врски

- Ако водот е снабден со уреди за брзо автоматско исклучување, тогаш напоните на чекор и допир не се поставуваат како критериум.
- Самата мерка на брзо автоматско исклучување и обликувањето на потенцијалот околу столбот со помош на прстените се сметаат за доволни.
- Ако водот не е снабден со уреди за брзо автоматско исклучување како и во мрежи со незаземјена неутрална точка или заземјена преку придушница треба да се исполни

$$R_Z \leq \frac{U_Z}{I_Z},$$

каде што е $U_Z = 125$ V најголем дозволен напон на столбот, додека I_Z е струја што се одведува во земјата на местото на земјоспојот.

- ▶ Во многу ситуации што се среќаваат на теренот овој услов е премногу тешко да биде исполнет.

◀ ▶ ⏪ ⏩ ⏴ ⏵ ⏶ ⏷ ⏸ ⏹ ⏺ ⏻ ⏼ ⏽ ⏾ ⏿ 🔍 ↻

МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017

6 / 58

Избор на заземјувачкиот систем на НВ со оглед на атмосферските празнења

- При удар на гром во столбот или во заштитното јаже, се јавува опасност од појава на повратен прескок кога под дејство на громот доаѓа се појавува напон што ја надминува импулсната цврстина на изолација (над „поднослив напон“ $U_{\text{подн}}$).
- Задача на заземјувачите е да се спречи или да се намали веројатноста за појава на повратен прескок на изолацијата при удар на гром во столбот или во заштитното јаже.
- Се смета дека повратен прескок не е веројатен ако за големината на отпорноста на распростирање на заземјувањето е исполнето

$$R_Z \leq \frac{U_{\text{подн}}}{I_M}$$

МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017

7 / 58

Распределба на амплитудите на струјата на громот

Ударна струја I_M (кА)	5	10	15	20	30	40	50	60
Веројатност $P(I_M)$ (%)	14	40	62	79	91	95	98	99

- Од табелата следува дека со 95% сигурност можеме да очекуваме дека $I_M \leq 40$ кА.
- За 110 кV водови вообичаено е $U_{\text{подн}} = 496$ кV
- Следува дека ако $R_Z \leq U_{\text{подн}}/I_M = 496/40 = 12,4 \Omega$, тогаш со ризик од само 5% можеме да очекуваме дека при удар на гром во столбот нема да дојде до повратен прескок.

МТ (ПЕЕС)

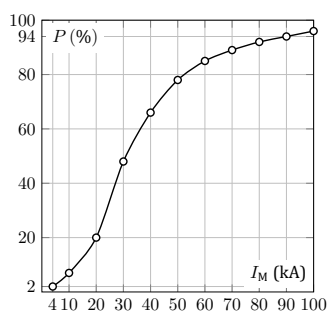
ЗЗС

Скопје, 2017

8 / 58

Распределба на амплитудите на струјата на громот – CIGRE

Струја I_M (кА)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Веројатност (%)	7	20	48	66	78	85	89	92	94	96



Кумулативна веројатност на распределба на струјата на молњата

МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017

9 / 58

Техничка препорака ТП-9

- Металните и армиранобетонските столбови треба да се заземјат, за секој столб посебен заземјувач.
- Столбовите од дрво или од друг изолационен материјал не се заземјуваат, освен во кога имаат заштитно јаже, заштита од удар на гром, одводници на пренапони и слично.
- Металните конзоли на дрвените столбови како и металните основи на линиските разделувачи не се заземјуваат.
- Заземјувачите се положуваат на длабочина од околу 0,7 m. Кај заземјувачите со 2 прстена, првиот прстен се закопува на 0,7 m и на 1 m од столбот, вториот се закопува на 1 m и на 2 m од столбот.
- Заземјувачите се изведуваат со прстени, во форма на ѕвезда со повеќе краци или нивна комбинација.

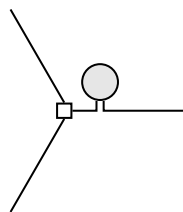
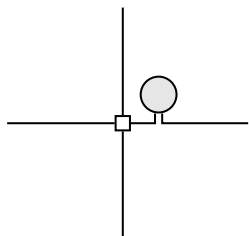
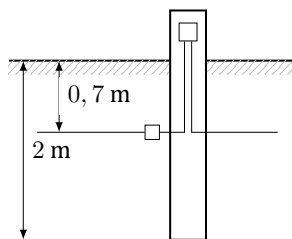
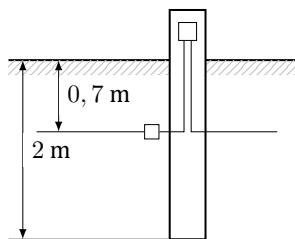
Критериуми за димензионирање на заземјувачите

- Основен критериум е заштитата на водот од повратни прескоци при удари на гром во столбот или во заштитното јаже. Во посебни случаи треба да се задоволи и критериумот за заштита од превисоки напони на допир.
- Се смета дека е постигнато задоволително ниво на заштита од повратни прескоци ако ударната (импулсната) отпорност на заземјување е $R_Z < 15 \Omega$. Ако ова не може да се постигне треба да се засили изолацијата.
- Услови за безбедност од превисоки напони
 - ▶ кај столбови кои се наоѓаат на терени како што се: јавни базени, кампови, детски игралишта и др. без разлика на напонското ниво на водот и начинот на заземјување на неутралната точка;
 - ▶ кај столбови кои се наоѓаат на обработливи површини, покрај прометни патишта и во населени места, кога неутралната точка на мрежата е изолирана;
 - ▶ кај столбови на кои се наоѓаат линиски разделувачи.

Типски заземјувачи на столбовите од НВ

- Зракасти заземјувачи
- Прстенести заземјувачи
- Комбинирани прстенести-зракасти заземјувачи
- Типски заземјувачи на столбовите за висок и највисок напон

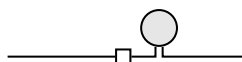
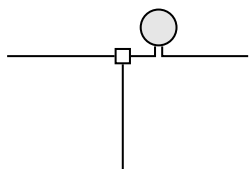
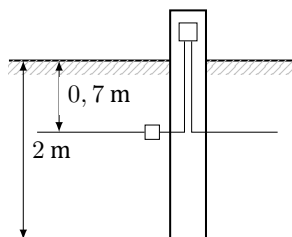
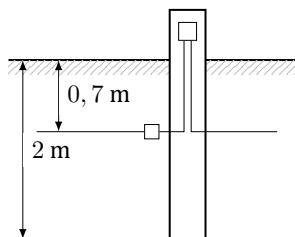
Зракасти заземљувачи



Скица на заземљувач од фамилијата L4

Скица на заземљувач од фамилијата L3

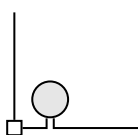
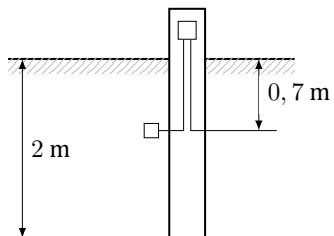
Зракасти заземљувачи



Скица на заземљувач од фамилијата LT3

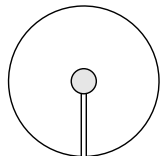
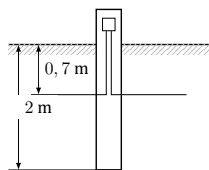
Скица на заземљувач од фамилијата L2

Зракасти заземљувачи

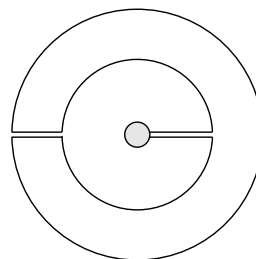
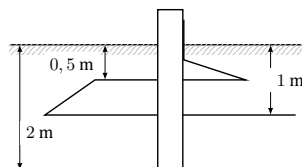


Скица на заземљувач од фамилијата LT2

Прстенести заземљувачи



Скица на заземљувач од фамилијата P1

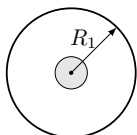


Скица на заземљувач од фамилијата P2

Комбинирани прстенести-зракасти заз.

$$R_1 = \text{const.}$$

$$h_1 = 0,7 \text{ m}$$



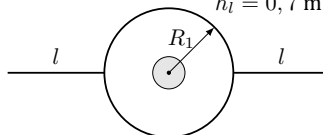
а) Тип K1

$$R_1 = 1,2 \text{ m}$$

$$l = \text{var.}$$

$$h_1 = 0,7 \text{ m}$$

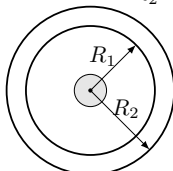
$$h_l = 0,7 \text{ m}$$



б) Тип K1L2

$$R_1 = 1,2 \text{ m } h_1 = 0,5 \text{ m}$$

$$R_2 = \text{var } h_2 = 0,7 \text{ m}$$

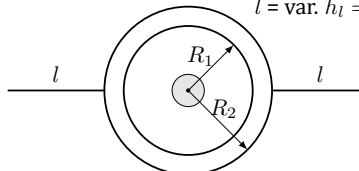


в) Тип K2

$$R_1 = 1,2 \text{ m } h_1 = 0,5 \text{ m}$$

$$R_2 = 2,2 \text{ m } h_2 = 0,7 \text{ m}$$

$$l = \text{var. } h_l = 0,7 \text{ m}$$



г) Тип K2L2

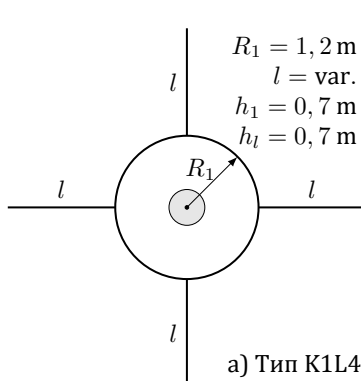
Комбинирани прстенести-зракасти заз.

$$R_1 = 1,2 \text{ m}$$

$$l = \text{var.}$$

$$h_1 = 0,7 \text{ m}$$

$$h_l = 0,7 \text{ m}$$

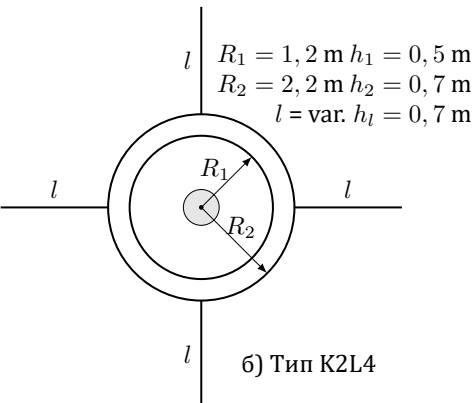


а) Тип K1L4

$$R_1 = 1,2 \text{ m } h_1 = 0,5 \text{ m}$$

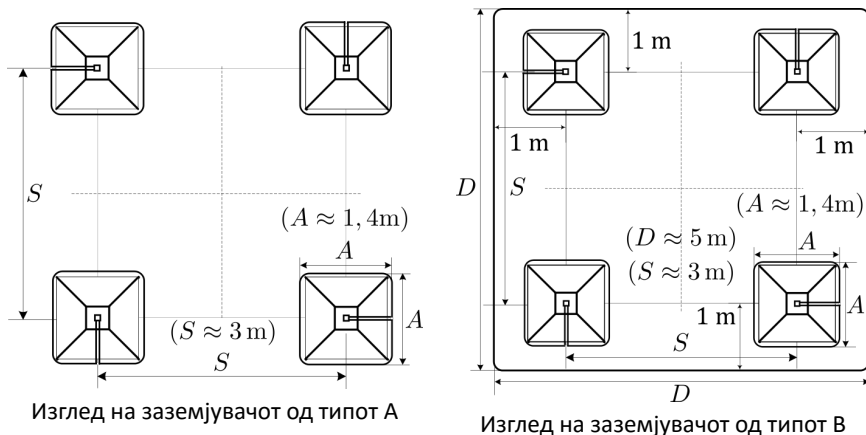
$$R_2 = 2,2 \text{ m } h_2 = 0,7 \text{ m}$$

$$l = \text{var. } h_l = 0,7 \text{ m}$$



б) Тип K2L4

Заземјувачи на столбовите за $U_n \geq 110 \text{ kV}$



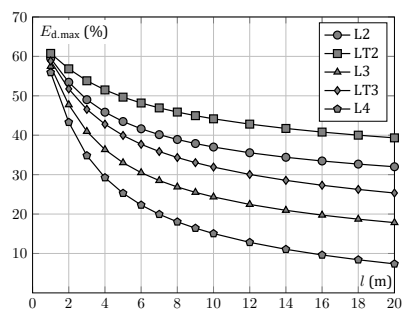
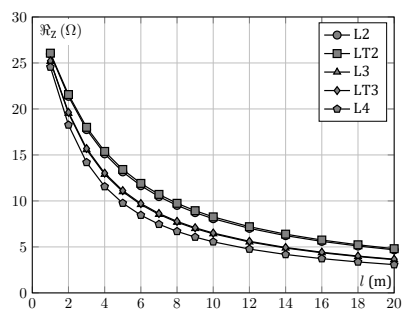
Карактеристики на типските заземјувачи

- Испитувањата на основните карактеристики на типските заземјувачи (R_Z , $E_{d,max}$, $E_{c,max}$, цената на чинење и др.) се вршат на модел со хомогено тло (во случаите на повеќеслојна средина, бројот на комбинациите што можат да се јават е практично неограничен).
- Кај заземјувачите на металните и армирано-бетонските столбови потребно е да се земе предвид и влијанието на темелите на столбовите кои се моделираат со упростени правилни форми.
 - ▶ темелот кај армирано-бетонските столбови може да се замени со соодветен вертикален цевкаст заземјувач
 - ▶ еднблоковиот темел на челично-решеткастите столбови може приближно да се еквивалентира со полутопка со површина еднаква на површината на бочните страни од темелот
- Вршени се пресметки на отпорностите на распространување R_Z на одделните заземјувачи кога тие се поставени во тло со $\rho = 100 \Omega \text{m}$. Пресметките се вршени со помош на компјутерска програмата базирана на моделот од глава 3.

Карактеристики на зракастите заземјувачи

$l \text{ (m)}$	$R_Z \text{ (}\Omega\text{)}$				
	L2	LT2	L3	LT3	L4
1	25,997	26,077	25,191	25,242	24,573
2	21,113	21,311	19,275	19,384	18,031
3	17,589	17,838	15,433	15,557	14,078
4	15,005	15,268	12,811	12,936	11,502
5	13,078	13,338	10,950	11,068	9,724
6	11,596	11,845	9,569	9,679	8,430
7	10,426	10,663	8,507	8,609	7,449
8	9,480	9,703	7,665	7,760	6,680
9	8,699	8,909	6,979	7,070	6,061
10	8,043	8,242	6,416	6,497	5,551
12	7,002	7,180	5,531	5,603	4,761
14	6,212	6,373	4,871	4,935	4,176
16	5,592	5,738	4,359	4,416	3,725
18	5,091	5,224	3,948	4,001	3,366
20	4,677	4,800	3,613	3,661	3,074

Карактеристики на зарастите заземјувачи



MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 22 / 58

Карактеристики на прстенестите заземјувачи

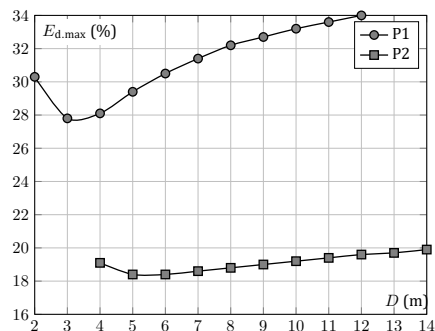
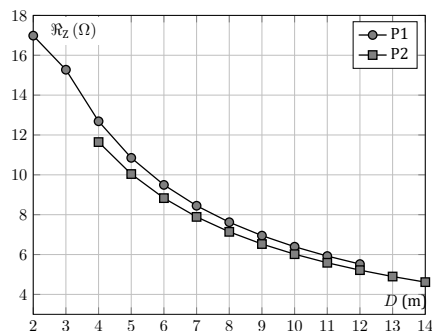
D (m)	тип P1			тип P2		
	R_Z (Ω)	$E_{d,max}$ (%)	$E_{c,max}$ (%)	R_Z (Ω)	$E_{d,max}$ (%)	$E_{c,max}$ (%)
2	16,985	30,3	26,7			
3	15,274	27,8	24,3			
4	12,687	28,1	22,4	11,644	19,1	19,3
5	10,852	29,4	22,6	10,040	18,4	18,4
6	9,494	30,5	22,8	8,831	18,4	18,4
7	8,449	31,4	23,1	7,890	18,6	18,3
8	7,622	32,2	23,3	7,140	18,8	18,3
9	6,950	32,7	23,5	6,528	19,0	18,3
10	6,393	33,2	23,7	6,018	19,2	18,3
11	5,924	33,6	23,8	5,587	19,4	18,4
12	5,522	34,0	24,0	5,217	19,6	18,4
13				4,897	19,7	18,5
14				4,616	19,9	18,5

MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 23 / 58

Карактеристики на прстенестите заземјувачи



MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 24 / 58

Карактер. на комбинираните заземјувачи

заземјувач тип K1				заземјувач тип K1L2 × l			
R_1 (m)	\Re_Z (Ω)	$E_{d,max}$ (%)	$E_{c,max}$ (%)	l (m)	\Re_Z (Ω)	$E_{d,max}$ (%)	$E_{c,max}$ (%)
1,2	15,57	28,7	28,4	2	13,43	24,0	27,0
1,4	14,77	25,1	26,3	3	12,10	22,5	26,1
1,6	13,72	23,6	24,9	4	10,96	21,6	25,3
1,8	12,80	23,3	23,8	5	10,00	20,9	24,6
2,0	11,98	23,6	22,9	6	9,19	20,2	24,0
2,2	11,23	24,0	22,6	7	8,49	19,7	23,5
2,4	10,60	24,5	22,6	8	7,90	19,3	23,0
2,6	10,03	25,0	22,6	9	7,38	18,9	22,6
2,8	9,52	25,4	22,6	10	6,93	18,5	22,2
3,0	9,06	25,8	22,7				

Карактер. на комбинираните заземјувачи

заземјувач тип K1L4 × L			
l (m)	\Re_Z (Ω)	$E_{d,max}$ (%)	$E_{c,max}$ (%)
2	11,81	20,0	23,6
3	10,09	17,4	21,1
4	8,77	15,6	19,3
5	7,76	14,3	17,9
6	6,95	13,2	16,7
7	6,30	12,3	15,8
8	5,76	11,6	15,0
9	5,31	11,0	14,3
10	4,92	10,4	13,8

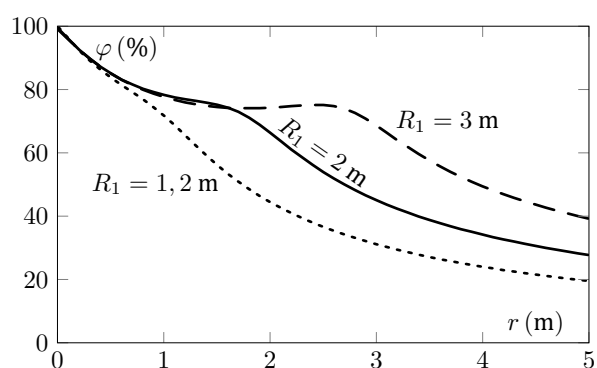
Карактер. на комбинираните заземјувачи

заземјувач тип K2				заземјувач тип K2L2 × l			
R_2 (m)	\Re_Z (Ω)	$E_{d,max}$ (%)	$E_{c,max}$ (%)	l (m)	\Re_Z (Ω)	$E_{d,max}$ (%)	$E_{c,max}$ (%)
2,2	10,50	14,4	20,4	2	9,49	12,9	19,8
2,7	9,18	14,1	18,1	3	8,88	12,4	19,3
3,2	8,16	14,3	16,8	4	8,30	12,0	18,9
3,7	7,34	14,5	16,0	5	7,78	11,6	18,6
4,2	6,68	14,7	15,9	6	7,31	11,3	18,2
4,7	6,14	14,9	15,8	7	6,88	11,0	17,9
5,2	5,68	15,0	15,8	8	6,50	10,8	17,6
5,7	5,29	15,2	15,8	9	6,16	10,6	17,3
6,2	4,96	15,3	15,8	10	5,86	10,4	17,1
6,7	4,66	15,5	15,9				

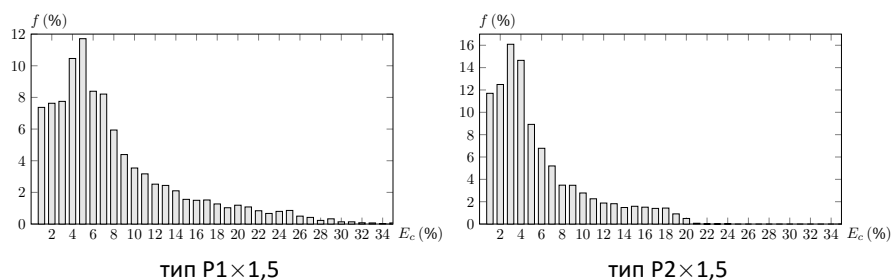
Карактер. на комбинираните заземјувачи

заземјувач тип K2L4 × L			
l (m)	R_Z (Ω)	$E_{d,max}$ (%)	$E_{c,max}$ (%)
2	8,71	11,6	18,1
3	7,81	10,7	16,8
4	7,04	9,3	15,6
5	6,39	9,3	14,7
6	5,85	8,8	13,9
7	5,39	8,3	13,3
8	5,00	8,0	12,7
9	4,66	7,6	12,2
10	4,36	7,2	11,8

Карактер. на комбинираните заземјувачи



Фреквентни хистограми



Карактер. на заземјувачи за 110 kV столбови

број	тип	$R_Z(\Omega)$	$I_L(\%)$	$I_S(\%)$	$L_\Sigma(\text{m})$	$Q(\text{m}^3)$	$C(\text{€})$
1	A	6,50	/	100,0	/	/	115
2	A210	4,86	42,2	57,8	24,40	6,85	200
3	A215	4,11	54,6	45,4	34,40	10,05	285
4	A220	3,54	62,8	37,2	44,40	13,25	370
5	A225	3,11	68,6	31,4	54,40	16,45	455
6	A230	2,78	72,8	27,2	64,40	19,65	540
7	A235	2,51	76,2	23,8	74,40	22,85	625
8	A240	2,29	78,8	21,2	84,40	26,05	710
9	A405	5,35	39,8	60,2	28,80	7,30	220
10	A410	4,04	64,0	36,0	48,80	13,70	390
11	A415	3,20	75,8	24,2	68,80	20,10	560
12	A420	2,63	82,4	17,6	88,80	26,50	730
13	A425	2,24	86,6	13,4	108,80	32,90	900
14	A430	1,95	89,4	10,6	128,80	39,30	1070
15	A435	1,73	91,2	8,8	148,80	45,70	1235
16	A440	1,56	92,6	7,4	168,80	52,10	1405

Карактер. на заземјувачи за 110 kV столбови

број	тип	$R_Z(\Omega)$	$I_L(\%)$	$I_S(\%)$	$L_\Sigma(\text{m})$	$Q(\text{m}^3)$	$C(\text{€})$
1	B	5,97	/	70,8	32	10,2	200
2	B210	4,70	38,6	44,8	56	17,3	285
3	B215	4,01	51,4	35,6	66	20,5	370
4	B220	3,47	60,2	29,2	76	23,7	455
5	B225	3,06	66,2	24,2	86	26,9	540
6	B230	2,74	70,8	21,6	96	30,1	625
7	B235	2,48	74,4	18,8	106	33,4	710
8	B240	2,26	77,0	16,6	116	36,5	795
9	B405	5,19	34,6	48,4	60	18,6	310
10	B410	3,99	60,8	29,8	80	25,0	480
11	B415	3,18	73,6	20,4	100	31,4	650
12	B420	2,62	81,0	14,8	120	37,8	820
13	B425	2,24	85,4	11,0	140	44,2	990
14	B430	1,95	88,6	8,5	160	50,6	1160
15	B435	1,73	90,6	7,2	180	57,0	1325
16	B440	1,56	92,2	6,2	200	63,4	1600

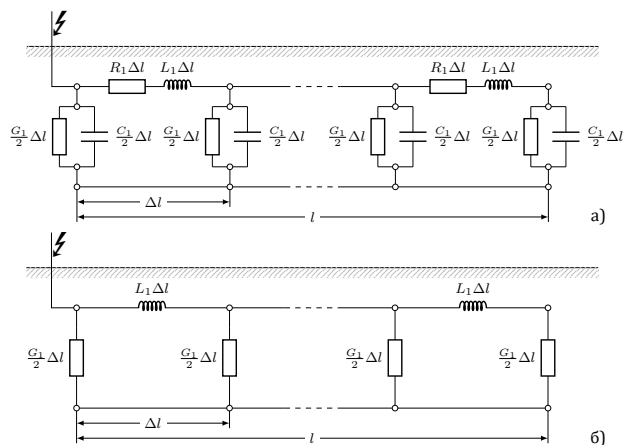
Ударна отпорност на заземјувачите

- Првенствена задача на заземјувачите од столбовите на надземните водови е заштита од атмосферските пренапони. Затоа мерка за перформансите на ваквите заземјувачи е нивната импулсна (ударна) отпорност R_i .
- R_i се дефинира како однос помеѓу максимумот на импулсниот напон U_m и максимумот на импулсната струја I_m .
- R_i е пропорционална на R_Z

$$R_i = \alpha \cdot R_Z.$$

- Факторот на α се нарекува импулсен коефициент, има поголеми вредности кај подолгите заземјувачи и поголемите специфични отпорности на тлото.

