

Заземјувачи и заземјувачки системи во електроенергетските мрежи

Решавање на спрегнати заземјувачи