Импулсни коеф. на хоризонтални заземјувачи



$$Z_C = 60 \cdot \ln \frac{2l}{d} (\Omega),$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r\mu_r}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_r\mu_r}}, \quad v_0 = 3 \cdot 10^8 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right),$$

MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

34 / 58

Импулсни коеф. на хоризонтални заземјувачи

$$L_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{2l}{d}, \quad \left(\frac{\text{H}}{\text{m}}\right), \quad C_1 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln \frac{2l}{d}}, \quad \left(\frac{\text{F}}{\text{m}}\right), \quad G_1 = \frac{\pi}{\rho \ln \frac{l}{\sqrt{d \cdot h}}}, \quad \left(\frac{\text{S}}{\text{m}}\right).$$

активна должина на заземјувачот

$$l_a = \sqrt{\frac{T_c}{G_1 \cdot L_1}}. \quad (\text{m})$$

$$R_i = \begin{cases} \frac{1}{G_1 \cdot l} & \text{за } T_c > 1,49 \cdot G_1 \cdot l^2, \\ \frac{1,21}{\sqrt{G_1 \cdot T_c}} & \text{за } T_c \leq 1,49 \cdot G_1 \cdot l^2, \end{cases}$$

MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

35 / 58

Пример 1

Лента FeZn 30x4 со должина $l = 10 \text{ m}$ е закопана на длабочина $h = 0,7 \text{ m}$ во тло со $\rho = 100 \Omega\text{m}$. Да се пресмета R_Z и R_i за случајот кога струјниот импулс на громот има облик $1,2/50$ и $I_M = 25 \text{ kA}$. Колкав е импулсниот коефициент α на заземјувачот. Колкава ќе биде амплитудата на напонот на заземјувачот U_M . Пресметките да се повторат и за случајот кога е $l = 20 \text{ m}$.

$$R_Z = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{h \cdot d}} = \frac{100}{\pi \cdot 10} \cdot \ln \frac{10}{\sqrt{0,7 \cdot 0,02165}} = 14 \Omega,$$

$$G_1 = \frac{1}{R_Z \cdot l} = \frac{1}{14 \cdot 10} = 0,007144 \frac{\text{S}}{\text{m}},$$

$$L_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{2l}{d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \ln \frac{2 \cdot 10}{21,65 \cdot 10^{-3}} = 1,366 \frac{\text{H}}{\text{m}}.$$

$$l_a = \sqrt{\frac{T_c}{G_1 \cdot L_1}} = \sqrt{\frac{1,2}{0,007144 \cdot 1,366}} = 11,09 \text{ m} \approx l.$$

$$R_i = \frac{1}{G_1 \cdot l} = R_Z = 14 \Omega.$$

$$U_M = R_i \cdot I_M = 14 \cdot 25 = 350 \text{ kV}.$$

MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

36 / 58

Пример 1

Случај со $l = 20$ m

$$R_Z = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{h \cdot d}} = \frac{100}{\pi \cdot 20} \cdot \ln \frac{20}{\sqrt{0,7 \cdot 0,02165}} = 8,1 \Omega.$$

$$G_1 = \frac{1}{R_Z \cdot l} = \frac{1}{8,1 \cdot 20} = 0,006171 \frac{\text{S}}{\text{m}}$$

$$L_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{2l}{d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \ln \frac{2 \cdot 20}{21,65 \cdot 10^{-3}} = 1,504 \frac{\text{H}}{\text{m}}$$

$$l_a = \sqrt{\frac{T_c}{G_1 \cdot L_1}} = \sqrt{\frac{1,2}{0,006171 \cdot 1,504}} = 11,37 \text{ m} < l.$$

$$R_i = \frac{1,21}{\sqrt{G_1 \cdot T_c}} = \frac{1,21}{\sqrt{0,006171 \cdot 1,2}} = 14 \Omega \approx 1,75 \cdot R_Z.$$

$$U_M = R_i \cdot I_M = 14 \cdot 25 = 350 \text{ kV},$$

MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

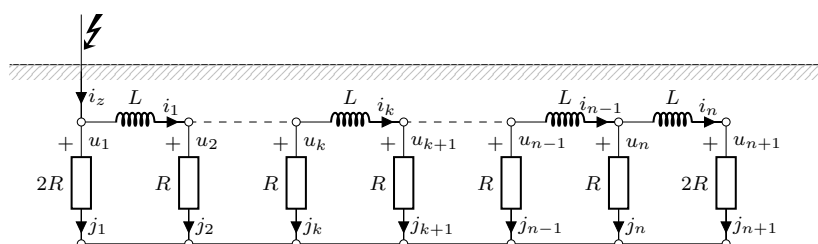
37 / 58

Пример 2

За случајот со $l = 20$ m од примерот 1 да се изврши компјутерска симулација на простирањето на бранот по лентата. При тоа, лентата да се подели на $n = 40$ делови, секој со должина од 0,5 m. Параметрите на еквивалентната шема се

$$R = \frac{1}{G_1 \cdot l/n} = \frac{1}{0,006171 \cdot 20/40} = 324,1 \Omega;$$

$$L = L_1 \cdot l/n = 1,504 \cdot 20/40 = 0,752 \text{ H}.$$



MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

38 / 58

Пример 2 – струен импулс

$$i_z(t) = \frac{I_m}{k} \cdot (e^{-at} - e^{-bt}),$$

$$k = \left(\frac{a}{b}\right) \frac{-a}{a-b} - \left(\frac{a}{b}\right) \frac{-b}{a-b}.$$

$$a = \frac{0,69}{T_g}, \quad b = \frac{3,24}{T_c}.$$

../programi/impuls/impuls.m

```
1 function i = impuls(t,Im,Tc,Tg)
2 a = 0.69/Tg; b = 3.24/Tc;
3 k = (a/b)^(-a/(a-b)) - (a/b)^(-b/(a-b));
4 i = Im/k*(exp(-a*t) - exp(-b*t));
```

MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

39 / 58

Пример 2 – диф. равенки во Matlab

$$\frac{dx_1}{dt} = 2 \cdot x_1 - 0,001 \cdot x_1 \cdot x_2,$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -10 \cdot x_2 + 0,002 \cdot x_1 \cdot x_2,$$

со почетни услови $x_1(0) = 5000$ и $x_2(0) = 100$.

```

../programi/impuls/izvodi.m
1 function dx = izvodi(t,x)
2 dx(1,1) = 2*x(1) - 0.001*x(1)*x(2);
3 dx(2,1) = -10*x(2) + 0.002*x(1)*x(2);
    
```

```

../programi/impuls/dif_rav.m
1 [t, x] = ode23t('izvodi',[0 5],[5000 100]);
2 plot(t,x);
3 xmax = max(x)
    
```

```

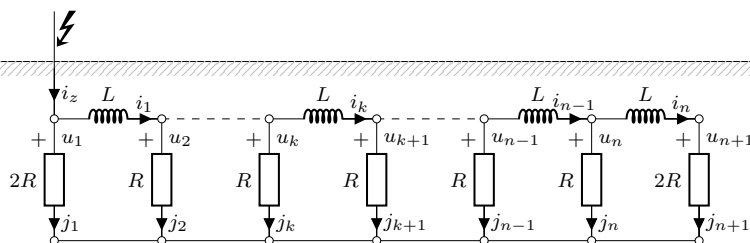
>> dif_rav
xmax =
1.0e+04 *
1.0946  0.9062
    
```

MT (ПЕЕС)

33C

Скопје, 2017 40 / 58

Пример 2 – диф. равенки за вод



$$L \frac{di_k}{dt} = u_k - u_{k+1}, \quad k = 1, 2, \dots, n,$$

$$u_k = \begin{cases} 2R \cdot j_1 & k = 1, \\ R \cdot j_k & 2 \leq k \leq n, \\ 2R \cdot j_{n+1} & k = n + 1. \end{cases}$$

$$j_k = \begin{cases} i_z - i_1 & k = 1, \\ i_{k-1} - i_k & 2 \leq k \leq n, \\ i_n & k = n + 1. \end{cases}$$

MT (ПЕЕС)

33C

Скопје, 2017 41 / 58

Пример 2 – диф. равенки за вод

$$u_1 - u_2 = 2R \cdot j_1 - R \cdot j_2 = 2R \cdot (i_z - i_1) - R \cdot (i_1 - i_2) = R \cdot (2i_z - 3i_1 + i_2),$$

$$u_k - u_{k+1} = R \cdot j_k - R \cdot j_{k+1} = R \cdot (i_{k-1} - i_k) - R \cdot (i_k - i_{k+1}) = R \cdot (i_{k-1} - 2i_k + i_{k+1}), \quad 2 \leq k \leq n - 1,$$

$$u_n - u_{n+1} = R \cdot j_n - 2R \cdot j_{n+1} = R \cdot (i_{n-1} - i_n) - 2R \cdot i_n = R \cdot (i_{n-1} - 3i_n),$$

$$\frac{di_k}{dt} = \begin{cases} R/L \cdot (2i_z - 3i_1 + i_2) & k = 1, \\ R/L \cdot (i_{k-1} - 2i_k + i_{k+1}) & 2 \leq k \leq n, \\ R/L \cdot (i_{n-1} - 3i_n) & k = n + 1. \end{cases}$$

```

../programi/impuls/izvodi_vod.m
1 function di = izvodi_vod(t,i,R,L,Im,Tc,Tg)
2 n = length(i);
3 di(1,1) = R/L * (2*impuls(t,Im,Tc,Tg) - 3*i(1) + i(2));
4 for k = 2:n-1
5     di(k,1) = R/L * (i(k-1) - 2*i(k) + i(k+1));
6 end
7 di(n,1) = R/L * (i(n-1) - 3*i(n));
    
```

MT (ПЕЕС)

33C

Скопје, 2017 42 / 58

Пример 2 – решение

```

./programi/impuls/lenta_impuls.m
1 function [t,i,j,u] = lenta_impuls(rho,h,l,Im,Tc,Tg,tmax)
2 d = 2*(30+4)/1000/pi;
3 Rz = rho/(pi*l) * log(l/sqrt(d*h))
4 G1 = 1/(Rz*l);
5 L1 = 2e-7*log(2*l/d);
6 n = l/0.5;
7 R = 1/(G1*l/n);
8 L = L1*l/n;
9 f = @(t,i) izvodi_vod(t,i,R,L,Im,Tc,Tg);
10 [t, i] = ode23t(f,[0 tmax],zeros(n,1));
11 j(:,1) = impuls(t,Im,Tc,Tg) - i(:,1);
12 for k = 2:n
13     j(:,k) = i(:,k-1) - i(:,k);
14 end
15 j(:,n+1) = i(:,n);
16 u = R*j;
17 u(:,1 n+1]) = 2*u(:,[1 n+1]);
18 Ri = max(u(:,1))/Im
19 alfa = Ri/Rz

```

```

>> [t,i,j,u] = lenta_impuls(100,0.7,20,25,1.2e-6,50e-6,5e-6);
Rz =
    8.1019
Ri =
   16.0341
alfa =
    1.9791

```

MT (PEEC)

33C

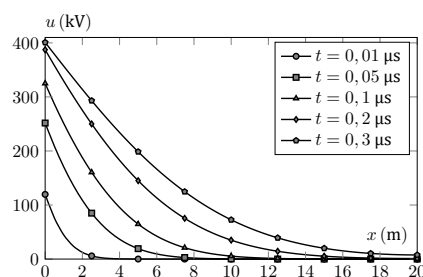
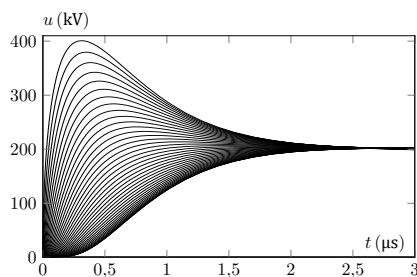
Скопје, 2017 43 / 58

Пример 2 – графици

```

./programi/impuls/lenta_impuls_crtaj.m
1 [t,i,j,u] = lenta_impuls(100,0.7,20,25,1.2e-6,50e-6,10e-6);
2 plot(t,u); xlim([0 3e-6]); ylim([0 450])
3 t1 = [0.01 0.05 0.1 0.2 0.3]*1e-6;
4 k = [];
5 for m = 1:length(t1)
6     k = [k find(t > t1(m), 1)];
7 end
8 figure; plot(linspace(0,20,41),u(k,:))

```



MT (PEEC)

33C

Скопје, 2017 44 / 58

Пример 3

Заземјувач во форма на трикрака ѕвезда, составен од три поцинкувани челични ленти FeZn 30×4, секоја со должина $l = 20$ m, е закопан на длабочина $h = 0,7$ m во хомогено тло со $\rho = 200 \Omega\text{m}$. Да се пресмета R_Z и R_i ако $T_c = 1,2 \mu\text{s}$.

$$R_{1l} = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{h \cdot d}} = \frac{200}{\pi \cdot 20} \cdot \ln \frac{20}{\sqrt{0,7 \cdot 0,022}} = 16,204 \Omega.$$

$$R_Z = \frac{\rho}{2\pi L_\Sigma} \cdot \left(\ln \frac{L_\Sigma^2}{d \cdot h} + A_k \right); \quad L_\Sigma = n \cdot l = 3 \cdot 20 = 60 \text{ m}; \quad A_k = 0,87;$$

$$R_Z = \frac{200}{2\pi \cdot 60} \cdot \left(\ln \frac{60^2}{0,022 \cdot 0,7} + 0,87 \right) = 7,028 \Omega.$$

$$R_Z = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{R_{1l}}{n}, \quad \eta = \frac{R_{1l}}{n \cdot R_Z} = \frac{16,204}{3 \cdot 7,028} = 0,768.$$

$$G_1 = 0,00386 \text{ S/m}; \quad L_1 = 1,562 \mu\text{H/km}; \quad l_a = 15,8 \text{ m} < l;$$

$$R_{1i} = \frac{1,21}{\sqrt{G_1 \cdot T_c}} = \frac{1,21}{\sqrt{0,00386 \cdot 1,2}} = 19,885 \Omega \approx 1,23 \cdot R_{1l} \Rightarrow \alpha_1 = 1,23.$$

$$R_i = \alpha \cdot R_Z = 1,23 \cdot 7,028 = 8,625 \Omega.$$

MT (PEEC)

33C

Скопје, 2017 45 / 58

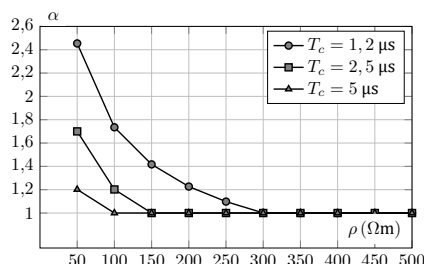
Пример 4

Колкави ќе бидат R_Z и R_i на заземјувачот во форма на трикрака звезда од примерот 3 ($n = 3, l = 20 \text{ m}, h = 0, 7 \text{ m}$) кога е тој поставен во тло со $50 \Omega\text{m} \leq \rho \leq 500 \Omega\text{m}$. Пресметките да се направат: а) $T_c = 1, 2 \mu\text{s}$, б) $T_c = 2, 5 \mu\text{s}$ и в) $T_c = 5 \mu\text{s}$ а резултатите да се прикажат табеларно и графички.

$T_c = 1, 2 \mu\text{s}$					$T_c = 2, 5 \mu\text{s}$				
$\rho (\Omega\text{m})$	$l_a (\text{m})$	$R_Z (\Omega)$	$R_i (\Omega)$	α	$\rho (\Omega\text{m})$	$l_a (\text{m})$	$R_Z (\Omega)$	$R_i (\Omega)$	α
50	8,0	1,757	4,313	2,454	50	11,6	1,757	2,988	1,700
100	10,7	3,514	6,099	1,735	100	18,4	3,514	4,225	1,202
150	13,9	5,271	7,470	1,417	150	20,1	5,271	5,271	1,000
200	16,1	7,028	8,625	1,227	200	23,2	7,028	7,028	1,000
250	18,0	8,786	9,643	1,098	250	26,0	8,786	8,786	1,000
300	19,7	10,54	10,56	1,001	300	28,4	10,54	10,54	1,000
350	21,3	12,30	12,30	1,000	350	30,7	12,30	12,30	1,000
400	22,7	14,06	14,06	1,000	400	32,8	14,58	14,58	1,000
450	24,1	15,81	15,81	1,000	450	34,8	15,81	15,81	1,000
500	25,4	17,57	17,57	1,000	500	36,7	17,57	17,57	1,000

Пример 4

$T_c = 5 \mu\text{s}$				
$\rho (\Omega\text{m})$	$l_a (\text{m})$	$R_Z (\Omega)$	$R_i (\Omega)$	α
50	16,4	1,757	2,113	1,202
100	23,2	3,514	3,514	1,000
150	28,4	5,271	5,271	1,000
200	32,8	7,028	7,028	1,000
250	36,7	8,786	8,786	1,000
300	40,2	10,54	10,54	1,000
350	43,4	12,30	12,30	1,000
400	46,4	14,58	14,58	1,000
450	49,3	15,81	15,81	1,000
500	51,9	17,57	17,57	1,000



Јонизација и електрични празнења во тлото

- Струјата на громот што се одведува во земјата е голема: неколку десетици кА, па дури до стотина кА. Толкави големи струи во земјата создаваат силно електрично поле кое може да предизвика електрично искрење и празнење во земјата.
- Кај големите струи на одведување и големите специфични отпорности на тлото, во него се воспоставуваат јаки електрични полиња кои доведуваат до негова јонизација па дури и празнење преку електричен лак. Со тоа се намалува импулсната отпорност на заземјувачот и важи $\alpha < 1$.
- Празнењето на громот во надземниот вод предизвикува инјектирање на струјни импулси во заземјувачите од столбовите и иницира сложен електромагнетен преоден процес којшто има бранов карактер и чијашто анализа е прилично сложена.
- Процесите сè уште не се доволно проучени така што единствена употреблива опција, барем засега, претставуваат експерименталните истражувања на реалните заземјувачи и експериментите на модели.

Импулсни коеф. на типските заземјувачи на НВ

Емпириски формули добиени експериментално во Лабораторијата за заземјувачки технологии при Универзитетот во Чонгкинг.

$$\alpha = a \cdot \rho^{-p} \cdot (b + \sqrt{l}) \cdot (c - e^{-d \cdot \Gamma_M^{-q}}),$$

$$\alpha = 0,74 \cdot \rho^{-0,4} \cdot (7,0 + \sqrt{l}) \cdot (1,56 - e^{-3,0 \cdot \Gamma_M^{-0,4}}) \quad \text{за типот } a,$$

$$\alpha = 2,94 \cdot \rho^{-0,5} \cdot (6,0 + \sqrt{l}) \cdot (1,23 - e^{-2,0 \cdot \Gamma_M^{-0,3}}) \quad \text{за типот } b,$$

$$\alpha = 1,36 \cdot \rho^{-0,4} \cdot (1,3 + \sqrt{l}) \cdot (1,55 - e^{-4,0 \cdot \Gamma_M^{-0,4}}) \quad \text{за типот } c,$$

$$\alpha = 1,62 \cdot \rho^{-0,4} \cdot (5,0 + \sqrt{l}) \cdot (0,79 - e^{-2,3 \cdot \Gamma_M^{-0,2}}) \quad \text{за типот } d,$$

$$\alpha = 1,16 \cdot \rho^{-0,4} \cdot (7,1 + \sqrt{l}) \cdot (0,78 - e^{-2,3 \cdot \Gamma_M^{-0,2}}) \quad \text{за типот } e,$$

$$\alpha = 2,75 \cdot \rho^{-0,4} \cdot (1,8 + \sqrt{l}) \cdot (0,75 - e^{-1,5 \cdot \Gamma_M^{-0,2}}) \quad \text{за типот } f.$$

МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017 49 / 58

Импулсни коеф. на типските заземјувачи на НВ

Тип	Скица на заземјувачот	Опис на заземјувачот
a		Заземјувач за челично-решеткасти столбови, наменет за терени со ниска ($l = 0$) и висока ($l > 0$) спец. отпорност ρ . ($S = 8 \div 10$ m, $l = 0 \div 50$ m)
b		Заземјувач за портални столбови, наменет за терени со ниска специфична отпорност ρ . ($S = 0 \div 15$ m)
c		Заземјувач за портални столбови, наменет за терени со висока специфична отпорност ρ . ($d = 10$ m; $l = 5 \div 53$ m)

МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017 50 / 58

Импулсни коеф. на типските заземјувачи на НВ

Тип	Скица на заземјувачот	Опис на заземјувачот
d		Заземјувач за обични, едно-стоечки бетонски и челично-решеткасти столбови. ($l = 5 \div 100$ m)
e		Заземјувач за обични, едно-стоечки бетонски и челично-решеткасти столбови.
f		Вертикален заземјувач за обични, едно-стоечки бетонски и челично-решеткасти столбови. ($l = 5 \div 60$ m)

МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017 51 / 58

Пример 5

Се посматра 10 kV вод со бетонски столбови и PS 12 ($U_{\text{подн}} = 75 \text{ kV}$). Колкава ќе биде веројатноста за повратен прескок P_0 при удар на гром во столбот за случајот кога заземјувачите се од типот L2×10, при $\rho = 100 \Omega\text{m}$. Дали се задоволени барањата во поглед на потенцијалот на столбот $I_Z = 20 \text{ A}$.

- Отпорност на распростирање $R_Z = 8,043 \Omega \approx 8 \Omega$;
- Максимална потенцијална разлика на допир $E_{\text{d.max}} = 37\%$.

$$R_i = \alpha \cdot R_Z \approx 8 \Omega,$$
$$U_{\text{подн}} = 75 \text{ kV},$$
$$I_M = \frac{U_{\text{подн}}}{R_i} = \frac{75}{8} = 9,375 \text{ kA}.$$
$$P_0 = 1 - P = 1 - P(I \leq I_M).$$
$$P_0 = P(I > I_M) = 1 - 0,3675 = 0,6325 \text{ (63,25\%)}.$$
$$U_Z = R_Z \cdot I_Z = 8 \cdot 20 = 160 \text{ V} > 125 \text{ V}.$$
$$E_{\text{d.max}} = \frac{37}{100} \cdot U_Z = \frac{37}{100} \cdot 160 = 59 \text{ V} < 65 \text{ V}.$$

Пример 6

Да се пресмета колкава треба да биде должината на краците на заземјувачот тип L2×l од претходниот пример ако сакаме далекуводот да биде „отпорен“ на громови со амплитуда на струјата до 15 kA, или, како што се вели, „заштитното ниво“ на водот да биде $I_0 = 15 \text{ kA}$.

$$R_Z = \frac{U_{\text{подн}}}{I_0} = \frac{75}{15} = 5 \Omega.$$

Од табелата 4.3 ја отчитуваме бараната вредност на должината l на краците $l \approx 18 \text{ m}$ („точната“ вредност, добиена со линеарна интерполација, е $l = 18,5 \text{ m}$).

Од табелата 5.1 се гледа дека $P(I_M < 15) = 62\%$, што значи дека во 62% од ударите нема да дојде до повратен прескок.

Пример 7

Да се реши случајот разгледуван во примерот 5 ако надземниот 10 kV вод се изведе со потпорни изолатори од типот PS 24, наменети за 20 kV водови кои имаат $U_{\text{подн}} = 125 \text{ kV}$ (наместо PS 12 со $U_{\text{подн}} = 75 \text{ kV}$).

$$I_0 = \frac{U}{R_Z} = \frac{125}{8} = 15,63 \text{ kA}.$$

$$P(I < I_0) = P(I < 15,63) = 0,64 \text{ (64\%)},$$
$$P_0 = P(I \geq I_0) = 1 - P(I < I_0) = 0,36 \text{ (36\%)}.$$

- Во овој случај имаме обратна ситуација: само 1/3 од ударите на гром ќе предизвикаат повратен прескок (беше 2/3).
- Ако решевме да ја зголемиме на должината на краците (како во примерот 5) треба градежни зафати и 170 €/столб или околу 1700 €/km.
- Ако ги смениме само изолаторите ќе не чини $\approx 5 \text{ €/изолатор}$, т.е. $3 \times 5 = 15 \text{ €/столб}$ или приближно 150 €/km.

Пример 8

Столбовите од еден 20 kV надземен вод е предвидено да се заземјуваат со прстенести заземјувачи во форма на круг, изведени од поцинкувана челична лента FeZn 30×4 ($d = 22$ mm), закопана на длабочина $h = 0,7$ m. Столбовите минуваат низ терени со различни специфични отпорности на тлото $\rho \in \{50, 100, 150, 200, 300\} \Omega\text{m}$. За секој од нив да се пресмета потребниот пречник на кругот D така што отпорноста на распростирање на заземјувачот, во согласност со Препораката ТП 7, да изнесува $R_Z = 15 \Omega$.

$$R_Z = \frac{\rho}{\pi^2 \cdot D} \cdot \ln \frac{4 \cdot D}{\sqrt{h \cdot d}}$$

$$D_k = \frac{\rho}{\pi^2 \cdot R_Z} \cdot \ln \frac{4 \cdot D_{k-1}}{\sqrt{h \cdot d}}; \quad k = 1, 2, \dots \quad D_0 = 1 \text{ m}$$

$$D_1 = \frac{\rho}{\pi^2 \cdot R_Z} \cdot \ln \frac{4 \cdot D_0}{\sqrt{h \cdot d}} = \frac{100}{\pi^2 \cdot 15} \cdot \ln \frac{4 \cdot 1}{\sqrt{0,7 \cdot 0,022}} = 2,35 \text{ m};$$

$$D_2 = \frac{\rho}{\pi^2 \cdot R_Z} \cdot \ln \frac{4 \cdot D_1}{\sqrt{h \cdot d}} = \frac{100}{\pi^2 \cdot 15} \cdot \ln \frac{4 \cdot 2,35}{\sqrt{0,7 \cdot 0,022}} = 2,92 \text{ m};$$

⋮

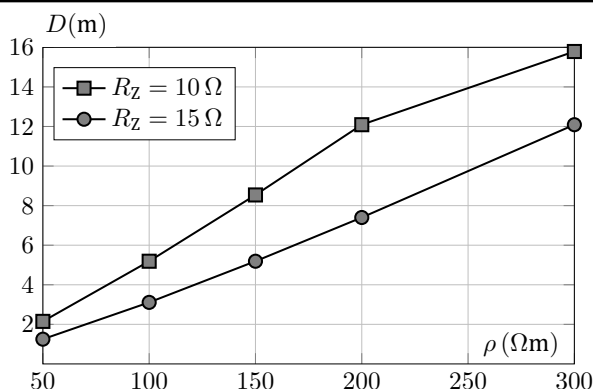
МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 55 / 58

Пример 8

ρ (Ωm)	50	100	150	200	300
D (m) за $R_Z = 15 \Omega$	1,25	3,11	5,19	7,40	12,09
D (m) за $R_Z = 10 \Omega$	2,15	5,19	8,54	12,09	15,79



МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 56 / 58

Пример 9

Со помош на програмата lenta_impuls да се изврши пресметка на временскиот тек на напонот на заземјувачот од примерот 1 (FeZn 30×4, $l = 20$ m, $h = 0,7$ m; $\rho = 100 \Omega\text{m}$) за случај кога импулсот на струјата на громот има темена вредност $I_M = 25$ kA а неговиот облик има параметри: а) 1,2/50; б) 2,5/50 и в) 5/50 μs . Колкави се вредностите на импулсниот коефициент α добиен на тој начин?

../programi/impuls/lenta_tri_impulsi.m

```

1 % impuls 1.2/50
2 [t1,i1,j1,u1] = lenta_impuls(100,0.7,20,25,1.2e-6,50e-6,5e-6);
3 plot(t1,u1(:,1 21 41)); xlim([0 5e-6]); ylim([0 450])
4 % impuls 2.5/50
5 [t2,i2,j2,u2] = lenta_impuls(100,0.7,20,25,2.5e-6,50e-6,5e-6);
6 % impuls 5/50
7 [t3,i3,j3,u3] = lenta_impuls(100,0.7,20,25,5e-6,50e-6,5e-6);
8 figure; plot(t1,u1(:,1),t2,u2(:,1),t3,u3(:,1)); xlim([0 5e-6]); ylim([0 450])

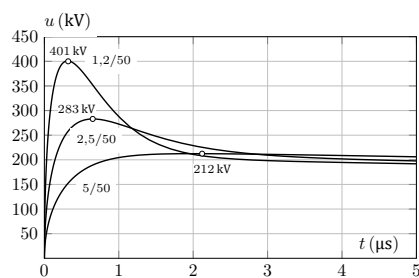
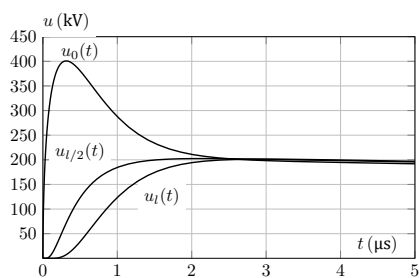
```

МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 57 / 58

Пример 9



$$R_{i(1,2/50)} = \frac{401}{25} = 16,04 \Omega; \quad \alpha_{1,2/50} = \frac{16,04}{8,1} = 1,98.$$

$$R_{i(2,5/50)} = \frac{283}{25} = 11,32 \Omega; \quad \alpha_{2,5/50} = \frac{11,32}{8,1} = 1,40.$$

$$R_{i(5/50)} = \frac{212}{25} = 8,48 \Omega; \quad \alpha_{5/50} = \frac{8,48}{8,1} = 1,05.$$

Заземјувачи и заземјувачки системи во електроенергетските мрежи

Заземјувачи на ТС СН/НН и ВН/СН

М. Тодоровски

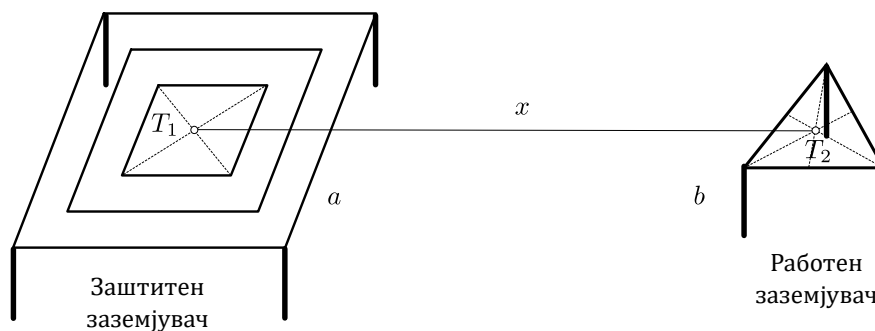
Институт за преносни електроенергетски системи
Факултет за електротехника и информациски технологии
Универзитет Св. Кирил и Методиј

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

Скопје, 2017

MT (ПЕЕС) 33С Скопје, 2017 1 / 25

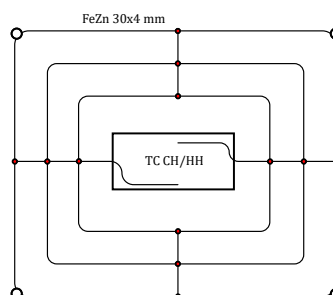
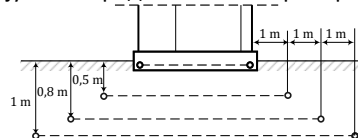
Заземјувачи на ТС СН/НН



MT (ПЕЕС) 33С Скопје, 2017 2 / 25

Типски заштитни заземјувачи на ТС СН/НН

Заземјувач според техничката препорака ТП 7

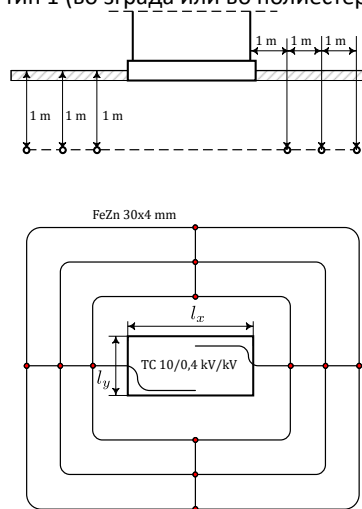


Според препораката условите за безопасност се исполнети ако е $R_Z \leq 5 \Omega$.

MT (ПЕЕС) 33С Скопје, 2017 3 / 25

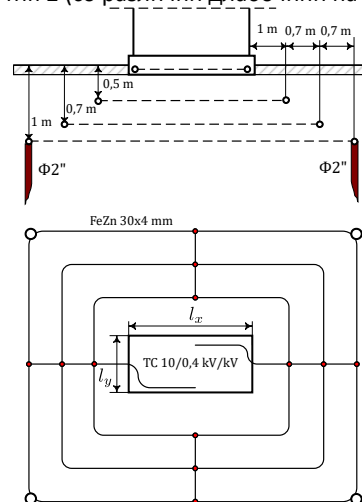
Типски заштитни заземјувачи на ТС СН/НН

Заземјувач тип 1 (во зграда или во полиестерска куќичка)



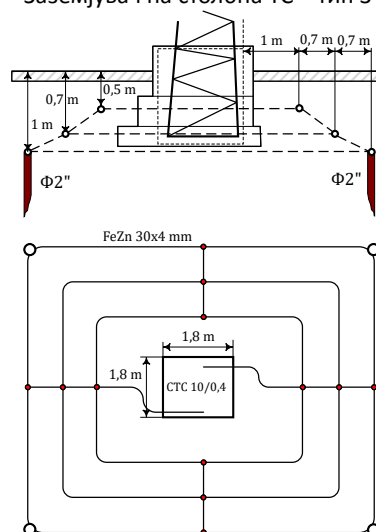
Типски заштитни заземјувачи на ТС СН/НН

Заземјувач тип 2 (со различни длабочини на закопување)



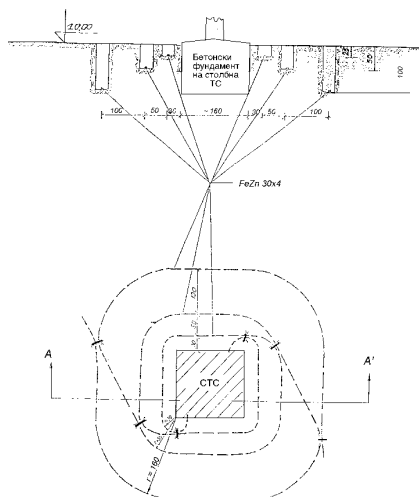
Типски заштитни заземјувачи на ТС СН/НН

Заземјувач на столбна ТС – тип 3



Типски заштитни заземјувачи на ТС СН/НН

Скица на еден изведен заштитен заземјувач на столбна ТС 10/0,4 kV/kV



МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017

7 / 25

Карактеристики на типските заштитни заземјувачи

- Анализирани се заземјувачи од типот 1, 2 и 3. Пресметувани се

- \Re_Z кога е $\rho = 100 \Omega\text{m}$

$$R_Z = \Re_Z \cdot \frac{\rho}{100}$$

- $E_{d.\text{max}}$, $E_{d.\text{med}}$ и $E_{d.\text{min}}$ за потенцијалните разлики на допир, $E_{c.\text{max}}$, $E_{c.\text{med}}$ и $E_{c.\text{min}}$ за потенцијалните разлики на чекор (отчитани од хистрограми)
- Од резултатите се гледа дека димензионирањето на заштитните заземјувачи треба да се врши во однос на $E_{c.\text{max}}$ бидејќи важи $E_{c.\text{max}} > E_{d.\text{max}}$.

МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017

8 / 25

Карактеристики на типските заштитни заземјувачи – $\Re_Z(\Omega)$

Направени модификации (со **болд** се означени основните конфигурации)

- сите типови се со додадени 4 вертикални сонди,
- сите типови се без средната контура за обликување на потенцијалот,
- сите типови се без вертикалните сонди.

Тип	а) $\Re_Z(\Omega)$	б) $\Re_Z(\Omega)$	в) $\Re_Z(\Omega)$	$l_x \times l_y$ (m)	Опис
1/1	4,09	4,88	4,64	1,6×3,2	Зграда или полиестерска куќичка
1/2	3,28	3,75	3,57	5,0×5,5	Зграда или полиестерска куќичка
1/3	2,97	3,35	3,20	6,0×7,5	Зграда или полиестерска куќичка
1/4	3,99	4,67	4,43	1,9×3,8	Полиестерска и монтажна
1/5	2,55	2,81	2,69	10,0×10,0	Сидана
2/1	4,65	4,77	5,45	1,8×2,7	Блиндирана
2/2	3,99	4,09	4,50	3,2×4,8	Сидана или бетонска
2/3	3,60	3,70	3,99	4,8×5,8	Сидана или бетонска
3	4,86	4,98	5,77	1,8×1,8	Столбна ТС

МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017

9 / 25

Карактеристики на типските заштитни заземјувачи – $E_d(\%)$

Тип	а) $E_d(\%)$			б) $E_d(\%)$			в) $E_d(\%)$		
	max	med	min	max	med	min	max	med	min
1/1	8	7,3	7	15	12,8	11	10	8,4	8
1/2	9	7,8	7	16	12,9	10	10	8,4	7
1/3	10	7,8	7	16	12,7	10	10	8,4	7
1/4	8	7,3	7	15	12,8	11	10	8,4	7
1/5	10	7,6	7	16	11,8	11	11	7,8	7
2/1	7	5,8	4	10	8,4	6	8	6,6	5
2/2	7	6,1	4	10	8,6	6	8	6,6	5
2/3	8	6,1	5	11	8,9	6	8	6,7	5
3	6	5,6	4	10	8,3	6	8	6,6	5

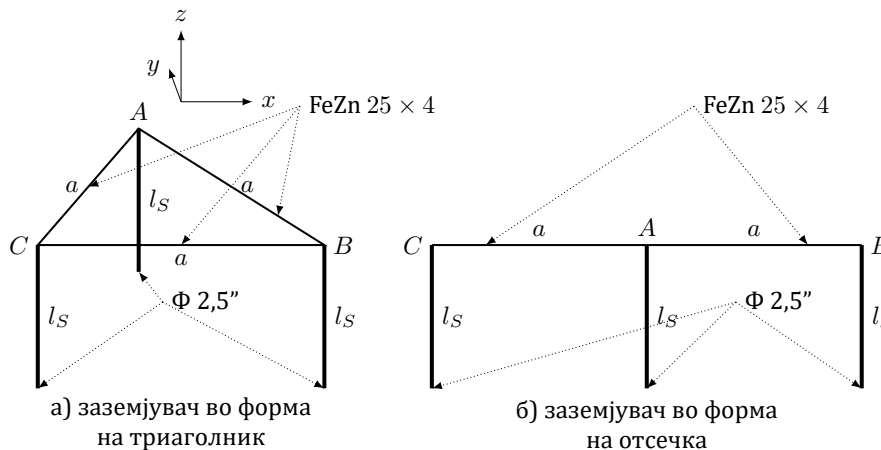
Карактеристики на типските заштитни заземјувачи – $E_c(\%)$

Тип	а) $E_c(\%)$			б) $E_c(\%)$			в) $E_c(\%)$		
	max	med	min	max	med	min	max	med	min
1/1	13	4,7	0	14	5,0	0	14	5,3	0
1/2	10	2,1	0	8	2,6	0	11	2,4	0
1/3	6	1,7	0	6	4,7	0	8	1,8	0
1/4	13	4,7	0	14	4,7	0	14	4,8	0
1/5	6	4,5	0	6	4,7	0	12	4,7	0
2/1	15	6,5	0	13	6,2	0	17	7,5	0
2/2	14	7,1	0	13	5,0	0	16	5,9	0
2/3	14	3,9	0	12	4,0	0	15	4,5	0
3	15	6,7	0	13	6,5	0	17	7,5	0

Типски заштитни заземјувачи – заклучоци

- $E_{d,med}$ и $E_{c,med}$ се највисоки кај заземјувачите од типот 1 заради лошото обликување на потенцијалот (3 контури на иста длабочина).
- \mathfrak{R}_Z зависи од димензиите на надворешната контура. Со зголемувањето на димензиите \mathfrak{R}_Z опаѓа и има подобро обликување на потенцијалот.
- Вертикалните сонди го намалуваат \mathfrak{R}_Z само за 10 до 18%, а E_d за помалку од 15 %.
- Средната контура сосема малку на \mathfrak{R}_Z (намалување за 5%). Најмногу влијае врз обликувањето на потенцијалот, ги смалува потенцијалните разлики на допир за повеќе од 2 пати.
- Ако контурите од заземјувачот се на различни длабочини, средната контура може и да се изостави без да има битно влијание на E_d .
- Со оддалечувањето на прстените од столбот на столбната ТС обликувањето на потенцијалот се влошува.

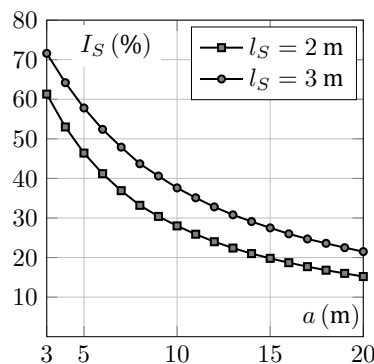
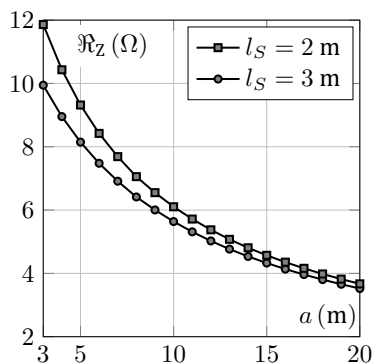
Работни заземјувачи на ТС СН/НН



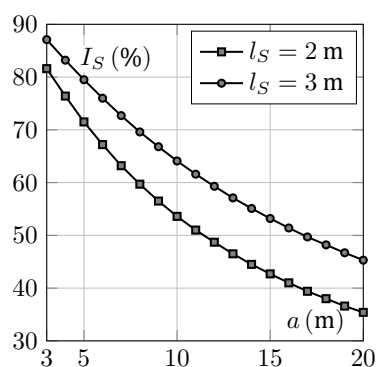
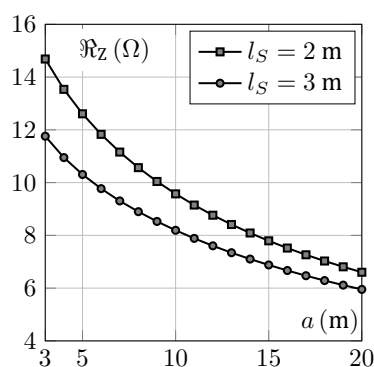
Избор на димензии на работниот заземјувач

a (m)	рамностран триаголник со страна a				отсечка со должина a + a = 2a			
	l _s = 3 m		l _s = 2 m		l _s = 3 m		l _s = 2 m	
	R _Z (Ω)	I _S (%)	R _Z (Ω)	I _S (%)	R _Z (Ω)	I _S (%)	R _Z (Ω)	I _S (%)
3	9,945	71,6	11,861	61,3	11,758	87,1	14,685	81,6
4	8,953	64,2	10,432	53,0	10,949	83,2	13,535	76,4
5	8,147	57,8	9,318	46,4	10,308	79,5	12,608	71,5
6	7,478	52,4	8,422	41,2	9,771	76,0	11,829	67,2
7	6,912	47,9	7,688	36,9	9,305	72,7	11,157	63,2
8	6,414	43,7	7,056	33,2	8,898	69,6	10,567	59,7
9	6,004	40,6	6,550	30,4	8,528	66,8	10,043	56,5
10	5,637	37,6	6,104	28,0	8,192	64,1	9,573	53,6
11	5,313	35,1	5,716	25,9	7,886	61,6	9,149	51,0
12	5,025	32,8	5,376	24,0	7,604	59,3	8,764	48,7
13	4,767	30,8	5,076	22,4	7,343	57,1	8,412	46,5
14	4,535	29,1	4,809	21,0	7,102	55,1	8,090	44,5
15	4,327	27,5	4,571	19,8	6,878	53,2	7,793	42,7
16	4,136	26,0	4,355	18,7	6,668	51,4	7,519	41,0
17	3,963	24,7	4,160	17,7	6,471	49,7	7,264	39,4
18	3,804	23,6	3,982	16,8	6,287	48,2	7,028	38,0
19	3,657	22,5	3,820	16,0	6,114	46,7	6,808	36,6
20	3,522	21,5	3,670	15,2	5,951	45,3	6,601	35,4

Работен заземјувач во форма на триаголник



Работен заземјувач во форма на отсечка



Работни заземјувачи – заклучоци

- Обликот на триаголникот малку влијае врз R_Z и за случаите кога место рамностран триаголник со страница a имаме на разностран триаголник но со ист периметар ($L_{\Sigma} = 3a$).
- Во селските и во приградските населби работниот и заштитниот заземјувач се галвански одвоени за да се избегне можноста при дефект во СН мрежа висок потенцијал да се изнесе во НН мрежа.
- Со ТП 7 се бара $R_Z < 5 \Omega$, што не е доволно ниско за да се отстрани појавата на висок потенцијал на неутралниот спроводник при дефект или силна несиметрија. Но, неутралниот спроводник се заземјува на повеќе места во НН мрежа што многу помага.
- Кај ТС СН/НН напојувани преку кабелска мрежа со ТП 7 се бара $R_Z < 10 \Omega$ бидејќи присуството на напоен кабел (кабли) ги олеснува условите на заземјување.

Заземјување на ТС ВН/ВН и ТС ВН/СН

- Мрежести заземјувачи 0,5 до 1 m, некогаш имаат и сонди кои одат до долниот слој на двослојна земја.
- Просторот што зафаќаат мрежестите заземјувачи е од неколку декари до неколку хектари.
- Обликот и димензиите на зависат од расположливиот простор и распоредот на опремата и другите уреди во постројката.
- Со изборот на обликот на заземјувачот се тежнее да се постигне најмал R_Z и поволно обликување на потенцијалите по површината за се добијат помали напони на допир и чекор.
- Сите метални маси од опремата, уредите и другите елементи треба да се наоѓаат во внатрешноста на заземјувачот на растојание од најмалку 1 m од периферната контура на заземјувачот.

Формули за пресметка на R_Z

- Формула базирана на еквиваленција на мрежата со еквивалентна кружна плоча

$$R_Z = 0,443 \cdot \frac{\rho}{\sqrt{A}}.$$

- Формула на Лоран (Laurent)

$$R_Z = 0,443 \cdot \frac{\rho}{\sqrt{A}} + \frac{\rho}{L_{\Sigma}}.$$

- Формула на Шверак (Sverak)

$$R_Z = \rho \cdot \left[\frac{1}{L_{\Sigma}} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \cdot \sqrt{20/A}} \right) \right]$$

- Формула на Тапар (Thapar)

$$R_Z = \rho \cdot \left[\frac{1}{L_{\Sigma}} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \cdot \sqrt{20/A}} \right) \right] \cdot 1,52 \cdot \left[2 \ln \left(L_p \sqrt{\frac{2}{A}} \right) - 1 \right] \cdot \frac{\sqrt{A}}{L_p} \phi$$

- Формула на Нахман

$$R_Z = 0,13 \cdot \frac{\rho}{\sqrt{A}} \log_{10} \left(\frac{2400 \cdot \sqrt{A}}{N} \right) \cdot \left(1 - 0,45 \cdot \frac{l_S}{\sqrt{A}} \right),$$
$$\frac{l_S}{\sqrt{A}} \leq 0,2.$$

Формули за пресметка на $E_{d,max}$

$$E_m = \rho \cdot K_m \cdot K_{im} \cdot \frac{I_Z}{L_{em}} = \rho \cdot K_m \cdot K_{im} \cdot \frac{I_Z}{L_{\Sigma} + 1,15 \cdot L_{\Sigma V}},$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left(\frac{8}{(2n-1)\pi} \right) \right],$$

$$K_{ii} = (2n)^{-(n/2)}, \quad \text{за мрежи со вертикални сонди } K_{ii} = 1,$$

$$K_h = \sqrt{1+h},$$

$$K_{im} = 0,656 + 0,172 \cdot n.$$

Формули за пресметка на $E_{c,max}$

$$E_c = \rho \cdot K_c \cdot K_{ic} \cdot \frac{I_Z}{L_{ec}} = \rho \cdot K_c \cdot K_{ic} \cdot \frac{I_Z}{L_{\Sigma} + 2 \cdot L_{\Sigma V}},$$

$$K_c = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{W}{D} \right],$$

$$K_{ic} = 0,94 + 0,047 \cdot n,$$

$$W = 0,5 + 0,9 \cdot \ln \frac{n-1}{2}, \quad W = 0 \text{ за } n = 2.$$

Случај со двослој со параметри ρ_1 , ρ_2 и H

Без вертикални сонди

$$R_Z^{(n)} = C_\rho \cdot R_Z = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^x \cdot R_Z,$$

$$x = 0,14 \cdot \log\left(\frac{44N\sqrt{A}}{H^2}\right); \quad 0,2 \leq \frac{\rho_2}{\rho_1} \leq 1$$

$$x = 0,12 \cdot \log\left(3160N\sqrt{A}\right) - 0,2 \cdot \log H \cdot \log \frac{1000}{\sqrt{A}}; \quad 1 \leq \frac{\rho_2}{\rho_1} \leq 5$$

Со вертикални сонди

$$R_Z^{(n)} = C_R \cdot R_Z = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{0,76} \cdot R_Z; \quad \rho_2 < \rho_1$$

МТ (ПЕЕС) 33С Скопје, 2017 22 / 25

Случај со двослој со параметри ρ_1 , ρ_2 и H

Потенцијална разлика на допир

$$E_m^{(n)} = C_m \cdot E_m = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^x \cdot E_m$$

$$x = 0,042 \cdot \log(3,53 \cdot H) \cdot (\log N)^2 - \frac{1}{2} \cdot \log \frac{H}{6}; \quad \rho_2 < \rho_1$$

$$x = 0,12 \cdot \log(N \cdot \sqrt{A}) - 0,16 \cdot \log(4,6 \cdot H); \quad \rho_2 > \rho_1$$

Потенцијална разлика на чекор

$$E_c^{(n)} = C_c \cdot E_c = \left[1 + 0,7 \cdot \log\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)\right] \cdot E_c$$

МТ (ПЕЕС) 33С Скопје, 2017 23 / 25

Осврт кон прописите и препораките

Според препораката ТП 23 се усвојува дека времетраење на грешката изнесува 0,25 s, т.е.

$$U_{d,doz} = 230 \text{ V}$$

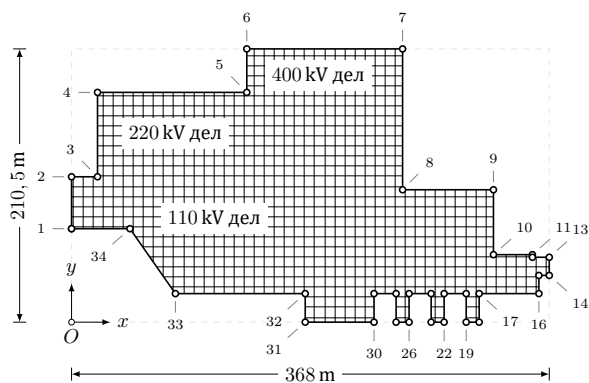
$$U_{d,doz} = 230 = \frac{E_{d,doz}}{1 + 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_p}$$

$$E_d \leq E_{d,doz} = 230 + 0,34 \cdot \rho_p$$

- Густината на окцата на заземјувачката мрежа мора да одговара на распоредот на полињата во постројката, положбата на апаратите, фундаментите и носачите на опремата.
- Металните делови на што не припаѓаат на струјните кругови (оградите и мрежите околу одделните апарати и постројки, цевководи, арматури и сл.) исто така треба да бидат поврзани со заземјувачот.
- Околу темелите на објектите во постројката е потребно да се постави прстен на растојание од 1 до 2 m од темелот на зградата, на длабочина 0,5 m. Тој прстен треба да се поврзе со заземјувачот.
- Надворешните метални огради треба да бидат барем 2 m од заземјувачот и не смеат галвански да се поврзуваат со него. Од надворешната страна на оградата се полага заземјувач на растојание 1 m од оградата.
- Се практикува изолирање на потенцијално опасните места околу оградата со поставување на слој асфалт (1 cm) или чакал (10 cm).

МТ (ПЕЕС) 33С Скопје, 2017 24 / 25

Пресметка на мрежестите заземјувачи со компјутерска симулација



проект	релација 3	релација 5	компјутерска симулација
$R_Z = 0,187 \Omega$	$R_Z = 0,192 \Omega$	$R_Z = 0,189 \Omega$	$R_Z = 0,190 \Omega$

Заземјувачи и заземјувачки системи во електроенергетските мрежи

Надземен вод како елемент од заземјувачкиот систем на 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

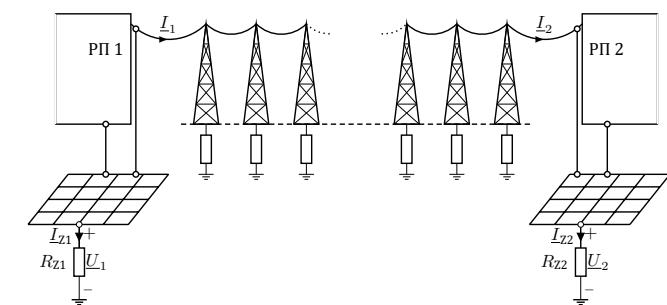
Скопје, 2017

МТ (ПЕЕС)

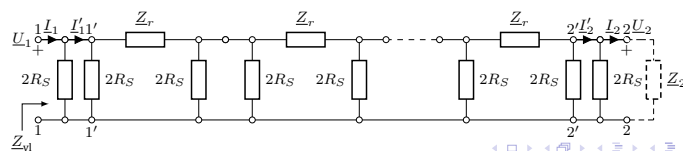
33С

Скопје, 2017 1 / 42

Идеализиран модел на заземјувачкиот систем на надземен вод



$$Z_{v1} = \frac{U_1}{I_1}$$



МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 2 / 42

Параметри на заштитното јаже

$$Z_r = z \cdot a = (r + jx) \cdot a,$$

$$r = \frac{1000}{\kappa_{zj} \cdot A_{zj}} = \frac{1000 \cdot \rho_{zj}}{A_{zj}} \quad \left(\frac{\Omega}{\text{km}} \right)$$

$$x = 0,1445 \cdot \log \frac{2D_{ek}}{d_{zj}} + 0,0157 \cdot \mu_r \quad \left(\frac{\Omega}{\text{km}} \right)$$

$$D_{ek} = 658 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}}, \quad (\text{m})$$

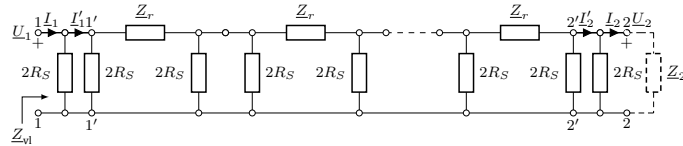
МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 3 / 42

Низа од π -четворополи

π -четворополи со параметри $2R_S$, Z_r и $2R_S$



$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot \text{ch}(ng) + \underline{Z} \cdot \underline{I}_2 \cdot \text{sh}(ng),$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}} \cdot \text{sh}(ng) + \underline{I}_2 \cdot \text{ch}(ng),$$

$$\underline{Q} = 1 + \frac{\underline{Z}_r}{2R_S},$$

$$\underline{g} = \ln \left(\underline{Q} + \sqrt{\underline{Q}^2 - 1} \right) = \ln \left[1 + \frac{\underline{Z}_r}{2R_S} + \sqrt{\frac{\underline{Z}_r}{R_S} + \left(\frac{\underline{Z}_r}{2R_S} \right)^2} \right],$$

$$\underline{Z} = \sqrt{\frac{2R_S \underline{Z}_r}{2 + \underline{Z}_r / (2R_S)}} = 2R_S \cdot \sqrt{\frac{\underline{Q} - 1}{\underline{Q} + 1}}.$$

MT (ПЕЕС)

33C

Скопје, 2017

4 / 42

Упростувања за \underline{g} и \underline{Z}

$$\left| \frac{\underline{Z}_r}{2R_S} \right| \ll 1,$$

$$\ln(1 + \xi) \approx \xi, \quad (\xi \ll 1),$$

$$\underline{g} \approx \frac{\underline{Z}_r}{2R_S} + \sqrt{\frac{\underline{Z}_r}{R_S} + \left(\frac{\underline{Z}_r}{2R_S} \right)^2} \approx \frac{\underline{Z}_r}{2R_S} + \sqrt{\frac{\underline{Z}_r}{R_S}},$$

$$\underline{Z} \approx \sqrt{\underline{Z}_r \cdot R_S}.$$

$$\underline{Z}'_{v1} = \underline{Z}'_{v1} \Pi(2R_S) = \frac{\underline{Z}'_{v1} \cdot 2R_S}{\underline{Z}'_{v1} + 2R_S}, \quad \underline{Z}'_2 = \underline{Z}_2 \Pi(2R_S) = \frac{\underline{Z}_2 \cdot 2R_S}{\underline{Z}_2 + 2R_S}$$

$$\underline{Z}'_{v1} = \underline{Z} \cdot \frac{\text{ch}(ng) + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}'_2} \cdot \text{sh}(ng)}{\text{sh}(ng) + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}'_2} \cdot \text{ch}(ng)}.$$

$$k_i = \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = \frac{1}{\text{ch}(ng) + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}'_2} \cdot \text{sh}(ng)}.$$

MT (ПЕЕС)

33C

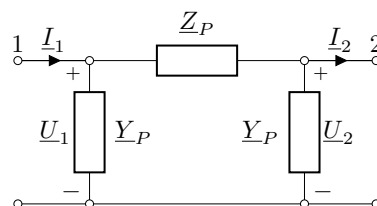
Скопје, 2017

5 / 42

π -заменска шема на водот

$$\underline{Z}_P = \underline{Z} \cdot \text{sh}(ng),$$

$$\underline{Y}_P = \frac{\text{ch}(ng) - 1}{\underline{Z} \cdot \text{sh}(ng)} + \frac{1}{2R_S}.$$



MT (ПЕЕС)

33C

Скопје, 2017

6 / 42

Приближни изрази за влезната импеданција

Долги водови

$$n \geq \frac{3}{\operatorname{Re}(g)}, \quad n \geq \frac{3}{\alpha},$$

$$\underline{Z}_{v1} \approx \sqrt{\underline{Z}_r \cdot R_S} - \frac{\underline{Z}_r}{2}.$$

Куси водови

$$n \leq \frac{0,316}{|g|},$$

$$\underline{Z}_{v1} = \frac{\underline{Z}_2 + n \cdot \underline{Z}_r}{1 + n \cdot \frac{\underline{Z}_2}{R_S}}, \quad \underline{Z}_2 = \frac{2R_S \cdot \underline{Z}_2}{2R_S + \underline{Z}_2}.$$

МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

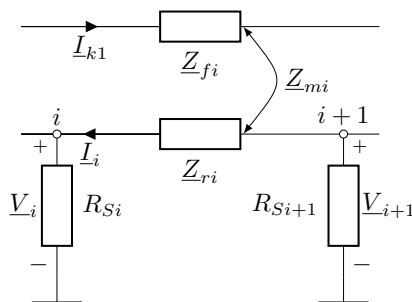
7 / 42

Егзактен модел на надземен вод

$$\underline{Z}_m = r_z + 0,1445 \cdot \log \frac{D_{ek}}{D_{zm}},$$

$$r_z = \frac{\mu \cdot \pi \cdot f}{4} \approx 0,05 \frac{\Omega}{\text{km}},$$

$$D_{zm} = \sqrt[3]{D_{zA} \cdot D_{zB} \cdot D_{zC}}.$$



$$V_{i+1} - V_i - \underline{Z}_{ri} \cdot I_i + \underline{Z}_{mi} \cdot I_{k1} = 0.$$

МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

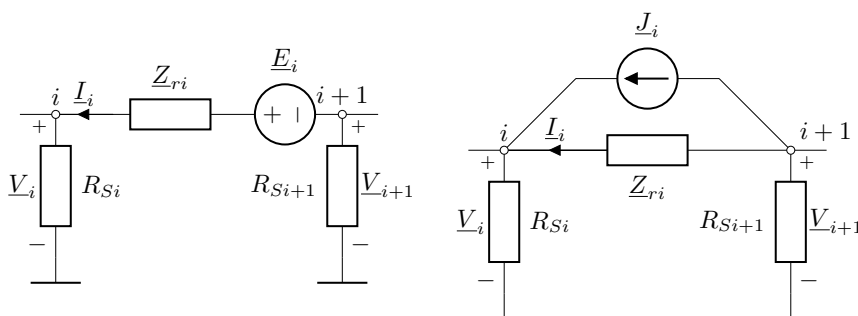
8 / 42

Егзактен модел на надземен вод

$$\underline{E}_i = \underline{Z}_{mi} \cdot I_{k1}.$$

$$V_{i+1} - V_i = \underline{Z}_{ri} \cdot I_i - \underline{E}_i$$

$$\underline{J}_i = \frac{\underline{E}_i}{\underline{Z}_{ri}} = \frac{\underline{Z}_{mi}}{\underline{Z}_{ri}} \cdot I_{k1}$$



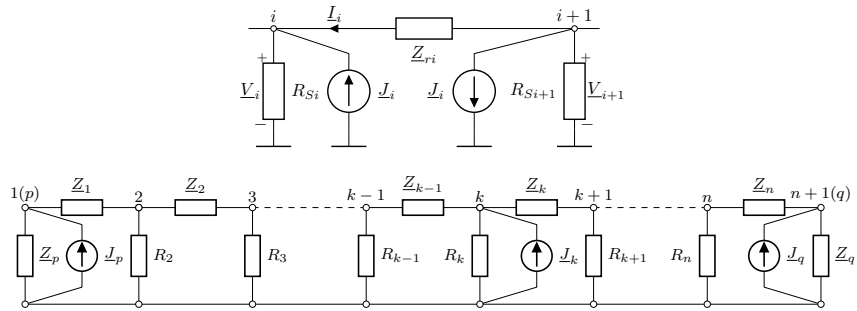
МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

9 / 42

Егзактен модел на надземен вод



$$I_{kv} = I_{k1} + I_{k2}$$

$$J_p = \frac{Z_m}{Z_r} \cdot I_{k1}$$

$$J_q = \frac{Z_m}{Z_r} \cdot I_{k2}$$

$$J_k = I_{kv} - J_p - J_q = \left(1 - \frac{Z_m}{Z_r}\right) \cdot I_{kv} \quad r_f = \left(1 - \frac{Z_m}{Z_r}\right)$$

MT (ПЕЕС)

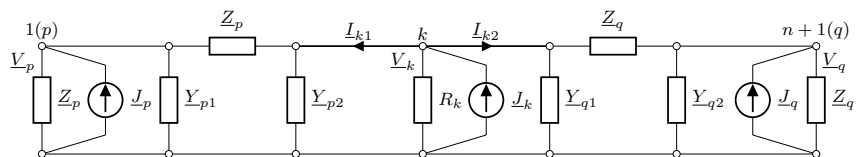
33С

Скопје, 2017

10 / 42

Егзактен модел на надземен вод – решение

Делот лево од местото на грешката е прикажан π -четворпол со параметри Y_{p1} , Y_{p2} и Z_p . Делот десно од местото на грешката е прикажан со π -четворпол со параметри Y_{q1} , Y_{q2} и Z_q .



Колото има само 3 јазли: p , k и q и може да се реши со помош на методот на независни напони. Со тоа добиваат V_k и I_k и I_{k+1} , а по потреба и V_p и V_q .

MT (ПЕЕС)

33С

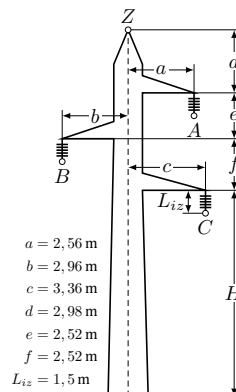
Скопје, 2017

11 / 42

Пример 1

Да се пресмета редуциониот фактор r_f за водот 110 kV „Скопје 3 – Козјак – Самоков“ кој минува низ терен со $\rho = 500 \Omega\text{m}$ и за е познато

- спроводници Al/Č 240/40 mm²;
- заштитно јаке Fe III 50 mm². ($A_{zj} = 50 \text{ mm}^2$; $d_{zj} = 9 \text{ mm}$; $r_{zj} = 3 \Omega/\text{km}$; $\mu_r = 30$);
- просечна вредност на распот $a = 300 \text{ m}$.



$a = 2,56 \text{ m}$
 $b = 2,96 \text{ m}$
 $c = 3,36 \text{ m}$
 $d = 2,98 \text{ m}$
 $e = 2,52 \text{ m}$
 $f = 2,52 \text{ m}$
 $L_{iz} = 1,5 \text{ m}$

MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

12 / 42

Пример 1

$$\begin{aligned} Z_r &= z \cdot a = (r + jx) \cdot a \\ r &= r_z + \frac{1000}{\kappa_{zj} \cdot A_{zj}} = \frac{1000 \cdot \rho_{zj}}{A_{zj}} = 0,05 + \frac{1000 \cdot 0,15}{50} = 3,05 \frac{\Omega}{\text{km}}; \\ D_{ek} &= 658 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}} = 658 \cdot \sqrt{\frac{500}{50}} = 2081 \text{ m}; \\ x &= 0,1445 \cdot \log \frac{2D_{ek}}{d_{zj}} + 0,0157 \cdot \mu_r = 0,1445 \cdot \log \frac{2 \cdot 2081}{9} + 0,0157 \cdot 30 = 1,29 \frac{\Omega}{\text{km}}; \\ z &= r + jx = (3,05 + j1,29) \frac{\Omega}{\text{km}}; \\ Z_r &= z \cdot a = (0,915 + j0,387) = 0,993 \cdot e^{j22,9^\circ} \Omega. \\ z_m &= r_z + 0,1445 \log \frac{D_{ek}}{D_{zm}} = (0,05 + j0,354) = 0,358 \cdot e^{j82^\circ} \frac{\Omega}{\text{km}}; \\ Z_m &= z_m \cdot a = (0,015 + j0,106) = 0,107 \cdot e^{j82^\circ} \Omega, \\ D_{zm} &= \sqrt[3]{D_{zA} \cdot D_{zB} \cdot D_{zC}} = \sqrt[3]{5,16 \cdot 7,6 \cdot 10,1} = 7,343 \text{ m}. \end{aligned}$$

Пример 1

$$\begin{aligned} \frac{Z_m}{Z_r} &= \frac{z_m}{z_r} = (0,0056 + j0,0927) = 0,108 \cdot e^{j59,0^\circ}; \\ r_f &= 1 - \frac{Z_m}{Z_r} = (0,944 - j0,093) = 0,949 \cdot e^{-j5,6^\circ}. \end{aligned}$$

$\rho(\Omega\text{m})$	$D_{ek}(\text{m})$	$ r_f $	$\arg\{r_f\}$
50	658,0	0,957	-4,4°
100	930,6	0,955	-4,8°
200	1316,0	0,952	-5,1°
300	1611,8	0,951	-5,3°
400	1861,1	0,950	-5,5°
500	2080,8	0,949	-5,6°
1000	2942,7	0,947	-6,0°

Пример 2

Со примена на постапка како во примерот 1, за 110 kV надземен вод изведен на столбовите тип M4, производ на „Енергеоинвест“ – Сараево, да се изврши пресметка на вредностите на редукциониот фактор r_f во зависност од специфичната отпорност на топло $\rho = 100 \Omega\text{m}$ за следните 9 случаи на типот на заштитно јаже

јаже	$A_{zj}(\text{mm}^2)$	$d_{zj}(\text{mm})$	$r_{zj}(\Omega/\text{km})$
а) Fe III 35 mm ²	34,4	7,5	4,36
б) Fe III 50 mm ²	49,5	9	3,032
в) Fe III 70 mm ²	65,2	10,5	2,301
г) Al/Č 35/6 mm ²	34,3	8,1	0,835
д) Al/Č 50/8 mm ²	51,2	11,7	0,564
ѓ) Al/Č 50/30 mm ²	51,2	11,7	0,564
е) Al/Č 95/55 mm ²	96,5	16,0	0,389
ж) Al/Č 120/70 mm ²	122,0	18,0	0,299
з) AWG 126,1 mm ²	126,1	13,0	0,600

Пример 2

$$z_m = r_z + 0,1445 \log \frac{D_{ek}}{D_{zm}} = (0,05 + j0,354) = 0,358 \cdot e^{j82^\circ} \frac{\Omega}{\text{km}},$$

јаже	μ_r	$z (\Omega/\text{km})$	$ z $	$\arg \{z\}$	$ r_f $	$\arg \{r_f\}$
а) Fe III 35 mm ²	30	4,410 + j1,251	4,584	15,8	0,973	-3,6
б) Fe III 50 mm ²	30	3,082 + j1,289	3,322	21,9	0,955	-4,8
в) Fe III 70 mm ²	30	2,351 + j1,229	2,653	27,6	0,935	-5,7
г) Al/Č 35/6 mm ²	1	0,885 + j0,790	1,187	41,8	0,814	-11,5
д) Al/Č 50/8 mm ²	1	0,645 + j0,780	1,012	50,4	0,753	-11,7
ѓ) Al/Č 50/30 mm ²	1	0,614 + j0,767	0,983	51,3	0,743	-11,9
е) Al/Č 95/55 mm ²	1	0,439 + j0,748	0,867	59,6	0,681	-10,8
ж) Al/Č 120/70 mm ²	1	0,349 + j0,740	0,818	64,8	0,646	-9,2
з) AWG 126,1 mm ²	1	0,650 + j0,761	1,001	49,5	0,754	-12,2

Пример 3

Еден 110 kV надземен вод е изведен со заштитно јаже тип Al/Č 50/30. Просечната вредност на отпорностите на распостирање на заземјувачите на столбовите изнесува $R_S = 10 \Omega$. Специфичната отпорност на тлото по должината на трасата од водот изнесува $\rho = 100 \Omega\text{m}$. Водот е долг $l = 10 \text{ km}$ и има вкупно $n = 40$ распони. Еквивалентната импеданција на постројката на крајот од водот изнесува $Z_2 = (0,5 + j0) \Omega$. Да се пресмета влезната (еквивалентната) импеданција на водот Z_{vl} и факторот на изнесениот потенцијал k_i . Во задачата водот да се посматра идеализирано, т.е. да се претпостави дека сите столбови имаат иста вредност на отпорноста R_S и сите распони се со иста должина $a = l/n = 250 \text{ m}$.

$$D_{ek} = 658 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}} = 658 \cdot \sqrt{\frac{100}{50}} = 930,6 \text{ m};$$

$$\begin{aligned} x &= 0,1445 \cdot \log \frac{2D_{ek}}{d_{zj}} + 0,0157 \cdot \mu_r = \\ &= 0,1445 \cdot \log \frac{2 \cdot 930,6}{11,7 \cdot 10^{-3}} + 0,0157 \cdot 1 = 0,767 \Omega/\text{km}; \end{aligned}$$

$$Z_r = (r + jx) \cdot a = (0,564 + j0,767) \cdot 0,25 = (0,141 + j0,192) \Omega/\text{km}.$$

Пример 3

$$Q = 1 + \frac{Z_r}{2R_S} = 1 + \frac{0,141 + j0,192}{20} = 1,0071 \cdot e^{j0,546^\circ};$$

$$g = \ln \left(Q + \sqrt{Q^2 - 1} \right) = (0,137635 + j0,0695) = 0,154185 \cdot e^{j26,79^\circ};$$

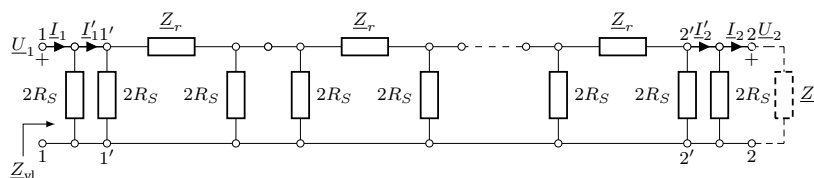
$$Z = \sqrt{\frac{Z_r \cdot 2R_S}{2 + Z_r/(2R_S)}} = (1,376 + j0,692) = 1,54 \cdot e^{j26,7^\circ} \Omega.$$

$$e^{ng} = -230,095 + j87,078;$$

$$\text{ch}(ng) = (e^{ng} + e^{-ng})/2 = -115,0494 + j43,5383;$$

$$\text{sh}(ng) = (e^{ng} - e^{-ng})/2 = -115,0456 + j43,5397.$$

Пример 3



$$\underline{Z}'_2 = \underline{Z}_2 \Pi(2R_s) = \frac{\underline{Z}_2 \cdot 2R_s}{\underline{Z}_2 + 2R_s} = \frac{0,5 \cdot 20}{0,5 + 20} = 0,489 \Omega;$$

$$\underline{Z}'_{v1} = \underline{Z} \cdot \frac{\text{ch}(ng) + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}'_2} \cdot \text{sh}(ng)}{\text{sh}(ng) + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}'_2} \cdot \text{ch}(ng)} = (1,37584 + j0,69192) \Omega;$$

$$\underline{Z}_{v1} = \underline{Z}'_{v1} \Pi(2R_s) = \frac{\underline{Z}'_{v1} \cdot 2R_s}{\underline{Z}'_{v1} + 2R_s} = (1,3069 + j0,60508) = 1,4402 \cdot e^{j24,84^\circ} \Omega.$$

Пример 3

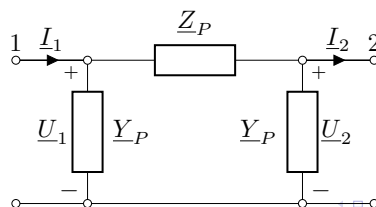
$$k_i = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\text{ch}(ng) + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}'_2} \cdot \text{sh}(ng)} = (-1,995 + j0,013) \cdot 10^{-3};$$

$$|k_i| = 0,002.$$

$$\underline{U}_2 = k_i \cdot \underline{U}_1; \quad U_2 = 0,002 \cdot U_1.$$

$$\underline{Z}_P = \underline{Z} \cdot \text{sh}(ng) = 190,025 \cdot e^{j186^\circ} \Omega;$$

$$\underline{Y}_P = \frac{\text{ch}(ng) - 1}{\underline{Z} \cdot \text{sh}(ng)} + \frac{1}{2R_s} = 0,6994 \cdot e^{-24,7^\circ} \text{ S}.$$



Пример 4

Да се пресмета \underline{Z}_{vl} за водот од примерот 3 со помош на изразите што важат за „долгите водови“. Колкава е разликата во добиените резултати?

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{vl} &\approx \sqrt{\underline{Z}_r \cdot R_s} - \frac{\underline{Z}_r}{2} = \\ &= \sqrt{(0,141 + j0,192) \cdot 10} - \frac{(0,141 + j0,192)}{2} = 1,438 \cdot e^{j24,7^\circ} \Omega. \end{aligned}$$

Грешката при пресметувањето \underline{Z}_{vl} изнесува само 0,15% и таа е занемарливо мала. Приближниот израз може слободно да се применува кај „долгите водови“.

Пример 5

Една 110 kV ТС се напојува преку надземен вод за кој е познато

$$\underline{Z}_{vl} = 1,712 \cdot e^{j28,1^\circ} \Omega = (1,51 + j0,81) \Omega,$$

додека отпорноста на мрежестиот заземјувач на самата ТС изнесува $R_{MZ} = 2 \Omega$. Струјата на еднофазна куса врска настаната на собирниците 110 kV на самата ТС што се инјектира во вкупниот ЗС изнесува $J_{k1} = 3 \text{ kA}$. Да се пресмета

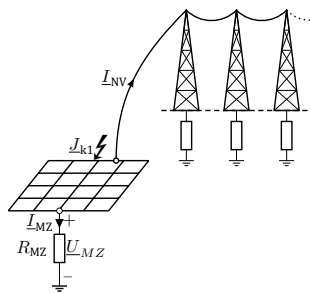
- потенцијалот на мрежестиот заземјувач U_{MZ} ;
- уделот на струјата што се одведува преку мрежестиот заземјувач во земјата, изразена во kA и во %.
- колкави ќе бидат U_{MZ} и I_{MZ} во случајот кога во разгледуваната ТС влегуваат два надземни вода со исти карактеристики.

МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 22 / 42

Пример 5



$$\underline{Z}_{ek} = R_{MZ} \parallel \underline{Z}_{vl} = \frac{2 \cdot (1,51 + j0,81)}{2 + (1,51 + j0,81)} = 0,951 \cdot e^{j15,2^\circ} \Omega.$$

$$U_{MZ} = Z_{ek} \cdot J_{K1} = 0,951 \cdot 3 = 2,853 \text{ kV}.$$

$$I_{MZ} = \frac{U_{MZ}}{R_{MZ}} = \frac{2,853}{2} = 1,427 \text{ kA}.$$

$$I_{NV} = \frac{U_{MZ}}{Z_{vl}} = \frac{2,853}{1,712} = 1,666 \text{ kA}.$$

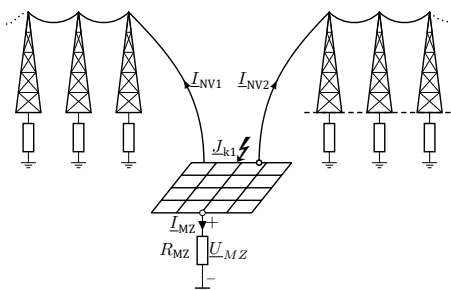
Надземниот вод со својот ЗС помага поголемиот дел од струјата да се одведе од

МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 23 / 42

Пример 5



$$\underline{Z}_{ek} = R_{MZ} \parallel \frac{\underline{Z}_{vl}}{2} = \frac{2 \cdot (1,51/2 + j0,81/2)}{2 + (1,51/2 + j0,81/2)} = 0,615 \cdot e^{j19,8^\circ} \Omega.$$

$$U_{MZ} = Z_{ek} \cdot J_{K1} = 0,615 \cdot 3 = 1,845 \text{ kV}.$$

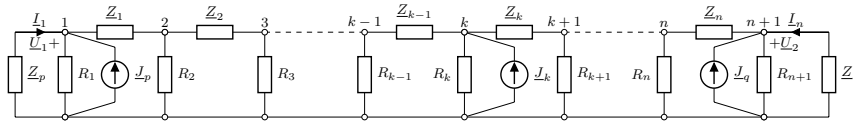
$$I_{MZ} = \frac{U_{MZ}}{R_{MZ}} = \frac{1,845}{2} = 0,923 \text{ kA}.$$

МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 24 / 42

Решавање на ЗС на надземен вод со матрици



$$\underline{Z}_k = z \cdot a_k,$$

$$\underline{J}_p = \frac{z_m}{z} \cdot \underline{I}_{k1}, \quad \underline{J}_q = \frac{z_m}{z} \cdot \underline{I}_{k2}, \quad \underline{J}_k = \left(1 - \frac{z_m}{z}\right) \cdot \underline{I}_k, \quad \underline{I}_k = \underline{I}_{k1} + \underline{I}_{k2}$$

$$\underline{Y} \cdot \underline{U} = \underline{I},$$

$$\underline{Y}_{11} = \frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{\underline{Z}_p},$$

$$\underline{Y}_{kk} = \frac{1}{\underline{Z}_{k-1}} + \frac{1}{R_k} + \frac{1}{\underline{Z}_k}, \quad k = 2, 3, \dots, n-1,$$

$$\underline{Y}_{nn} = \frac{1}{\underline{Z}_{n-1}} + \frac{1}{R_n} + \frac{1}{\underline{Z}_q},$$

$$\underline{Y}_{k,k-1} = \underline{Y}_{k-1,k} = -\frac{1}{\underline{Z}_{k-1}}, \quad k = 2, 3, \dots, n-1.$$

Navigation icons: back, forward, search, etc.

Решавање на ЗС на надземен вод со матрици

$$\underline{I} = [\underline{J}_p \ 0 \ \dots \ 0 \ \underline{J}_k \ 0 \ \dots \ \underline{J}_q]^T,$$

$$\underline{U} = \underline{Y}^{-1} \cdot \underline{I}.$$

Во Matlab ќе пишуваме $\underline{U} = \underline{Y} \setminus \underline{I}$, а не $\underline{U} = \underline{Y}^{-1} * \underline{I}$

Navigation icons: back, forward, search, etc.

Параметри на π -шештата на водот

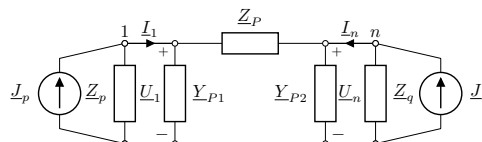
Импеданциите \underline{Z}_p и \underline{Z}_q не се вметнуваат во матрицата \underline{Y}

$$\underline{Y}_{11} = \frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{R_1},$$

$$\underline{Y}_{nn} = \frac{1}{\underline{Z}_{n-1}} + \frac{1}{R_n}.$$

$$\underline{Z} = \underline{Y}^{-1},$$

Во Matlab нема да правиме инверзија на матрица, туку ќе ги добиеме само првата и последната колона од \underline{Z} .



Navigation icons: back, forward, search, etc.

Параметри на π -шешмата на водот

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_{11} \cdot \underline{I}_1 + \underline{Z}_{12} \cdot \underline{I}_2 + \underline{Z}_{13} \cdot \underline{I}_3 + \dots + \underline{Z}_{1n} \cdot \underline{I}_n,$$

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_{11} \cdot \underline{I}_1 + \underline{Z}_{1n} \cdot \underline{I}_n,$$

$$\underline{U}_n = \underline{Z}_{n1} \cdot \underline{I}_1 + \underline{Z}_{nn} \cdot \underline{I}_n,$$

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{1n} \\ \underline{Z}_{n1} & \underline{Z}_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_n \end{bmatrix} = \underline{Z}' \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_n \end{bmatrix}$$

$$\underline{Z}' = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{1n} \\ \underline{Z}_{n1} & \underline{Z}_{nn} \end{bmatrix}.$$

$$\underline{Y}' = (\underline{Z}')^{-1}.$$

$$\underline{Y}' = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{P1} + \frac{1}{\underline{Z}_P} & -\frac{1}{\underline{Z}_P} \\ -\frac{1}{\underline{Z}_P} & \underline{Y}_{P2} + \frac{1}{\underline{Z}_P} \end{bmatrix}.$$

MT (ПЕЕС) 33С Скопје, 2017 28 / 42

Параметри на π -шешмата на водот

$$\underline{Z}_P = -\frac{1}{\underline{Y}'_{12}},$$

$$\underline{Y}_{P1} = \underline{Y}'_{11} - \frac{1}{\underline{Z}_P} = \underline{Y}'_{11} + \underline{Y}'_{12},$$

$$\underline{Y}_{P2} = \underline{Y}'_{22} - \frac{1}{\underline{Z}_P} = \underline{Y}'_{22} + \underline{Y}'_{12}.$$

MT (ПЕЕС) 33С Скопје, 2017 29 / 42

Пример 6 – матрично решение на примерот 3

Кај 110 kV вод заштитното јаже има $z = (0,564 + j0,767) \Omega/\text{km}$, а меѓусебна импеданција со фазниот спроводник е $z_m = (0,05 + j0,354) \Omega/\text{km}$.

Отпорностите на заземјувачите на столбовите имаат $R_S = 10 \Omega$. Водот е долг $l = 10 \text{ km}$ и има $n = 40$ еднакви распони. Еквивалентните импеданции на постројките на двата краја се $Z_p = (0,4 + j0) \Omega$ и $Z_q = (0,5 + j0) \Omega$. Да се одредат

- Влезната (еквивалентната) импеданција на водот на неговиот почеток $Z_{vl} = \underline{U}_1 / \underline{I}_1$ и факторот на изнесенiot потенцијал $k_i = \underline{U}_n / \underline{U}_1$.
- Параметрите на π -заменската шема на заземјувачкиот систем на водот.
- Факторите на изнесени потенцијали за сите столбови по должината на водот, а потоа да се пресметаат потенцијалите на столбовите 3 и 18 во случај кога напонот на почетокот на водот изнесува $\underline{U}_1 = 1200 \text{ V}$.
- Напоните на сите столбови ако е познато дека на столбот број 7 настанала еднофазна куса врска при што по фазните проводници течат струи $\underline{I}_{k1} = 1700 \text{ A}$ и $\underline{I}_{k2} = 1000 \text{ A}$.
- Напоните на сите столбови ако се познати напоните на двата краја од водот $\underline{U}_1 = 238 \cdot e^{j33,8^\circ} \text{ V}$ и $\underline{U}_2 = 523 \cdot e^{-j8,6^\circ} \text{ V}$.

MT (ПЕЕС) 33С Скопје, 2017 30 / 42

Пример 6

../programi/vodovi/vod_1.m

```
1 function vod = vod_1()
2 vod.Rs = 10*ones(41,1);
3 vod.Zr = (0.141+1j*0.192)*ones(40,1);
4 vod.Zp = 0.4;
5 vod.Zq = 0.5;
6 vod.z = 0.564 + 1j*0.767;
7 vod.zm = 0.05 + 1j*0.354;
```

../programi/vodovi/mat_y.m

```
1 function [Y,n] = mat_y(datoteka)
2 vod = feval(datoteka);
3 [Rs,Zr] = deal(vod.Rs,vod.Zr);
4 n = length(vod.Rs);
5 Y = sparse(n,n);
6 Y(1,1) = 1/Zr(1) + 1/Rs(1);
7 for k = 2:n-1
8     Y(k,k) = 1/Zr(k-1) + 1/Zr(k) + 1/Rs(k);
9 end
10 Y(n,n) = 1/Zr(n-1) + 1/Rs(n);
11 for k = 2:n
12     Y(k,k-1) = -1/Zr(k-1);
13     Y(k-1,k) = Y(k,k-1);
14 end
```

Navigation icons

Пример 6а

../programi/vodovi/zvl_k.m

```
1 function [Zvl,k,Z] = zvl_k(datoteka)
2 [Y,n] = mat_y(datoteka);
3 vod = feval(datoteka);
4 Y(n,n) = Y(n,n) + 1/vod.Zq;
5 I = [1; zeros(n-1,1)];
6 Z = Y\I;
7 Zvl = Z(1);
8 k = Z(n)/Z(1);
```

```
>> [Zvl,k] = zvl_k('vod_1')
Zvl =
    1.3072 + 0.6057i
k =
   -0.0020 - 0.0000i
```

Navigation icons

Пример 6б

../programi/vodovi/vod_pi.m

```
1 function [Zp,Yp1,Yp2] = vod_pi(datoteka)
2 [Y,n] = mat_y(datoteka);
3 I = zeros(n,2);
4 I(1,1) = 1;
5 I(n,2) = 1;
6 Z = Y\I;
7 Z1 = [
8     Z(1,1) Z(1,2)
9     Z(n,1) Z(n,2)
10    ];
11 Y1 = Z1^-1;
12 Zp = -1/Y1(1,2);
13 Yp1 = Y1(1,1) + Y1(1,2);
14 Yp2 = Y1(2,2) + Y1(1,2);
```

```
>> [Zp,Yp1,Yp2] = vod_pi('vod_1')
Zp =
   -1.8870e+02 - 2.0341e+01i
Yp1 =
    0.6350 - 0.2924i
Yp2 =
    0.6350 - 0.2924i
```

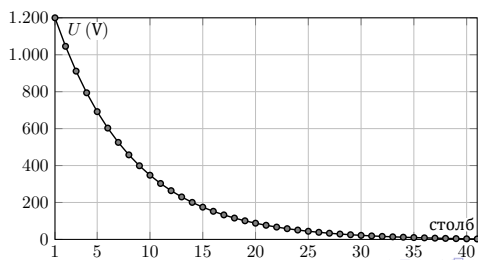
Navigation icons

Пример бв

```
../programi/vodovi/vod_naponi.m
```

```
1 function U = vod_naponi(datoteka,U1)
2 [Zv1,k,Z] = zvl_k(datoteka);
3 k = Z/Z(1);
4 U = k*U1;
```

```
>> U = vod_naponi('vod_1',1200);
>> abs(U([3 18]))
ans =
    911.1734
    115.6573
>> plot(abs(U))
```



MT (ПЕЕС)

33С

Сконје, 2017

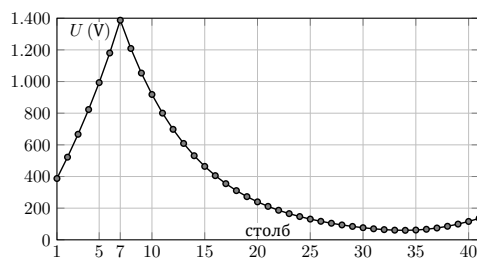
34 / 42

Пример бг

```
../programi/vodovi/vod_naponi_opsto.m
```

```
1 function U = vod_naponi_opsto(datoteka,Ik1,Ik2,k)
2 vod = feval(datoteka);
3 [Y,n] = mat_y(datoteka);
4 Y(1,1) = Y(1,1) + 1/vod.Zp;
5 Y(n,n) = Y(n,n) + 1/vod.Zq;
6 rf = 1 - vod.zm/vod.z;
7 Jp = (1-rf) * Ik1;
8 Jq = (1-rf) * Ik2;
9 Jk = rf * (Ik1 + Ik2);
10 I = zeros(n,1);
11 I(1) = Jp;
12 I(k) = Jk;
13 I(n) = Jq;
14 U = Y\I;
```

```
>> U = vod_naponi_opsto('vod_1',1700,1000,7);
```



MT (ПЕЕС)

33С

Сконје, 2017

35 / 42

Пример бд

$$\underline{Y} \cdot \underline{U} = \underline{I}$$

$$\underline{I}_1 = \frac{U_1 - U_n}{Z_P} + \underline{Y}_{P1} \cdot U_1$$

$$\underline{I}_n = \frac{U_n - U_1}{Z_P} + \underline{Y}_{P2} \cdot U_{41}$$

```
../programi/vodovi/vod_naponi_u1un.m
```

```
1 function U = vod_naponi_u1un(datoteka,U1,Un)
2 [Zp,Yp1,Yp2] = vod_pi(datoteka);
3 [Y,n] = mat_y(datoteka);
4 I = zeros(n,1);
5 I(1) = (U1-Un)/Zp + Yp1*U1;
6 I(n) = (Un-U1)/Zp + Yp2*Un;
7 U = Y\I;
```

```
>> U1 = 238*exp(1j*33.8/180*pi);
>> Un = 523*exp(-1j*8.6/180*pi);
>> U = vod_naponi_u1un('vod_1',U1,Un);
```

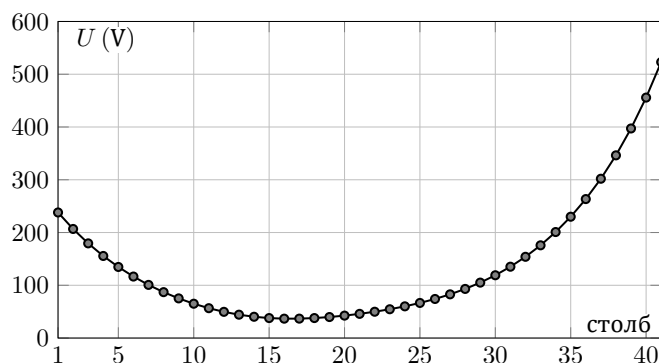
MT (ПЕЕС)

33С

Сконје, 2017

36 / 42

Пример 6д



Пример 7

Кај водот од примерот 6 е направено подобрување на заземјувачите на првите 5 столбови од почетокот на водот со што нивната отпорност е намалена на $R_S' = 5 \Omega$, додека останатите податоци за водот остануваат исти. Да се одреди

- Влезната (еквивалентната) импеданција на водот на неговиот почеток $\underline{Z}_{vl} = \frac{U_1}{I_1}$.
- Потенцијалот на заземјувачот во трафостаницата на почетокот од водот ако е познато дека во неа настанала еднофазна куса врска при што струјата изнесува $I_k = 3000$ A. Резултатите да се споредат со резултатите од примерот 6.
- Вредностите на елементите од π -заменската шема на водот.

Пример 7а

```
../programi/vodovi/vod_2.m
```

```
1 function vod = vod_2()  
2 vod.Rs = [5*ones(5,1); 10*ones(36,1)];  
3 vod.Zr = (0.141+1j*0.192)*ones(40,1);  
4 vod.Zp = 0.4;  
5 vod.Zq = 0.5;  
6 vod.z = 0.564 + 1j*0.767;  
7 vod.zm = 0.05 + 1j*0.354;
```

```
>> Zvl = zvl_k('vod_2')  
Zvl =  
0.9508 + 0.3758i
```

$$\underline{Z}_{vl} = 1,0223 \cdot e^{j21,6^\circ} \Omega$$

Модулот на влезната импеданција изнесува 71% од модулот на истата таа импеданција во примерот 6. Помалата влезна импеданција ќе доведе до течење на поголема струја кон самиот вод со што ќе се намали вредноста на струјата која што ќе оди во заземјувачот на трафостаницата.

Пример 7б

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_e \cdot I_k = \frac{\underline{Z}_{vl} \cdot \underline{Z}_p}{\underline{Z}_{vl} + \underline{Z}_p} \cdot I_k,$$

во Matlab е напишано на следниот начин

```
Ik = 3000;  
Zp = 0.4;  
Ze = Zp*Zvl/(Zp + Zvl);  
U = Ze*Ik  
U =  
 8.7017e+02 + 9.1753e+01i
```

ефективната вредност изнесува $U_1 = 875$ V.

Ако ја примениме истата постапка во примерот б, при истата вредност на струјата на куса врска, ќе добиеме $U_1 = 954$ V, што значи дека подобрувањето на заземјувачите на првите пет столбови придонесува кон намалување на напонот на мрежестиот заземјувач.

Navigation icons

MT (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017

40 / 42

Пример 7в

Елементите од π -заменската шема на водот ги добиваме на следниот начин

```
>> [Zp, Yp1, Yp2] = vod_pi('vod_2')  
Zp =  
 -2.0832e+02 - 4.4862e+01i  
Yp1 =  
 0.9143 - 0.3605i  
Yp2 =  
 0.6344 - 0.2928i
```

од каде што се забележува дека $Y_{P1} \neq Y_{P2}$ бидејќи водот е несиметричен поради нееднаквите отпорности на заземјување на неговите столбови.

Navigation icons

MT (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017

41 / 42

Задача 1

Да се пресмета потенцијалот на мрежестиот заземјувач на трафостаницата на почетокот од водот при еднофазна куса со струјата $I_k = 3000$ A ако е познато дека во таа трафостаница се поврзани два вода при што за нивните карактеристики се разгледуваат следните три случаи

- Двата вода имаат карактеристики како во примерот б,
- Двата вода имаат карактеристики како во примерот 7,
- Едниот вод има карактеристики како во примерот б, а другиот како во примерот 7.

Navigation icons

MT (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017

42 / 42

Заземјувачи и заземјувачки системи во електроенергетските мрежи

Електроенергетски кабли во заземјувачкиот СИСТЕМ

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

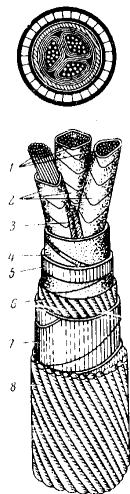
МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

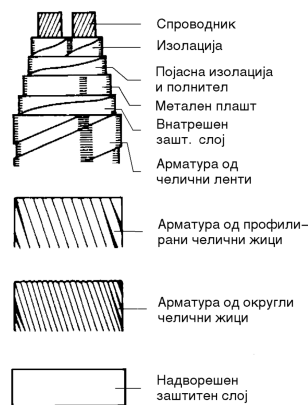
Скопје, 2017

1 / 45

Општо за електроенергетските кабли



а) појасен кабел – IPO 13



б) класичен кабел

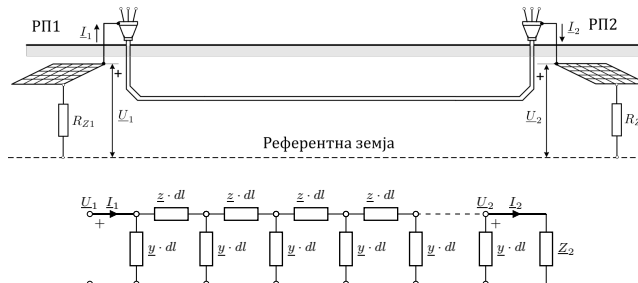
МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017

2 / 45

Кабли со неизолиран метален плашт



$$R_Z = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{h \cdot d_k}}$$

$$Y_Z = \frac{1}{R_Z} = \frac{\pi \cdot l}{\rho \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{h \cdot d_k}}}$$

$$y = g + jb = \frac{Y_Z}{l} = \frac{\pi}{\rho \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{h \cdot d_k}}}$$

МТ (ПЕЕС)

ЗЗС

Скопје, 2017

3 / 45

Кабли со неизолиран метален плашт

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot \operatorname{ch} \underline{\gamma} l + \underline{Z}_C \cdot \underline{I}_2 \cdot \operatorname{sh} \underline{\gamma} l,$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_C} \cdot \operatorname{sh} \underline{\gamma} l + \underline{I}_2 \cdot \operatorname{ch} \underline{\gamma} l.$$

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{z} \cdot \underline{y}} = \sqrt{(r + jx) \cdot g} = (\alpha + j\beta).$$

$$\underline{Z}_C = \sqrt{\frac{\underline{z}}{\underline{y}}} = \sqrt{\frac{r + jx}{g}}.$$

$$\underline{U}(x) = \underline{U}_2 \cdot \operatorname{ch} \underline{\gamma}(l - x) + \underline{Z}_C \cdot \underline{I}_2 \cdot \operatorname{sh} \underline{\gamma}(l - x),$$

$$\underline{I}(x) = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_C} \cdot \operatorname{sh} \underline{\gamma}(l - x) + \underline{I}_2 \cdot \operatorname{ch} \underline{\gamma}(l - x).$$

Navigation icons: back, forward, search, etc.

MT (ПЕЕС)

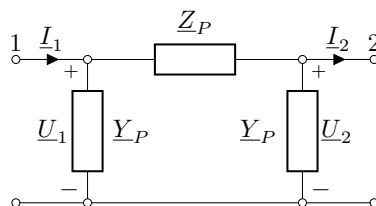
33C

Скопје, 2017 4 / 45

Кабли со неизолиран метален плашт, π -шема

$$\underline{Z}_P = \underline{Z}_C \cdot \operatorname{sh} \underline{\gamma} l,$$

$$\underline{Y}_P = \frac{\operatorname{ch} \underline{\gamma} l - 1}{\underline{Z}_C \cdot \operatorname{sh} \underline{\gamma} l}$$



Navigation icons: back, forward, search, etc.

MT (ПЕЕС)

33C

Скопје, 2017 5 / 45

Влезна импеданција и изнесен потенцијал

$$k_i = \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = \frac{1}{\operatorname{ch}(\underline{\gamma} l) + \frac{\underline{Z}_C}{\underline{Z}_2} \cdot \operatorname{sh}(\underline{\gamma} l)}.$$

$$\underline{Z}_{v1} = \underline{Z}_C \cdot \frac{\operatorname{ch}(\underline{\gamma} l) + \frac{\underline{Z}_C}{\underline{Z}_2} \cdot \operatorname{sh}(\underline{\gamma} l)}{\operatorname{sh}(\underline{\gamma} l) + \frac{\underline{Z}_C}{\underline{Z}_2} \cdot \operatorname{ch}(\underline{\gamma} l)}.$$

„Долги“ кабли

$$l > l_d = 70 \cdot \sqrt{\rho}, \quad (\text{m})$$

$$k_i \approx \frac{2 \cdot e^{-\alpha l}}{|1 + \underline{Z}_C / \underline{Z}_2|},$$

$$\underline{Z}_{v1} \approx \underline{Z}_C.$$

Navigation icons: back, forward, search, etc.

MT (ПЕЕС)

33C

Скопје, 2017 6 / 45

Влезна импеданција и изнесен потенцијал

„Куси“ кабли

$$|\gamma| \cdot l_k^2 = 2 \cdot \varepsilon.$$

$$k_i \approx \frac{1}{\left|1 + \frac{z \cdot l}{Z_2}\right|},$$

$$Z_{ol} \approx \frac{Z_2 + z \cdot l}{1 + Z_2 \cdot g \cdot l} = \frac{Z_2 + z \cdot l}{1 + Z_2/R_Z}.$$

Navigation icons

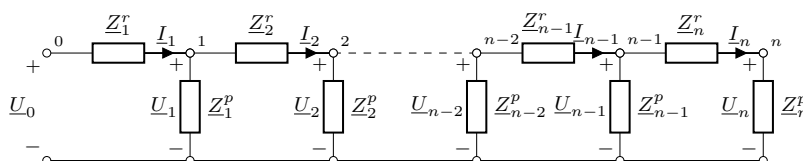
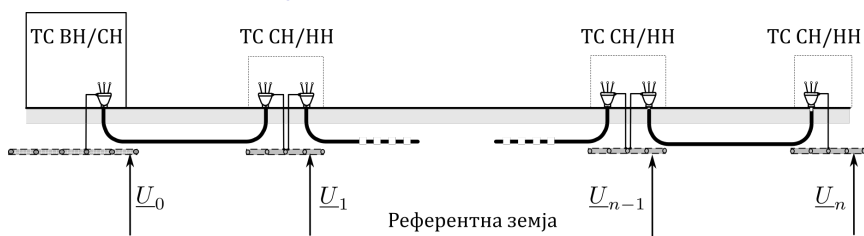
MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

7 / 45

Кабли со изолиран метален плашт



$$Z_j^r = z \cdot l_j = (r + jx) \cdot l_j,$$

Navigation icons

MT (ПЕЕС)

33С

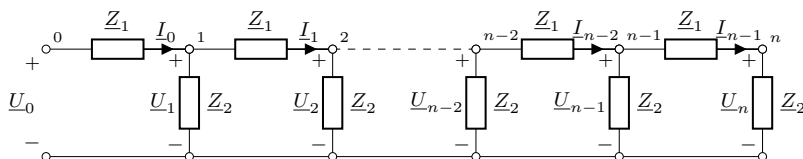
Скопје, 2017

8 / 45

Кабли со изолиран метален плашт – идеализиран случај

$$Z_1^r = Z_2^r = \dots = Z_n^r = Z_1.$$

$$Z_1^p = Z_2^p = \dots = Z_n^p = Z_2.$$



Navigation icons

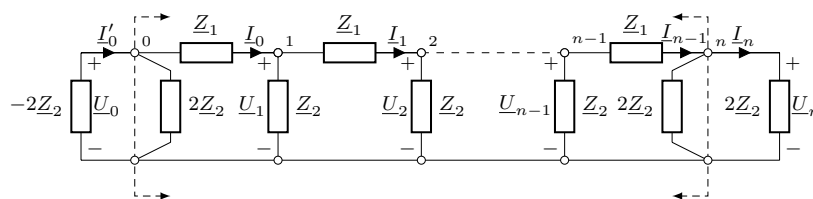
MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

9 / 45

Кабли со изолиран метален плашт – идеализиран случај



$$\underline{U}_0 = \underline{U}_n \cdot \text{ch}(n\underline{g}) + \underline{Z} \cdot \underline{I}_n \cdot \text{sh}(n\underline{g}),$$

$$\underline{I}_0 = \frac{\underline{U}_n}{\underline{Z}} \cdot \text{sh}(n\underline{g}) + \underline{I}_n \cdot \text{ch}(n\underline{g}).$$

$$\underline{g} = \ln \left(1 + \frac{\underline{Z}_1}{2\underline{Z}_2} + \sqrt{2 \cdot \frac{\underline{Z}_1}{2\underline{Z}_2} + \frac{\underline{Z}_1^2}{4\underline{Z}_2^2}} \right),$$

$$\underline{Z} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_1 \cdot 2\underline{Z}_2}{2 + \frac{\underline{Z}_1}{2\underline{Z}_2}}} = \frac{\underline{Z}_1}{\sqrt{2 \cdot \frac{\underline{Z}_1}{2\underline{Z}_2} + \frac{\underline{Z}_1^2}{4\underline{Z}_2^2}}}.$$

MT (PEEC)

33C

Kronje, 2017

10 / 45

Кабли со изолиран метален плашт – идеализиран случај

$$\underline{I}_n = \frac{\underline{U}_n}{2\underline{Z}_2},$$

$$\underline{U}_0 = \underline{U}_n \left[\text{ch}(n\underline{g}) + \frac{\underline{Z}}{2\underline{Z}_2} \cdot \text{sh}(n\underline{g}) \right],$$

$$\underline{U}_n = \frac{\underline{U}_0}{\text{ch}(n\underline{g}) + \frac{\underline{Z}}{2\underline{Z}_2} \cdot \text{sh}(n\underline{g})}.$$

$$\underline{U}_k = \underline{U}_n \left[\text{ch}(n-k)\underline{g} + \frac{\underline{Z}}{2\underline{Z}_2} \cdot \text{sh}(n-k)\underline{g} \right], \quad k = 1, 2, \dots, n.$$

$$u(k) = \frac{|\underline{U}_k|}{|\underline{U}_0|} = \frac{\left| \text{ch}(n-k)\underline{g} + \frac{\underline{Z}}{2\underline{Z}_2} \cdot \text{sh}(n-k)\underline{g} \right|}{\left| \text{ch}(n\underline{g}) + \frac{\underline{Z}}{2\underline{Z}_2} \cdot \text{sh}(n\underline{g}) \right|}.$$

MT (PEEC)

33C

Kronje, 2017

11 / 45

Кабли со изолиран метален плашт – идеализиран случај

$$\underline{I}_0 = \frac{\underline{U}_0 - \underline{U}_1}{\underline{Z}_1},$$

$$\underline{Z}_{vl} = \frac{\underline{U}_0}{\underline{I}_0}.$$

$$\underline{Y}_{vl} = \frac{1}{\underline{Z}_1} \cdot \frac{\text{sh}(n\underline{g}) + \frac{\underline{Z}}{2\underline{Z}_2} \cdot \text{ch}(n\underline{g})}{\text{ch}(n\underline{g}) + \frac{\underline{Z}}{2\underline{Z}_2} \cdot \text{sh}(n\underline{g})} - \frac{1}{2\underline{Z}_2}; \quad \underline{Z}_{vl} = \frac{1}{\underline{Y}_{vl}}.$$

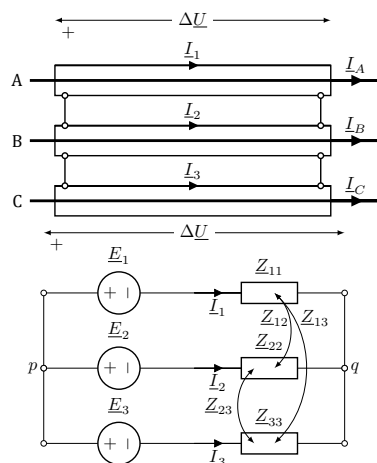
MT (PEEC)

33C

Kronje, 2017

12 / 45

Егзактен модел со уважување на индуктивните спреги



$$\Delta \underline{U} = \underline{U}_p - \underline{U}_q = \underline{E} + \underline{Z} \cdot \underline{I}.$$

MT (ПЕЕС)

33C

Скопје, 2017

13 / 45

Егзактен модел со уважување на индуктивните спреги

$$\underline{Z}_{ij} = 0,05 \cdot l + j \cdot 0,1445 \cdot \log \frac{D_{ek}}{d_{ij}} \cdot l; \quad i, j = 1, 2, 3; \quad j \neq i,$$

$$\underline{Z}_{ii} = 0,05 \cdot l + r_e \cdot l + j \cdot 0,1445 \cdot \log \frac{D_{ek}}{d_e/2} \cdot l; \quad i = 1, 2, 3.$$

$$\underline{E}_i = \underline{M}_{iA} \cdot \underline{I}_A + \underline{M}_{iB} \cdot \underline{I}_B + \underline{M}_{iC} \cdot \underline{I}_C; \quad i = 1, 2, 3.$$

$$\underline{I} = \underline{Z}^{-1} \cdot (\Delta \underline{U} - \underline{E}).$$

$$\underline{Z}_e = \frac{\Delta \underline{U}}{\sum_{i=1}^3 \underline{I}_i}.$$

$$\Delta \underline{U} = \Delta U \cdot [1 \quad 1 \quad 1]^T, \quad \underline{E} = 0$$

$$\underline{I} = \Delta U \cdot \underline{Z}^{-1} \cdot [1 \quad 1 \quad 1]^T.$$

MT (ПЕЕС)

33C

Скопје, 2017

14 / 45

Егзактен модел со уважување на индуктивните спреги

$$\underline{Y} = \underline{Z}^{-1}$$

$$\underline{I} = \Delta \underline{U} \cdot \left[\sum_{j=1}^3 \underline{Y}_{1j} \quad \sum_{j=1}^3 \underline{Y}_{2j} \quad \sum_{j=1}^3 \underline{Y}_{3j} \right]^T,$$

$$\underline{Z}_e = \frac{1}{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \underline{Y}_{ij}}.$$

$$\underline{J} = \underline{Y} \cdot \underline{E},$$

$$\underline{J}_i = \sum_{j=1}^3 \underline{Y}_{ij} \cdot \underline{E}_j, \quad i = 1, 2, 3.$$

$$\underline{J}_e = \sum_{i=1}^3 \underline{J}_i = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \underline{Y}_{ij} \cdot \underline{E}_j.$$

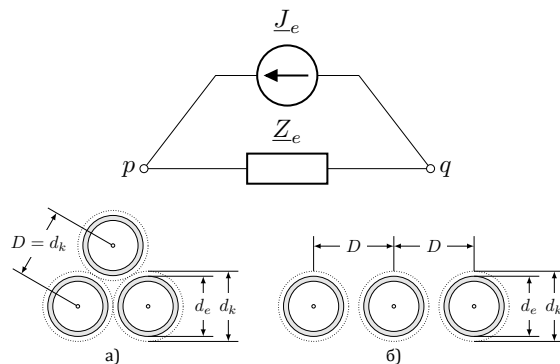
MT (ПЕЕС)

33C

Скопје, 2017

15 / 45

Егзактен модел со уважување на индуктивните спреги



Триаголен распоред

$$\underline{Z} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_s & \underline{Z}_m & \underline{Z}_m \\ \underline{Z}_m & \underline{Z}_s & \underline{Z}_m \\ \underline{Z}_m & \underline{Z}_m & \underline{Z}_s \end{bmatrix},$$

Егзактен модел со уважување на индуктивните спреги

Триаголен распоред

$$\underline{Z}_s = \left(0,05 + r_e + j \cdot 0,1445 \cdot \log \frac{D_{ek}}{d_e/2} \right) \cdot l,$$

$$\underline{Z}_m = \left(0,05 + j \cdot 0,1445 \cdot \log \frac{D_{ek}}{D} \right) \cdot l.$$

$$\underline{Z}_e = \frac{\underline{Z}_s + 2 \cdot \underline{Z}_m}{3},$$

$$\underline{J}_e = \frac{\underline{M}_s + 2 \cdot \underline{M}_m}{\underline{Z}_s + 2 \cdot \underline{Z}_m} \cdot I_{KV},$$

$$\underline{E}_e = \underline{Z}_e \cdot \underline{J}_e = \frac{\underline{M}_s + 2 \cdot \underline{M}_m}{3} \cdot I_{KV}.$$

$$r_f = \frac{I_{KV} - \underline{J}_e}{I_{KV}} = 1 - \frac{\underline{J}_e}{I_{KV}} = 1 - \frac{\underline{M}_s + 2 \cdot \underline{M}_m}{\underline{Z}_s + 2 \cdot \underline{Z}_m}.$$

Егзактен модел со уважување на индуктивните спреги

Хоризонтален распоред

$$\underline{Z} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_s & \underline{Z}_{m1} & \underline{Z}_{m2} \\ \underline{Z}_{m1} & \underline{Z}_s & \underline{Z}_{m1} \\ \underline{Z}_{m2} & \underline{Z}_{m1} & \underline{Z}_s \end{bmatrix},$$

$$\underline{Z}_s = \left(0,05 + r_e + 0,1445 \cdot \log \frac{D_{ek}}{d_e/2} \right) \cdot l,$$

$$\underline{Z}_{m1} = \left(0,05 + 0,1445 \cdot \log \frac{D_{ek}}{D} \right) \cdot l,$$

$$\underline{Z}_{m2} = \left(0,05 + 0,1445 \cdot \log \frac{D_{ek}}{2D} \right) \cdot l.$$

Егзактен модел со уважување на индуктивните спреги

Хоризонтален распоред

$$Z_e = Z_s - \frac{2 \cdot (Z_s - Z_{m1})^2}{3Z_s - 4Z_{m1} + Z_{m2}}$$

$$J_e = I_{KV} \cdot \frac{Z_{m2} \cdot M_1 + Z_s \cdot (M_s + M_{m1} + M_{m2})}{Z_s^2 - 2Z_{m1}^2 + Z_s \cdot Z_{m2}} - I_{KV} \cdot Z_{m1} \cdot \frac{(M_s + 2M_{m1} + M_{m2})}{Z_s^2 - 2Z_{m1}^2 + Z_s \cdot Z_{m2}}$$

$$r_f = 1 - \frac{J_e}{I_{KV}} = 1 - \frac{Z_{m2} \cdot M_1 + Z_s \cdot (M_s + M_{m1} + M_{m2})}{Z_s^2 - 2Z_{m1}^2 + Z_s \cdot Z_{m2}} + Z_{m1} \cdot \frac{(M_s + 2M_{m1} + M_{m2})}{Z_s^2 - 2Z_{m1}^2 + Z_s \cdot Z_{m2}}$$

МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 19 / 45

Пример 1

Еден 10 kV кабел од типот IPO 13 3×95 6/10 kV и со должина $l = 0,75$ km е положен во земја со $\rho = 100 \Omega\text{m}$ на длабочина $h = 0,7$ m. Надворешниот пречник на кабелот изнесува $d_k = 4,5$ cm. На крајот од кабелот е приклучена ТС СH/НН со импеданција на заштитното заземјување изнесува $Z_2 = R_2 = 5 \Omega$. Импеданција по единица должина на металниот плашт заедно со челичната арматура е $z = (0,7 + j2) \Omega/\text{km}$. Потребно е да се пресмета

- влезната импеданција на кабелот Z_{vl} ;
- граничната должина l_d после која кабелот може да се смета за долг;
- коефициентот на изнесување на потенцијалот k_j ;
- параметрите Z_P и Y_P на π -заменската шема на кабелот.



МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 20 / 45

Пример 1

$$R_Z = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{h \cdot d_k}} = \frac{100}{\pi \cdot 750} \cdot \ln \frac{750}{\sqrt{0,7 \cdot 0,045}} = 0,354 \Omega;$$

$$Y_Z = \frac{1}{R_Z} = 2,822 \text{ S};$$

$$\underline{y} = g = \frac{Y_Z}{l} = \frac{2,822}{0,75} = 3,763 \frac{\text{S}}{\text{km}}.$$

$$\underline{\gamma} = \sqrt{z \cdot \underline{y}} = \sqrt{(0,7 + j2) \cdot 3,763} = (2,303 + j1,634) \text{ km}^{-1};$$

$$Z_C = \sqrt{\frac{z}{\underline{y}}} = \sqrt{\frac{0,7 + j2}{3,763}} = (0,612 + j0,434) \Omega = 0,75 \cdot e^{j35,4^\circ} \Omega.$$

$$Z_{v1} = Z_C \cdot \frac{\text{ch}(\underline{\gamma}l) + \frac{Z_C}{Z_2} \cdot \text{sh}(\underline{\gamma}l)}{\text{sh}(\underline{\gamma}l) + \frac{Z_C}{Z_2} \cdot \text{ch}(\underline{\gamma}l)} = (0,596 + j0,401) \Omega = 0,719 \cdot e^{j34^\circ} \Omega.$$

МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 21 / 45

Пример 1

$$l_d = -\frac{\ln \varepsilon}{2\alpha} = -\frac{\ln 0,05}{2 \cdot 2,303} = 0,65 \text{ km.}$$

$$\underline{k}_i = \frac{1}{\text{ch}(\underline{\gamma}l) + \frac{\underline{Z}_C}{\underline{Z}_2} \cdot \text{sh}(\underline{\gamma}l)} = (0,089 - j0,31) = 0,323 \cdot e^{-j73,9^\circ}.$$

$$\underline{k}_i \approx \frac{2 \cdot e^{-\alpha l}}{|1 + \underline{Z}_C/\underline{Z}_2|} = \frac{2 \cdot e^{-2,303 \cdot 0,75}}{1,12576} = \frac{0,3556}{1,12576} = 0,316,$$

$$\underline{Z}_{vl} \approx \underline{Z}_C = (0,612 + j0,434) \Omega = 0,75 \cdot e^{j35,4^\circ} \Omega.$$

$$\underline{Z}_P = \underline{Z}_C \cdot \text{sh} \underline{\gamma}l = (-0,6211 + j2,0713) = 2,162 \cdot e^{j106,7^\circ},$$

$$\underline{Y}_P = \frac{\text{ch} \underline{\gamma}l - 1}{\underline{Z}_C \cdot \text{sh} \underline{\gamma}l} = 1,185 \cdot e^{-j16,3^\circ} \text{ S.}$$

MT (PEEC)

33C

Скопје, 2017

22 / 45

Пример 1

```
../programi/kabli/neizolian_param.m
```

```
1 function [Zvl,k,Zp,Yp] = neizolian_param(rho,l,h,dk,z,Z2)
2 Rz = rho/(pi*l*1000)*log(l*1000/sqrt(h*dk));
3 g = 1/(Rz*l);
4 gama = sqrt(z*g);
5 Zc = sqrt(z/g);
6 Zvl = Zc*(cosh(gama*l) + Zc/Z2*sinh(gama*l)) ...
7 / (sinh(gama*l) + Zc/Z2*cosh(gama*l));
8 k = 1/(cosh(gama*l) + Zc/Z2*sinh(gama*l));
9 Zp = Zc*sinh(gama*l);
10 Yp = (cosh(gama*l)-1)/Zp;
```

```
>> [Zvl,k,Zp,Yp] = neizolian_param(100,0.75,0.7,0.045,0.7+2j,5)
Zvl = 0.5962 + 0.4015i
k = 0.0894 - 0.3101i
Zp = -0.6211 + 2.0713i
Yp = 1.1376 - 0.3326i
```

MT (PEEC)

33C

Скопје, 2017

23 / 45

Пример 2

Да се пресмета вредноста на влезната импеданција \underline{Z}_{vl} на кабелот од претходниот пример за случајот кога неговата челична арматура е во заситена состојба така што неговата надолжна импеданција изнесува $z = (0,7 + j0,7) \Omega/\text{km}$. Колкав ќе биде коефициентот на изнесениот потенцијал \underline{k}_i во овој случај?

```
>> [Zvl,k,Zp,Yp] = neizolian_param(100,0.75,0.7,0.045,0.7+0.7j,5)
Zvl =
0.5133 + 0.1515i
k =
0.4025 - 0.2402i
Zp =
0.5044 + 0.8035i
Yp =
1.2426 - 0.1301i
```

$$\underline{Z}_{vl} = 0,535 \cdot e^{j16,4^\circ} \Omega; \quad \underline{k}_i = 0,469 \cdot e^{-j30,8^\circ},$$

MT (PEEC)

33C

Скопје, 2017

24 / 45

Пример 3

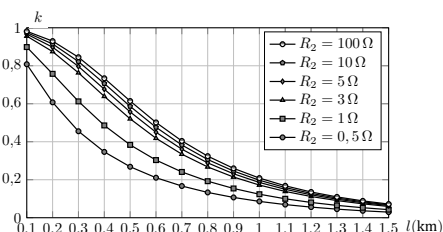
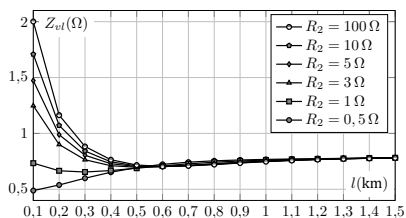
Да се пресмета зависноста на Z_{vl} од должината l на кабелот од примерот 1 при $\underline{z} = (0,7 + j2) \Omega$ и $R_2 \in \{0,5; 1; 3; 5; 10; 100\} \Omega$.

../programi/kabli/kabel_3.m

```

1 clear;
2 l = (0.1:0.1:1.5)';
3 Z2 = [0.5 1 3 5 10 100]';
4 for i = 1:length(l)
5     for j = 1:length(Z2)
6         [Zvl(i,j),k(i,j)] = ...
7             neizolian_param(100,l(i),0.7,0.045,0.7+2j,Z2(j));
8     end
9 end
10 figure; plot(l,abs(Zvl)); grid;
11 figure; plot(l,abs(k)); grid;

```



МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

25 / 45

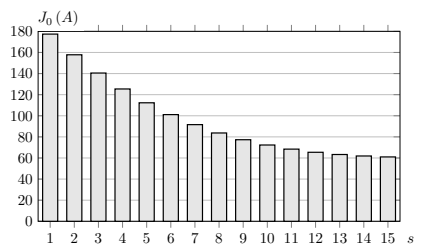
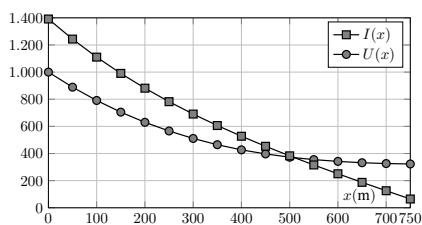
Пример 4

За кабелот од примерот 1 е познат напонот $U_1 = 1000$ V. Да се пресметаат $I(x)$ и $U(x)$, како и струјата на одведување во земјата од плаштот $J_0(x)$.

$$U(x) = U_1 \cdot \text{ch}\gamma x - \underline{Z}_C \cdot \underline{I}_1 \cdot \text{sh}\gamma x,$$

$$\underline{I}(x) = -\frac{U_1}{\underline{Z}_C} \cdot \text{sh}\gamma x + \underline{I}_1 \cdot \text{ch}\gamma x.$$

$$\underline{I}_1 = \frac{U_1}{\underline{Z}_{vl}} = \frac{1000}{0,719 \cdot e^{j34^\circ}} = (1154 - j777,1) = 1391,3 \cdot e^{-j34^\circ} \text{ A.}$$



МТ (ПЕЕС)

33С

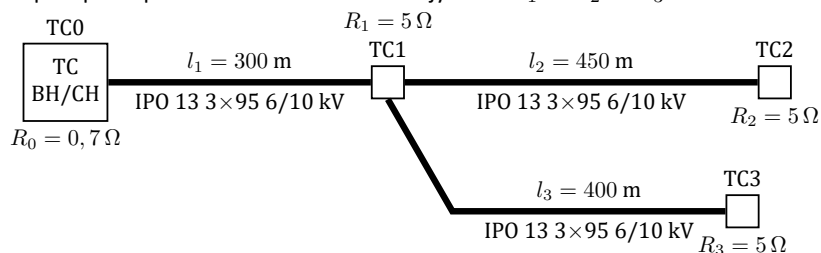
Скопје, 2017

26 / 45

Пример 5

Во делница долга $l = 750$ m (пример 1) се вметнува ТС1 на растојание $l_1 = 300$ m од почетокот. Од ТС1 се полага кабел кон ТС3 со должина $l_3 = 400$ m. Да се пресмета влезната импеданција на почетокот на кабелскиот извод $Z_{vl.1}$.

Колкави се струите и напоните во заземјувачкиот систем од прикажаната кабелска мрежа за случајот кога во мрежестиот заземјувач од ТС ВН/СН, чија што отпорност на распространување изнесува $R_0 = 0,7 \Omega$, се инјектира струја на доземен спој $J_0 = 1$ kA. Сите ТС СН/НН имаат исти вредности на отпорностите на распространување на заштитното заземјување $R_1 = R_2 = R_3 = 5 \Omega$.



МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

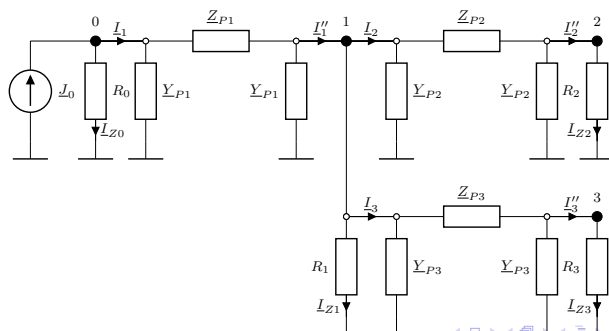
27 / 45

Пример 5

Секција	$Z_P (\Omega)$	$Y_P (S)$
ТС0 – ТС1	$0, 14034 + j0, 65136$	$0, 61750 - j0, 03790$
ТС1 – ТС2	$0, 08167 + j1, 05700$	$0, 84507 - j0, 10671$
ТС1 – ТС3	$0, 11637 + j0, 91395$	$0, 77440 - j0, 07954$

$$Z_{vl.2} = (0, 64594 + j0, 29855) = 0, 7116 \cdot e^{j24,8^\circ} \Omega; \quad k_{i.2} = 0, 616 \cdot e^{-j42,4^\circ}$$

$$Z_{vl.3} = (0, 67522 + j0, 27401) = 0, 72870 \cdot e^{j22,1^\circ} \Omega; \quad k_{i.3} = 0, 677 \cdot e^{-j36,6^\circ}$$



MT (PEEC)

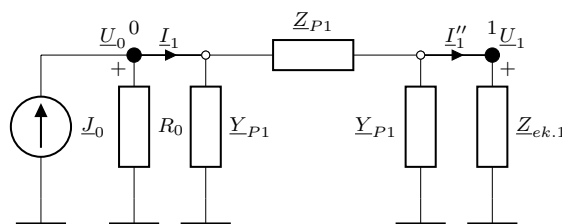
33C

Скопје, 2017

28 / 45

Пример 5

$$Z_{ek.1} = Z_{vl.2} \parallel Z_{vl.3} \parallel R_1 = (0, 31327 + j0, 12607) = 0, 33768 \cdot e^{j21,9^\circ} \Omega.$$



$$Z_{vl.1} = Z_C \cdot \frac{\text{ch}(\underline{\gamma}l_1) + \frac{Z_C}{Z_2} \cdot \text{sh}(\underline{\gamma}l_1)}{\text{sh}(\underline{\gamma}l_1) + \frac{Z_C}{Z_2} \cdot \text{ch}(\underline{\gamma}l_1)} = (0, 46317 + j0, 41965) =$$

$$= 0, 62501 \cdot e^{j42,2^\circ} \Omega,$$

MT (PEEC)

33C

Скопје, 2017

29 / 45

Пример 5

$$k_{i.1} = \frac{1}{\text{ch}(\underline{\gamma}l_1) + \frac{Z_C}{Z_{ek.1}} \cdot \text{sh}(\underline{\gamma}l_1)} = (0, 24523 - j0, 22466) = 0, 3326 \cdot e^{-j42,5^\circ}.$$

$$Z_{ek} = R_0 \parallel Z_{vl.1} = 0, 7 \parallel 0, 62501 \cdot e^{j42,2^\circ} = 0, 35381 \cdot e^{j22,34^\circ} \Omega;$$

$$U_0 = Z_{ek} \cdot I_0 = 353, 81 \cdot e^{j22,34^\circ} \text{ V}.$$

$$I_1 = \frac{U_0}{Z_{ek}} = \frac{353, 81 \cdot e^{j22,34^\circ}}{0, 62501 \cdot e^{j42,2^\circ}} = 566, 084 \cdot e^{-j19,86^\circ} \text{ A};$$

$$U_1 = k_{i.1} \cdot U_0 = 0, 3326 \cdot e^{-j42,5^\circ} \cdot 353, 81 \cdot e^{j22,34^\circ} = 117, 7 \cdot e^{-j20,16^\circ} \text{ V};$$

$$I_2 = \frac{U_1}{Z_{vl.2}} = \frac{117, 7 \cdot e^{-j20,16^\circ}}{0, 7116 \cdot e^{j24,8^\circ}} = 165, 4 \cdot e^{-j44,96^\circ} \text{ A};$$

$$U_2 = k_{i.2} \cdot U_1 = 0, 616 \cdot e^{-j42,4^\circ} \cdot 117, 7 \cdot e^{j22,34^\circ} = 72, 5 \cdot e^{-j20,06^\circ} \text{ V};$$

$$I_3 = \frac{U_1}{Z_{vl.3}} = \frac{117, 7 \cdot e^{-j20,16^\circ}}{0, 7287 \cdot e^{j22,1^\circ}} = 161, 5 \cdot e^{-j42,26^\circ} \text{ A};$$

$$U_3 = k_{i.3} \cdot U_1 = 0, 677 \cdot e^{-j36,6^\circ} \cdot 117, 7 \cdot e^{j22,34^\circ} = 79, 7 \cdot e^{-j14,26^\circ} \text{ V}.$$

MT (PEEC)

33C

Скопје, 2017

30 / 45

Пример 5

$$I_{Z0} = U_0/R_0 = 353,81/0,7 = 505,44 \text{ A};$$

$$I_{Z1} = U_1/R_1 = 117,7/5 = 23,54 \text{ A};$$

$$I_{Z2} = U_2/R_2 = 72,5/5 = 14,5 \text{ A};$$

$$I_{Z3} = U_3/R_3 = 79,7/5 = 15,94 \text{ A}.$$

MT (ПЕЕС)

33C

Скопје, 2017

31 / 45

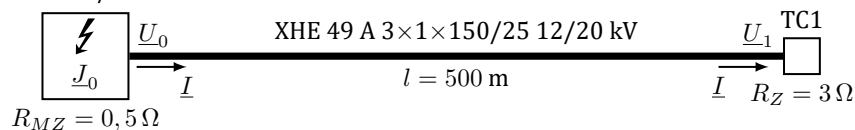
Пример 6

Трифазен кабелски вод со полиетиленска изолација, тип ХНЕ 49 А 3×1×150/25 12/20 kV, со должина $l = 500$ m напојува ТС СН/НН. За него се знае

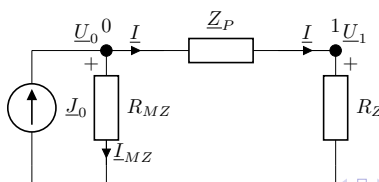
$$z = 0,29 + j0,668 = 0,728 \cdot e^{j66,5^\circ} \frac{\Omega}{\text{km}}. \quad (1)$$

Да се пресмета струјата I на почетокот од кабелот ако $U_0 = 1000$ V.

ТС ВН/СН



$$Z_P = z \cdot l, \quad Y_P = 0.$$



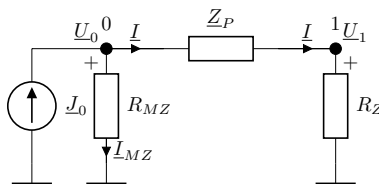
MT (ПЕЕС)

33C

Скопје, 2017

32 / 45

Пример 6



$$U_1 = \frac{R_Z}{Z_P + R_Z} \cdot U_0 = \frac{3}{3,145 + j0,334} \cdot 1000 =$$

$$= (943,3 - j100,1) = 948,6 \cdot e^{-j6,1^\circ} \text{ V};$$

$$I = \frac{U_0}{Z_P + R_Z} = \frac{1000}{3,145 + j0,334} = (314,4 - j33,4) = 316,2 \cdot e^{-j6,1^\circ} \text{ A}.$$

$$J_0 = I_{MZ} + I = \frac{U_0}{R_{MZ}} + I = \frac{1000}{0,5} + (314,4 - j33,4) =$$

$$= (2314,4 - j33,4) = 2315 \cdot e^{-j0,83^\circ} \text{ A}.$$

MT (ПЕЕС)

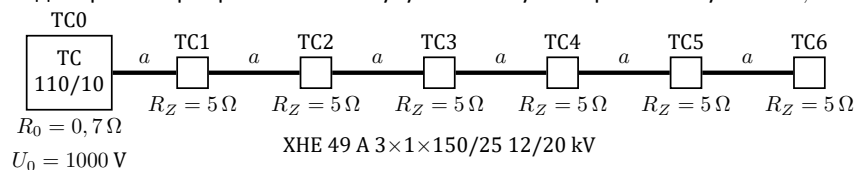
33C

Скопје, 2017

33 / 45

Пример 7

Еден 10 kV кабелски извод, изведен со кабел тип ХНЕ 49 А 3×1×150/25 12/20 kV, напојува $n = 6$ ТС СН/НН при што е познато $\underline{z} \cdot a = (0,145 + j0,334) \Omega$. Секоја ТС СН/НН има заземјувач со $\rho = 100 \Omega$; $R_Z = 5 \Omega$; $E_{d,max} = 7,0\%$; $E_{c,max} = 14\%$. Познат е $U_0 = 1000 \text{ V}$. Да се пресметаат потенцијалите \underline{U}_k ($k = 1, 2, \dots, n$) што ги примаат заземјувачите на ТС СН/НН како и напоните на допир и чекор. Времето на исклучување на кусата врска извесува $t = 0,5 \text{ s}$.



$$\underline{U}_0 = \underline{U}_n \cdot \text{ch}(ng) + \underline{Z}_C \cdot \underline{I}_n \cdot \text{sh}(ng),$$

$$\underline{I}_0 = \frac{\underline{U}_n}{\underline{Z}_C} \cdot \text{sh}(ng) + \underline{I}_n \cdot \text{ch}(ng).$$

Пример 7

$$\frac{\underline{Z}}{2R_Z} = \lambda = \frac{0,145 + j0,334}{10} = (0,0145 + j0,0344) = 0,0364 \cdot e^{j66,5^\circ};$$

$$g = \ln \left(1 + \lambda + \sqrt{2 \cdot \lambda + \lambda^2} \right) = (0,2258 + j0,1472) = 0,2695 \cdot e^{j33,1^\circ};$$

$$\underline{Z}_C = \frac{\underline{Z}}{\sqrt{2 \cdot \lambda + \lambda^2}} = (1,1301 + j0,7281) = 1,3443 \cdot e^{j32,8^\circ} \Omega.$$

$$e^{ng} = (2,4592 + j2,9950) = 3,8753 \cdot e^{j50,6^\circ};$$

$$e^{-ng} = (0,1638 - j0,1994) = 0,2580 \cdot e^{-j50,6^\circ};$$

$$\text{ch}(ng) = \frac{e^{ng} + e^{-ng}}{2} = (1,3115 + j1,3978) = 1,9167 \cdot e^{j46,8^\circ};$$

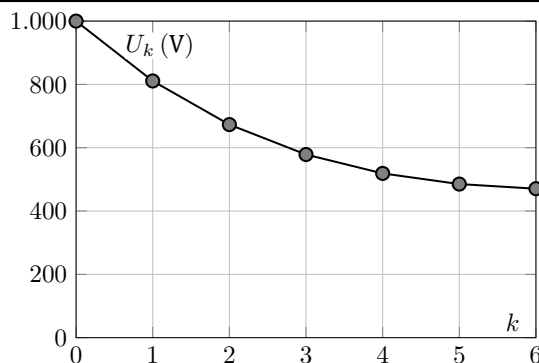
$$\text{sh}(ng) = \frac{e^{ng} - e^{-ng}}{2} = (1,1477 + j1,5972) = 1,9668 \cdot e^{j54,3^\circ}.$$

$$\underline{U}_n = \frac{\underline{U}_0}{\text{ch}ng + \frac{\underline{Z}}{2R_Z} \cdot \text{sh}ng} = (293,4 - j367,9) = 470,5 \cdot e^{-j51,5^\circ} \text{ V},$$

$$\underline{U}_k = \underline{U}_n \cdot \left[\text{ch}(n-k)g + \frac{\underline{Z}}{2R_Z} \cdot \text{sh}(n-k) \cdot g \right], \quad k = 1, 2, \dots, n-1.$$

Пример 7

\underline{U}_0 $1000 \cdot e^{j0^\circ}$	\underline{U}_1 $810,9 \cdot e^{-j13,5^\circ}$	\underline{U}_2 $673,1 \cdot e^{-j21,0^\circ}$	\underline{U}_3 $578,5 \cdot e^{-j31,5^\circ}$
	\underline{U}_4 $518,9 \cdot e^{-j40,8^\circ}$	\underline{U}_5 $485,2 \cdot e^{-j47,7^\circ}$	\underline{U}_6 $470,5 \cdot e^{-j51,4^\circ}$



Пример 7

$$I_0 = \frac{U_0 - U_1}{Z_1} = (586,5 - j350,7) = 683,3 \cdot e^{-j30,9^\circ} \text{ A.}$$

$$Z_{vl} = \frac{U_0}{I_0} = (1,256 + j0,751) = 1,463 \cdot e^{j30,9^\circ} \Omega.$$

$$E_{c.\max} = 0,14 \cdot U_1 = 0,14 \cdot 810,9 = 113,5$$

$$s_c = 1 + 6 \cdot \frac{\rho}{1000} = 1 + 6 \cdot \frac{125}{1000} = 1,75;$$

$$U_{c.\max} = \frac{E_{c.\max}}{s_c} = \frac{113,5}{1,75} = 64,9 < 80 \text{ V.}$$

МТ (ПЕЕС)

33С

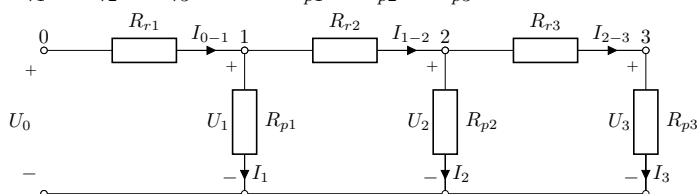
Скопје, 2017

37 / 45

Пример 8

Да се реши претходниот пример со постапката за решавање на електрични кола во форма на скала.

Прво ќе го решиме следното коло за кое се познати $U_0 = 100 \text{ V}$, $R_{r1} = R_{r2} = R_{r3} = 2 \Omega$ и $R_{p1} = R_{p2} = R_{p3} = 1 \Omega$.



$$I_3 = 1 \text{ A,}$$

$$U_3 = R_{p3} \cdot I_3 = 1 \text{ V.}$$

$$I_{2-3} = I_3 = 1 \text{ A;}$$

$$U_2 = U_3 + R_{r3} \cdot I_{2-3} = 1 + 2 \cdot 1 = 3 \text{ V;}$$

$$I_2 = U_2 / R_{p2} = 3 / 1 = 3 \text{ A.}$$

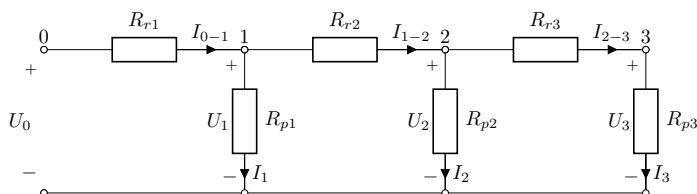
МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

38 / 45

Пример 8



$$I_{1-2} = I_2 + I_{2-3} = 3 + 1 = 4 \text{ A;}$$

$$U_1 = U_2 + R_{r2} \cdot I_{1-2} = 3 + 2 \cdot 4 = 11 \text{ V;}$$

$$I_1 = U_1 / R_{p1} = 11 / 1 = 11 \text{ A.}$$

$$I_{0-1} = I_1 + I_{1-2} = 11 + 4 = 15 \text{ A;}$$

$$U_0 = U_1 + R_{r1} \cdot I_{0-1} = 11 + 2 \cdot 15 = 41 \text{ V.}$$

Претпоставка $I_3 = 1 \text{ A}$ не е точна бидејќи не добивме $U_0 = 100 \text{ V}$, при што сме направиле грешка во пресметките за $100 / 41 = 2,439$ пати.

МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

39 / 45

Пример 8

$$U_0 = 100/41 \cdot 41 = 100 \text{ V};$$

$$U_1 = 100/41 \cdot 11 = 26,8293 \text{ V};$$

$$U_2 = 100/41 \cdot 3 = 7,3171 \text{ V};$$

$$U_3 = 100/41 \cdot 1 = 2,4390 \text{ V}.$$

$$I_1 = 26,8293 \text{ A};$$

$$I_{0-1} = 36,5854 \text{ A};$$

$$I_2 = 7,3171 \text{ A};$$

$$I_{1-2} = 9,7561 \text{ A};$$

$$I_3 = 2,4390 \text{ A};$$

$$I_{2-3} = 2,4390 \text{ A}.$$

$$R_{vl} = \frac{U_0}{I_{0-1}} = \frac{100}{36,5854} = 2,7333 \Omega.$$

MT (PEEC)

33C

Скопје, 2017

40 / 45

Пример 8

../programi/kabli/kabel_11.m

```
1 function kabel = kabel_11()
2 kabel.U0 = 1000;
3 kabel.Rz = 5*ones(6,1);
4 kabel.Zr = (0.145 + 1j*0.334)*ones(6,1);
```

../programi/kabli/skala.m

```
1 function [U, Ir, Iz] = skala(datoteka)
2 K = feval(datoteka);
3 [U0,Rz,Zr] = deal(K.U0,K.Rz,K.Zr);
4 n = length(Rz);
5 Iz(n,1) = 1;
6 Ir(n,1) = 1;
7 U(n,1) = Rz(n)*Iz(n);
8 for i = n-1:-1:1
9     U(i) = U(i+1) + Zr(i)*Ir(i+1);
10    Iz(i) = U(i)/Rz(i);
11    Ir(i) = Ir(i+1) + Iz(i);
12 end
13 U0_presm = U(1) + Zr(1)*Ir(1);
14 k = U0/U0_presm;
15 U = k*U;
16 Ir = k*Ir;
17 Iz = k*Iz;
```

MT (PEEC)

33C

Скопје, 2017

41 / 45

Пример 8

```
>> [U, Ir, Iz] = skala('kabel_11');
>> U = abs(U)
U =
    810.9036
    673.0965
    578.4978
    518.7252
    485.1763
    470.5123
>> Zvl = 1000/Ir(1)
Zvl =
    1.2560 + 0.7510i
```

MT (PEEC)

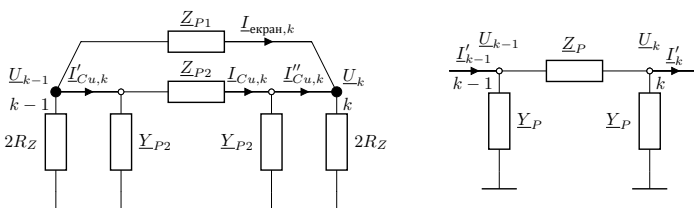
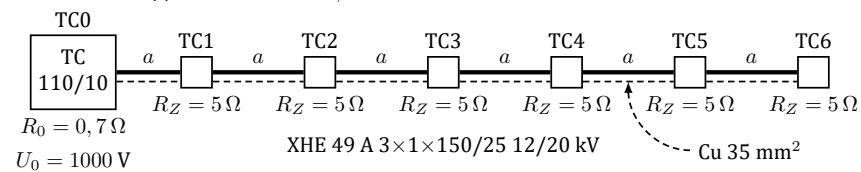
33C

Скопје, 2017

42 / 45

Пример 9

Пресметките на извоз на потенцијалот за претходниот пример да се повторат и за случајот кога во кабелскиот ров, по целата негова должина, заедно со трите жили од кабелот тип ХНЕ 49 А 3×1×150/25 12/20 kV, постои и бакарно јаже, положено на длабочина $h = 0,7$ м.



$$\underline{Y}_P = (0,9500 - j0,0472) \text{ S}, \quad \underline{Z}_P = (0,0936 + j0,1948) \Omega$$

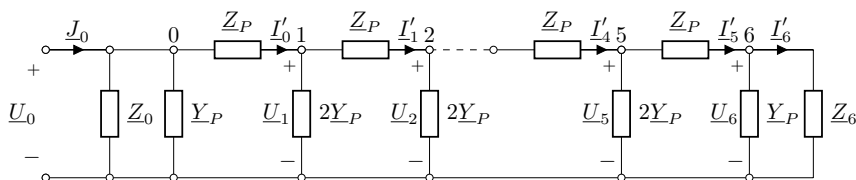
MT (ПЕЕС)

33C

Скопје, 2017

43 / 45

Пример 9



$$\underline{Y} \cdot \underline{U} = \underline{I},$$

$$\underline{Y}_{ii} = 2\underline{Y}_P + \frac{2}{\underline{Z}_P}, \quad i = 1, 2, \dots, 5,$$

$$\underline{Y}_{66} = \underline{Y}_P + \frac{1}{\underline{Z}_P} + \frac{1}{2R_Z},$$

$$\underline{Y}_{ij} = -\frac{1}{\underline{Z}_P}, \quad i, j = 1, 2, \dots, 6; \quad i \neq j,$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_0}{\underline{Z}_P}.$$

MT (ПЕЕС)

33C

Скопје, 2017

44 / 45

Пример 9

../programi/kabli/primer_12.m

```

1 U0 = 1000;
2 Zp = 0.0936 + 1j*0.1948;
3 Yp = 0.95 - 1j*0.0472;
4 Rz = 5;
5 n = 6;
6 Y = (2*Yp + 2/Zp)*eye(n) ...
7 + diag(-1/Zp*ones(n-1,1),1) ...
8 + diag(-1/Zp*ones(n-1,1),-1);
9 Y(n,n) = Yp + 1/Zp + 1/(2*Rz);
10 I = zeros(n,1);
11 I(1) = U0/Zp;
12 U = Y\I;

```

```

>> primer_12
>> abs(U)
ans =
574.6922
329.2692
189.3479
114.0345
80.2963
71.3485

```

MT (ПЕЕС)

33C

Скопје, 2017

45 / 45

Заземјувачи и заземјувачки системи во електроенергетските мрежи

Анализа на сложени заземјувачки системи

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

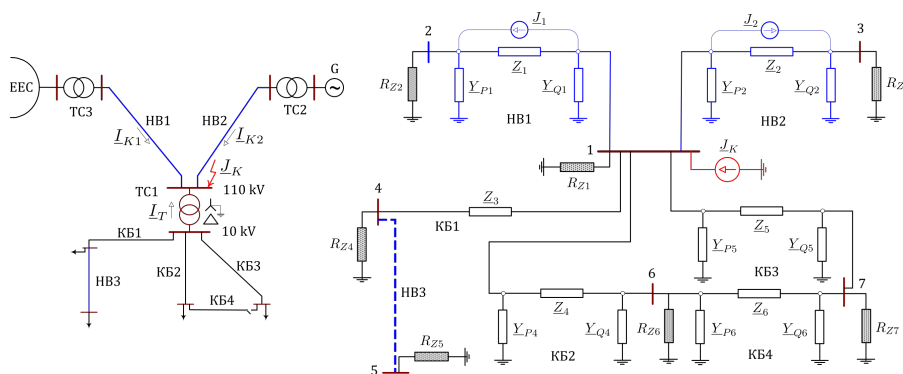
Скопје, 2017

МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 1 / 35

Формирање на колото на заземјувачкиот систем

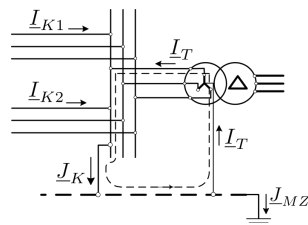


МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 2 / 35

Струи во трансформаторот



МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 3 / 35

Пресметка на напоните во колото на ЗС

$$\underline{Y} \cdot \underline{U} = \underline{J}$$

$$\underline{J} = \begin{bmatrix} J_K - J_1 - J_2 \\ J_2 \\ J_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \underline{U} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \\ U_7 \end{bmatrix},$$

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} Y_{11} & -Z_1^{-1} & -Z_2^{-1} & -Z_3^{-1} & 0 & -Z_4^{-1} & -Z_5^{-1} \\ -Z_1^{-1} & Y_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -Z_2^{-1} & 0 & Y_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -Z_3^{-1} & 0 & 0 & Y_{44} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{55} & 0 & 0 \\ -Z_4^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{66} & -Z_6^{-1} \\ -Z_5^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_6^{-1} & Y_{77} \end{bmatrix}.$$

Елементи од матрицата \underline{Y}

$$Y_{11} = R_{Z1}^{-1} + Y_{Q1} + Y_{P2} + Z_1^{-1} + Z_2^{-1} + Z_3^{-1} + Y_{P4} + Z_4^{-1} + Y_{P5} + Z_5^{-1},$$

$$Y_{22} = R_{Z2}^{-1} + Y_{P1} + Z_1^{-1},$$

$$Y_{33} = R_{Z3}^{-1} + Y_{Q2} + Z_2^{-1},$$

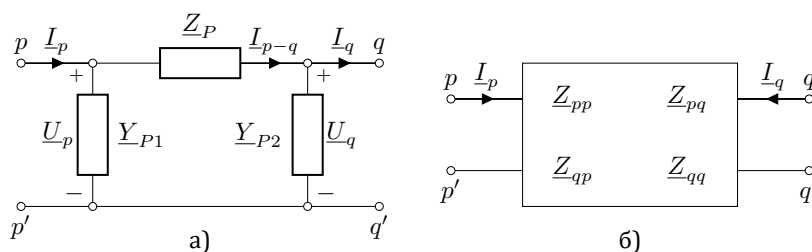
$$Y_{44} = R_{Z4}^{-1} + Z_3^{-1},$$

$$Y_{55} = R_{Z5}^{-1},$$

$$Y_{66} = R_{Z6}^{-1} + Z_4^{-1} + Y_{Q4} + Y_{P6} + Z_6^{-1},$$

$$Y_{77} = R_{Z7}^{-1} + Y_{Q5} + Z_5^{-1} + Y_{Q6} + Z_6^{-1}.$$

Пресметка на струите во колото на ЗС



$$I_{p-q} = (U_p - U_q) / Z_P,$$

$$I_p = I_{p-q} + Y_{P1} \cdot U_p,$$

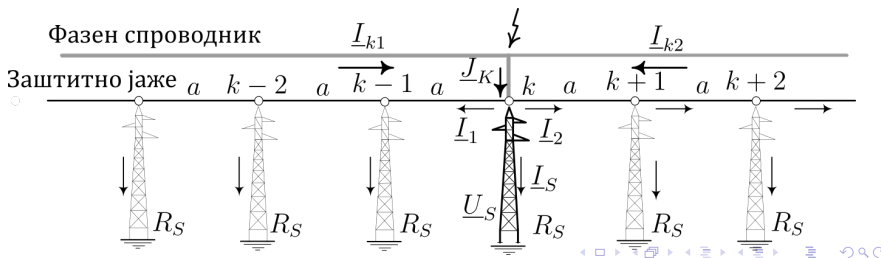
$$I_q = I_{p-q} - Y_{P2} \cdot U_q,$$

$$I_{Zi} = \frac{U_i}{R_{Zi}}; \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Пример 1

110 kV надземен вод со $l = 50$ km, куса врска на средината $J_K = 4,2$ kA (од лево $I_{k1} = 2,7$ kA, од десно $I_{k2} = 1,5$ kA. Просечни вредности $R_S = 10 \Omega$, $a = 250$ m. Познати се $z = (3,082 + j1,289) = 3,322 \cdot e^{j21,9^\circ} \Omega/\text{km}$, $z_m = (0,05 + j0,355) = 0,358 \cdot e^{j82^\circ} \Omega/\text{km}$, $r_f = 0,95 \cdot e^{-j5,6^\circ}$.

- Да се пресмета распределбата на струите во заземјувачкиот систем од водот како и потенцијалот на столбот погоден со земјоспој.
- Пресметките да се повторат за случајот со заштитно јаже Al/Č јаже $50/30$ mm² со $z = (0,614 + j0,767) = 0,983 \cdot e^{j51,3^\circ} \Omega/\text{km}$, $r_f = 0,711 \cdot e^{-j15,2^\circ}$.



MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 7 / 35

Пример 1

$$\underline{Z}_r = z \cdot a = (0,771 + j0,322) = 0,835 \cdot e^{j22,7^\circ} \Omega;$$

$$\underline{Z}_{vl} \approx \sqrt{\underline{Z}_r \cdot R_S} - \frac{\underline{Z}_r}{2} = 2,51 \cdot e^{j9,74^\circ} \Omega.$$

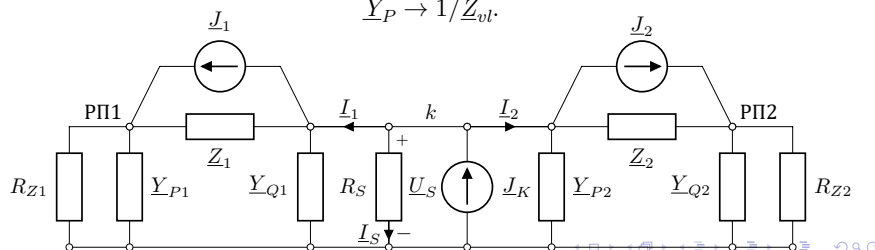
$$\underline{Z}_P = 115.746,5 \cdot e^{j140,2^\circ} \Omega;$$

$$\underline{Y}_P = 0,399 \cdot e^{-j9,74^\circ} \text{ S}.$$

ВОДОТ Е ДОЛГ И ВАЖИ

$$\underline{Z}_P \rightarrow \infty,$$

$$\underline{Y}_P \rightarrow 1/\underline{Z}_{vl}.$$

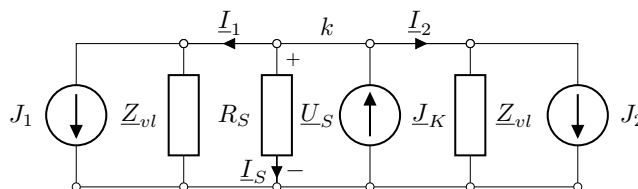


MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 8 / 35

Пример 1



$$r_f = 0,95 \cdot e^{-j5,6^\circ}; \quad c_f = 1 - r_f = (0,055 + j0,09215) = 0,107 \cdot e^{j59,3^\circ};$$

$$\underline{J}_1 = (1 - r_f) \cdot I_{K1} = 0,107 \cdot e^{j59,3^\circ} \cdot 2,7 = 0,289 \cdot e^{j59,3^\circ} \text{ kA};$$

$$\underline{J}_2 = (1 - r_f) \cdot I_{K2} = 0,107 \cdot e^{j59,3^\circ} \cdot 1,5 = 0,161 \cdot e^{j59,3^\circ} \text{ kA}.$$

$$\underline{J}_Z = \underline{J}_K - \underline{J}_1 - \underline{J}_2 = r_f \cdot \underline{J}_K = (3,97 - j0,387) = 3,989 \cdot e^{-j5,6^\circ} \text{ kA}.$$

$$\underline{Z}_{ek} = \underline{Z}_{vl} \Pi \underline{Z}_{vl} \Pi R_S = (2,51/2) \cdot e^{j9,74^\circ} \Pi 10 = 1,116 \cdot e^{j8,65^\circ} \Omega;$$

$$\underline{U}_S = \underline{Z}_{ek} \cdot \underline{J}_Z = 1,116 \cdot e^{j8,65^\circ} \cdot 3,989 \cdot e^{-j5,6^\circ} = 4,453 \cdot e^{j3,1^\circ} \text{ kV};$$

$$\underline{I}_S = \underline{U}_S / R_S = 0,4453 \cdot e^{j3,1^\circ} \text{ kA}.$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 = (\underline{J}_K - \underline{I}_S) / 2 = (1,878 - j2,299) = 1,878 \cdot e^{-j0,4^\circ} \text{ kA}.$$

MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 9 / 35

Пример 1

Ако постапката ја повториме за случајот кога заштитното јаже е од поспроводен материјал, тип Al/Č 50/30 mm² добиваме

$$\begin{aligned} r_f &= 0,711 \cdot e^{-j15,2^\circ}; \\ \underline{I}_1 &= 0,984 \cdot e^{j30,7^\circ} \text{ kA}; \quad \underline{I}_2 = 0,547 \cdot e^{j30,7^\circ} \text{ kA}; \quad \underline{I}_Z = 2,988 \cdot e^{-j15,2^\circ} \text{ kA}; \\ \underline{Z}_{vl} &= 1,4604 \cdot e^{j23,72^\circ} \Omega; \quad \underline{Z}_{ek} = \underline{Z}_{vl} \Pi \underline{Z}_{vl} \Pi R_S = 0,684 \cdot e^{j22,14^\circ} \Omega; \\ \underline{U}_S &= \underline{Z}_{ek} \cdot \underline{I}_Z = 2,044 \cdot e^{j7,0^\circ} \text{ kV}; \\ \underline{I}_S &= \underline{U}_S / R_S = 0,2044 \cdot e^{j7,0^\circ} \text{ kA}; \quad 4,9\% \text{ од } J_K; \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_2 = (\underline{I}_K - \underline{I}_S) / 2 = 1,999 \cdot e^{j-0,4^\circ} \text{ kA}; \quad 47,5\% \text{ од } J_K; \end{aligned}$$

Напоните на допир и чекор околу столбот ќе бидат за повеќе од два пати помали.

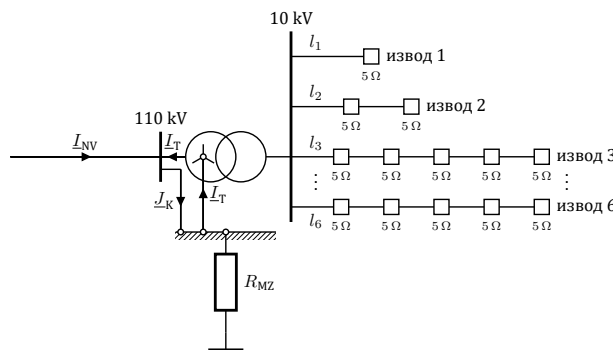
Пример 2

ТС 110/10 kV/kV се напојува со 110 kV вод со заштитно јаже Fe III 50 mm² за кој е познато $\underline{Z}_{vl} = 2,51 \cdot e^{j9,74^\circ}$, $r_f = 0,95 \cdot e^{-j5,6^\circ}$. Од ТС се напојуваат 6 кабелски изводи

- извод бр. 1, IPO 13 3x95 6/10 kV со должина $l_1 = 800$ m, на чиј крај се наоѓа индустриска ТС СН/НН 2x1000 kVA, со отпорност на распростирање на работниот заземјувач $R_{Z1} = 4 \Omega$, специфична отпорност на теренот $\rho = 100 \Omega\text{m}$;
- извод бр. 2, IPO 13 3x95 6/10 kV со вкупна должина $l_2 = 1200$ m, по чија должина рамномерно се наоѓаат 2 ТС СН/НН 630 kVA, со отпорност на распростирање на работните заземјувачи $R_{Z2} = 5 \Omega$ секој; $\rho = 100 \Omega\text{m}$;
- 4 идентични изводи (бр. 3, 4, 5 и 6) од по $l_3 = 2500$ m, ХНЕ 49 А 3x1x150, 6/10 kV. Секој од каблите напојува по 5 ТС СН/НН, рамномерно распределени по нивната должина. Отпорноста на распростирање на работните заземјувачи на овие ТС изнесуваат $R_{Z3} = 5 \Omega$ секој.

Мрежестиот заземјувач има $R_{MZ} = 0,661 \Omega$; $E_{d,\max} = 24,7\%$; $E_{c,\max} = 7,1\%$.
 $\underline{I}_K = 6$ kA; $\underline{I}_{NV} = 5,2$ kA; $\underline{I}_T = 0,8$ kA.

Пример 2



$$\begin{aligned} \underline{Z}_{vl,NV} &= 2,510 \cdot e^{j9,74^\circ} \Omega; & r_{f,NV} &= 0,95 \cdot e^{-j5,6^\circ}; \\ \underline{Z}_{vl,1} &= 0,727 \cdot e^{j34,4^\circ} \Omega; & \underline{k}_{i,1} &= 0,280 \cdot e^{-j79,7^\circ}; \\ \underline{Z}_{vl,2} &= 0,145 \cdot e^{j11,8^\circ} \Omega; & \underline{k}_{i,2} &= 0,308 \cdot e^{-j57,3^\circ}; \\ \underline{Z}_{vl,3} &= 0,901 \cdot e^{j28,9^\circ} \Omega; & \underline{k}_{i,3} &= 0,742 \cdot e^{-j14,5^\circ}. \end{aligned}$$

Пример 2

Да се пресмета

- напонот \underline{U}_{MZ} на мрежестиот заземјува како и најголемите напони на допир и чекор во ТС 110/10 kV. Да се провери дали има опасност по луѓето?
- распределбата на струите на одведување $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \dots, \underline{I}_8$ по изводите за време на грешката како и напоните $\underline{U}_1, \underline{U}_2, \dots, \underline{U}_8$ кај првите ТС СН/НН во секој од изводите.

Пример 2

$$\underline{J}_Z = \underline{J}_K - \underline{I}_T - (1 - r_{f.NV}) \cdot \underline{I}_{NV} = r_{f.NV} \cdot \underline{I}_{NV} = 4,94 \cdot e^{-j5,6^\circ} \text{ kA.}$$

$$\underline{Z}_{ek} = R_{MZ} \Pi \underline{Z}_{vl.NV} \Pi \underline{Z}_{vl.1} \Pi \underline{Z}_{vl.2} \Pi \underline{Z}_{vl.3} \Pi \underline{Z}_{vl.4} \Pi \underline{Z}_{vl.5} \Pi \underline{Z}_{vl.6},$$

$$\underline{Z}_{ek} = \left(\frac{1}{R_{MZ}} + \frac{1}{\underline{Z}_{vl.NV}} + \sum_{k=1}^6 \frac{1}{\underline{Z}_{vl.k}} \right)^{-1} =$$

$$= (0,066253 + j0,021315) = 0,0696 \cdot e^{j17,8^\circ} \Omega.$$

$$\underline{U}_{MZ} = \underline{Z}_{ek} \cdot \underline{J}_Z = 344 \cdot e^{-j1,2^\circ} \text{ V.}$$

$$\underline{U}_k = k_{i.k} \cdot \underline{U}_{MZ}; \quad k = 1, 2, \dots, 6.$$

	\underline{U}_{MZ}	ИЗВОД					
		1	2	3	4	5	6
U_k (V)	344	96	106	255	255	255	255
I_k (A)	520	473	2371	382	382	382	382

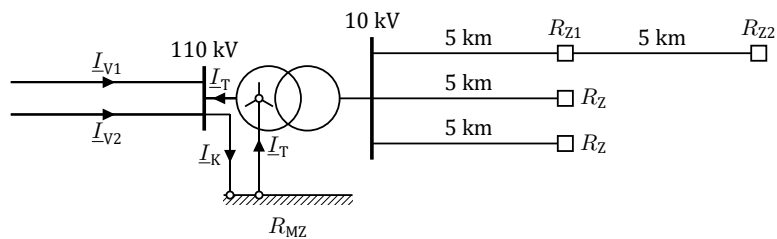
$$U_{d.\max} = \frac{E_{d.\max}}{s_d} = \frac{E_{d.\max} \%}{100} \cdot \frac{U_{MZ}}{s_d} = \frac{24,7}{100} \cdot \frac{344}{1,15} = 74 \text{ V.}$$

Пример 3

ТС се напојува од два 110 kV вода и на 10 kV има 3 кабелски изводи. Познати се:

- Надземните водови за 110 kV имаат $\underline{Z}_{v1,V} = 3,1 \cdot e^{j4^\circ} = (3,09 + j0,22) \Omega$ и $r_f = 0,68 \cdot e^{j10^\circ}$;
- Првиот кабелски извод е изведен со кабел со изолиран плашт со надолжна импеданција $\underline{z} = (0,4 + j0,8) \Omega/\text{km}$. Тој се состои од две секции кои се долги по 5 km. На крајот од секоја секција има трафостаница 10/0,4 kV/kV која што има заштитен заземјувач со отпорност на заземјувачот $R_{Z1} = 8 \Omega$ и $R_{Z2} = 2 \Omega$, соодветно.
- Останатите 2 кабелски изводи се идентични и се е изведени со кабел со изолиран плашт со надолжна импеданција $\underline{z} = (0,4 + j0,8) \Omega/\text{km}$. Нивните должини се по 5 km, а на крајот од нив има трафостаница 10/0,4 kV/kV која што има заштитен заземјувач со отпорност на заземјувачот $R_Z = 5 \Omega$.

Пример 3



$I_K = 10 \text{ kA}$, $I_{V1} = 5 \text{ kA}$, $I_{V2} = 3 \text{ kA}$ и $I_T = 2 \text{ kA}$, $R_{MZ} = 0,2 \Omega$. Да се одредат

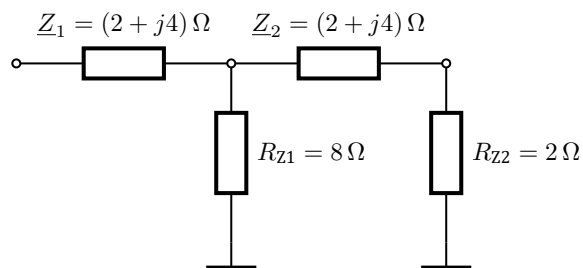
- Влезните импеданции на кабелските изводи.
- Еквивалентата импеданција на заземјувачкиот систем.
- Ефективните вредности на
 - ▶ напонот на мрежестиот заземјувач,
 - ▶ струјата што истекува во земјата од мрежестиот заземјувач,
 - ▶ напонот на заземјувачот на крајот од првата секција на првиот кабелски извод.
- г) Ефективната вредност на струјата што тече во плашот на вториот кабелски извод.
- д) Со примена на методот за решавање на електрично коло во форма на скала да се определи коефициентот на изнесен потенцијал за првиот кабелски извод.

MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 16 / 35

Пример 3а



$$Z_{e1} = (2 + j4) + 2 = (4 + j4) \Omega$$

$$Y_{e2} = \frac{1}{Z_{e1}} + \frac{1}{R_{Z1}} = \frac{1}{4 + j4} + \frac{1}{8} = (0,25 - j0,125) \text{ S}$$

$$Z_{e2} = \frac{1}{Y_{e2}} = \frac{1}{0,25 - j0,125} = (3,2 + j1,6) \Omega$$

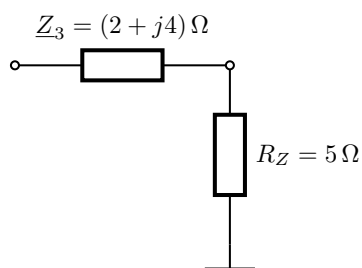
$$Z_{v1,1} = Z_{e2} + Z_1 = (3,2 + j1,6) + (2 + j4) = (5,2 + j5,6) \Omega$$

MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 17 / 35

Пример 3а



$$Z_{v1,2} = Z_3 + R_Z = (2 + j4) + 5 = (7 + j4) \Omega.$$

MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 18 / 35

Пример 3б

$$Z_e = \frac{1}{\frac{2}{Z_{v1,V}} + \frac{1}{Z_{v1,1}} + \frac{2}{Z_{v1,2}} + \frac{1}{R_{MZ}}} = \frac{1}{\frac{2}{3,09 + j0,22} + \frac{1}{5,2 + j5,6} + \frac{2}{7 + j4} + \frac{1}{0,2}} = (0,168 + j0,007) \Omega.$$

МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

19 / 35

Пример 3в,г

$$I_e = r_f \cdot I_{V1} + r_f \cdot I_{V2} = r_f \cdot (I_{V1} + I_{V2}),$$

$$I_e = r_f \cdot (I_{V1} + I_{V2}) = 0,68 \cdot (5 + 3) = 5,44 \text{ kA}.$$

$$U_{MZ} = Z_e \cdot I_e = \sqrt{0,168^2 + 0,007^2} \cdot 5,44 = 0,915 \text{ kV}.$$

$$I_{MZ} = \frac{U_{MZ}}{R_{MZ}} = \frac{0,915}{0,2} = 4,575 \text{ kA}.$$

Напон на средината на првиот кабелски извод: напонски делител од Z_1 и Z_{e2} , при што е $Z_{e2} = (3,2 + j1,6) \Omega$ и $Z_1 = (2 + j4) \Omega$.

$$U_{\text{середина}} = \frac{Z_{e2}}{|Z_{e2} + Z_1|} \cdot U_{MZ} = \frac{\sqrt{3,2^2 + 1,6^2}}{\sqrt{(3,2 + 2)^2 + (1,6 + 4)^2}} \cdot 0,915 = 0,428 \text{ kV}.$$

$$I_2 = \frac{U_{MZ}}{Z_{v1,2}} = \frac{0,915}{\sqrt{7^2 + 4^2}} = 0,113 \text{ kA}.$$

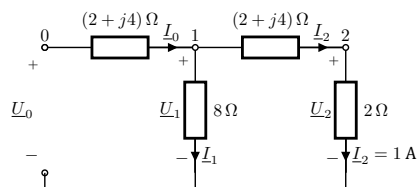
МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

20 / 35

Пример 3д



$$I_2 = 1 \text{ A}, \quad U_2 = 2 \cdot 1 = 2 \text{ V}.$$

$$U_1 = 2 + (2 + j4) \cdot 1 = (4 + j4) \text{ V} \quad I_1 = \frac{4 + j4}{8} = (0,5 + j0,5) \text{ A}.$$

$$I_0 = 1 + (0,5 + j0,5) = (1,5 + j0,5) \text{ A}$$

$$U_0 = (4 + j4) + (2 + j4) \cdot (1,5 + j0,5) = (5 + j11) \text{ A}.$$

$$k = \frac{U_2}{U_0} = \frac{2}{5 + j11} = 0,068 - j0,151 \quad k = \sqrt{0,068^2 + 0,151^2} = 0,166.$$

$$Z_{v1,2} = \frac{U_0}{I_0} = \frac{5 + j11}{1,5 + j0,5} = (5,2 + j5,6) \Omega.$$

$$k_1 = \frac{U_1}{U_0} = \frac{4 + j4}{5 + j11} = 0,438 - j0,164; \quad U_1 = k_1 U_{MZ} = \sqrt{0,438^2 + 0,164^2} \cdot 0,915 = 0,428 \text{ kV}.$$

МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

21 / 35

Програма за решавање сложени заземјувачки системи

$$\underline{Y} \cdot \underline{U} = \underline{J}.$$

$$\underline{J} = \underline{A}^T \cdot \underline{I}$$

$$A_{ki} = \begin{cases} -1, & \text{ако насоката на гранката } k \text{ е кон јазелот } i, \\ 0, & \text{ако гранката } k \text{ не е поврзана со јазелот } i, \\ 1, & \text{ако насоката на гранката } k \text{ е од јазелот } i. \end{cases}$$

$$\underline{U}_{GR} = \underline{A} \cdot \underline{U}.$$

$$\underline{I} = \underline{Z}_{GR}^{-1} \cdot \underline{U}_{GR} = \underline{Z}_{GR}^{-1} \cdot \underline{A} \cdot \underline{U},$$

$$\underline{J} = \underline{A}^T \cdot \underline{Z}_{GR}^{-1} \cdot \underline{A} \cdot \underline{U}.$$

$$\underline{Y} = \underline{A}^T \cdot \underline{Z}_{GR}^{-1} \cdot \underline{A}.$$

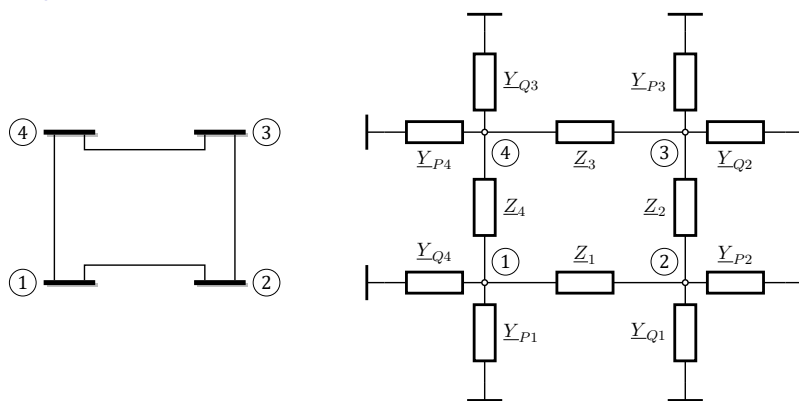
Navigation icons

МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 22 / 35

Мрежа составена од 4 водови/кабли



Navigation icons

МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 23 / 35

Формирање на матрицата \underline{Y} и векторот

Податоците за мрежата ќе ги сместиме во векторите \underline{f} и \underline{t} коишто ги содржат индексите на почетните и крајните јазли на гранките, како и векторите \underline{Y}_G и \underline{Y}_P кои ги содржат параметрите од еквивалентното коло на гранките при што е $\underline{Y}_r = 1/\underline{Z}$, $\underline{Y}_p = \underline{Y}_P = \underline{Y}_Q$.

```
A = sparse(1:m, f, ones(m, 1), m, n) ...
    - sparse(1:m, t, ones(m, 1), m, n);
Y = A' * sparse(1:m, 1:m, Yr) * A ...
    + sparse(f, f, Yp, n, n) ...
    + sparse(t, t, Yp, n, n) ...
    + sparse(1:n, 1:n, 1./zs.Rz);
```

$$\underline{J}_i = \begin{cases} \sum_j T_{f,j} \cdot I_{V,j} & i = 1, \\ 0 & i = 2, 3, \dots, n. \end{cases}$$

Navigation icons

МТ (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017 24 / 35

Пресметка на струи во екв. коло

$$\underline{I}_{Zi} = \frac{\underline{U}_i}{R_{Zi}}, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

$$\underline{I}'_k = \underline{Y}_{rk} \cdot (\underline{U}_i - \underline{U}_j) + \underline{Y}_{pk} \cdot \underline{U}_i, \quad k = 1, 2, \dots, m,$$

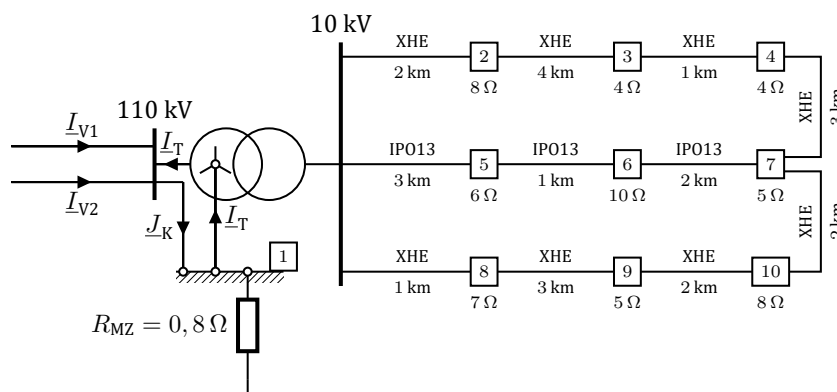
$$\underline{I}''_k = \underline{Y}_{rk} \cdot (\underline{U}_i - \underline{U}_j) - \underline{Y}_{pk} \cdot \underline{U}_j, \quad k = 1, 2, \dots, m.$$

Пример 4

ТС се напојува од два 110 kV, а на 10 kV има 3 кабелски изводи 1 – 2 – 3 – 4, 1 – 5 – 6 – 7 и 1 – 8 – 9 – 10. Изводите на крајот се поврзани со резервни водови (4 – 7 и 7 – 10). Должините на сите делници се прикажани на сликата, а исто така се дадени и отпорностите на заземјувачите на сите ТС 10/0,4 kV/kV, како и отпорноста на мрежестиот заземјувач. Познати се и следните податоци:

- Надземните водови за 110 kV имаат влезна импеданција $\underline{Z}_{v1,v} = 2,5 \cdot e^{j9,74^\circ} \Omega$ и $\underline{I}_f = 0,95 \cdot e^{-j5,6^\circ}$;
- Првиот и третиот кабелски извод се изведени со кабел со изолиран плашт (ХНЕ) со надолжна импеданција $\underline{z} = (0,29 + j0,668) \Omega/\text{km}$. Со ист кабел се изведени и спојниците 4 – 7 и 7 – 10.
- Вториот кабелски извод е изведен со кабел со неизолиран плашт (IPO13). Кабелот е со дијаметар $d_k = 4,5 \text{ cm}$ и тој е закопан на длабочина $h = 0,7 \text{ m}$. Надолжната импеданција на кабелот изнесува $\underline{z} = (0,7 + j2) \Omega/\text{km}$. Специфичната отпорност на земјата по должината на делниците 1 – 5, 5 – 6 и 6 – 7 изнесува $200 \Omega\text{m}$, $100 \Omega\text{m}$ и $150 \Omega\text{m}$ соодветно.

Пример 4



Во ТС настанала еднофазна куса врска на 110 kV, при што се познати $\underline{I}_{V1} = 1000 \text{ A}$ и $\underline{I}_{V2} = 1500 \text{ A}$, $R_{MZ} = 0,8 \Omega$. Да се одредат

- Напоните и струите на сите заземјувачи во системот.
- Струите во пластовите на сите кабли.

Пример 4

```
../programi/sistem/zs_1.m
1 function zs = zs_1()
2 zs.Zv = 2.5*exp(1j*9.74/180*pi)*[1 1];
3 zs.J = zeros(10,1);
4 rf = 0.95*exp(-1j*5.6/180*pi)*[1 1];
5 Iv = [1000 1500];
6 zs.J(1) = sum(rf.*Iv);
7 zs.Rz = [0.8 8 4 4 6 10 5 7 5 8]';
8 z = 0.29 + 1j*0.668;
9 zs.granki = [
10 1 2          2*z          0
11 2 3          4*z          0
12 3 4          1*z          0
13 1 5 -40.9057 - 33.4379i  0.7265 - 0.5171i
14 5 6 -2.2525 + 2.9509i  1.2104 - 0.5263i
15 6 7 -17.0354 + 0.0217i  0.8995 - 0.5945i
16 1 8          1*z          0
17 8 9          3*z          0
18 9 10         2*z          0
19 4 7          3*z          0
20 7 10         2*z          0
21 ];
```

Пример 4

Параметрите на π -заменската шема на каблите од типот IPO13 ги пресметуваме со функцијата `neizolian_param`. Така на пример за кабелот 1–5 добиваме

```
>> [~,~,Zp,Yp] = neizolian_param(200,3,0.7,0.045,0.7+2j,inf)
Zp =
-40.9057 - 33.4379i
Yp =
0.7265 - 0.5171i
```

Функција за формирање на матрицата Y

```
../programi/sistem/matrica_y.m
1 function [Y,f,t,Yr,Yp,n] = matrica_y(zs)
2 G = zs.granki;
3 [f,t,Yr,Yp] = deal(G(:,1),G(:,2),1./G(:,3),G(:,4));
4 n = max([f;t]); m = size(G,1);
5 A = sparse(1:m, f, ones(m, 1), m, n) ...
6     - sparse(1:m, t, ones(m, 1), m, n);
7 Y = A' * sparse(1:m,1:m,Yr) * A ...
8     + sparse(f, f, Yp, n, n) ...
9     + sparse(t, t, Yp, n, n) ...
10    + sparse(1:n, 1:n, 1./zs.Rz);
11 Y(1,1) = Y(1,1) + sum(1./zs.Zv);
```

Решавање на заземјувачкиот систем

../programi/sistem/resi_zs.m

```

1 function [U,Iz,If,It] = resi_zs(datoteka)
2 zs = feval(datoteka);
3 [Y,f,t,Yr,Yp] = matrica_y(zs);
4 U = Y\zs.J;
5 Iz = U./zs.Rz;
6 If = Yr.*(U(f)-U(t)) + Yp.*U(f);
7 It = Yr.*(U(f)-U(t)) - Yp.*U(t);

```

>> [U,Iz,If,It] = resi_zs('zs_1');

јазел	U (V)	I _Z (A)	гранка	I' (A)	I'' (A)
1	720,8	900,9	1-2	166,0	166,0
2	508,0	63,5	2-3	117,3	117,3
3	209,1	52,3	3-4	70,3	70,3
4	168,2	42,1	1-5	629,0	8,6
5	5,8	1,0	5-6	7,8	2,8
6	2,5	0,3	6-7	3,0	95,2
7	92,5	18,5	1-8	208,7	208,7
8	592,4	84,6	8-9	142,4	142,4
9	313,6	62,7	9-10	93,1	93,1
10	188,7	23,6	4-7	36,5	36,5
/	/	/	7-10	75,5	75,5

MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

31 / 35

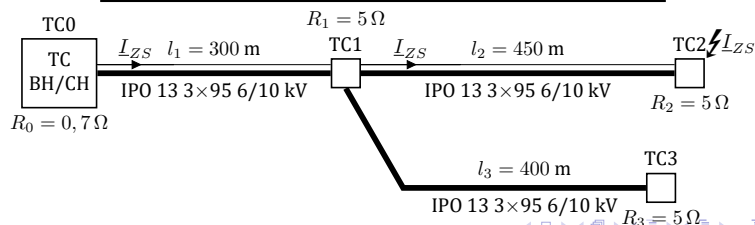
Пример 5

Да се реши колото на заземјувачкиот систем од примерот 8.5 за следните два случаја

- а) за режим на земјоспој во TC0 со $I_{ZS} = 1000$ A,
- б) за режим на земјоспој во TC2 со $I_{ZS} = 300$ A.

Редукциониот фактор на сите кабли од мрежата е $r_f = 0,23 \cdot e^{j12^\circ}$.

Секција	$Z_P (\Omega)$	$Y_P (S)$
TC0 – TC1	$0,14034 + j0,65136$	$0,61750 - j0,03790$
TC1 – TC2	$0,08167 + j1,05700$	$0,84507 - j0,10671$
TC1 – TC3	$0,11637 + j0,91395$	$0,77440 - j0,07954$



MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

32 / 35

Пример 5а

../programi/sistem/zs_2a.m

```

1 function zs = zs_2a()
2 zs.Zv = inf;
3 zs.J = [1000 0 0 0]';
4 zs.Rz = [0.7 5 5 5]';
5 zs.granki = [
6     1 2 0.14034 + 0.65136i 0.61750 - 0.0379i
7     2 3 0.08167 + 1.05700i 0.84507 - 0.10671i
8     2 4 0.11637 + 0.91395i 0.77440 - 0.07954i
9 ];

```

>> [U,Iz,If,It] = resi_zs('zs_2a');

>> U = abs(U)

U =
353.8094
117.6691
72.4670
79.6319

>> Iz = abs(Iz)

Iz =
505.4420
23.5338
14.4934
15.9264

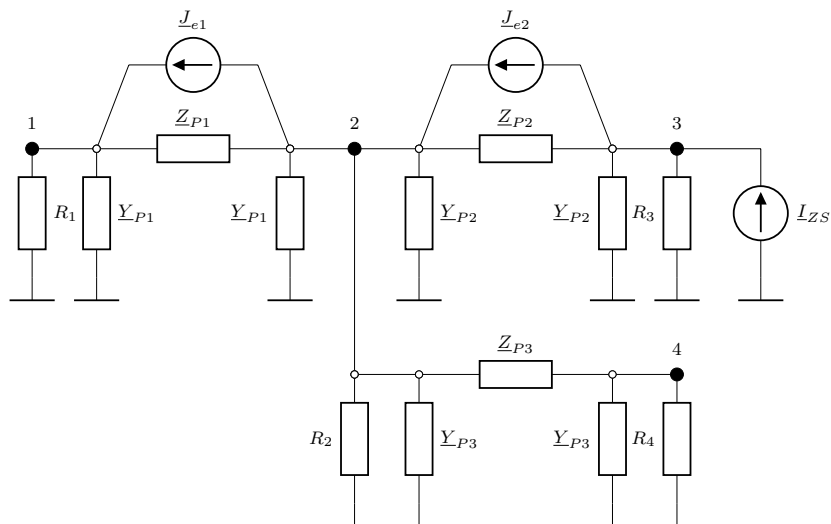
MT (ПЕЕС)

33С

Скопје, 2017

33 / 35

Пример 5б



МТ (ПЕЕС)

33С

Скронје, 2017

34 / 35

Пример 5б

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_{e1} & -J_{e1} + J_{e2} & -J_{e2} + I_{ZS} & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$J_{e1} = J_{e2} = (1 - r_f) \cdot I_{ZS} = (232, 51 - j14, 346) \text{ A}.$$

../programi/sistem/zs_2b.m

```

1 function zs = zs_2b()
2 zs.Zv = inf;
3 rf = 0.23 * exp(1j*12/180*pi);
4 Izs = 300;
5 Je = (1 - rf)*Izs;
6 zs.J = [Je 0 Izs-Je 0].';
7 zs.Rz = [0.7 5 5 5]';
8 zs.granki = [
9     1 2 0.14034 + 0.65136i 0.61750 - 0.0379i
10    2 3 0.08167 + 1.05700i 0.84507 - 0.10671i
11    2 4 0.11637 + 0.91395i 0.77440 - 0.07954i
12 ];

```

```

>> [U,Iz,If,It] = resi_zs('zs_2b');
>> U = abs(U)'
U =
84.3082 36.3843 40.3359 24.6229
>> Iz = abs(Iz)'
Iz =
120.4403 7.2769 8.0672 4.9246

```

МТ (ПЕЕС)

33С

Скронје, 2017

35 / 35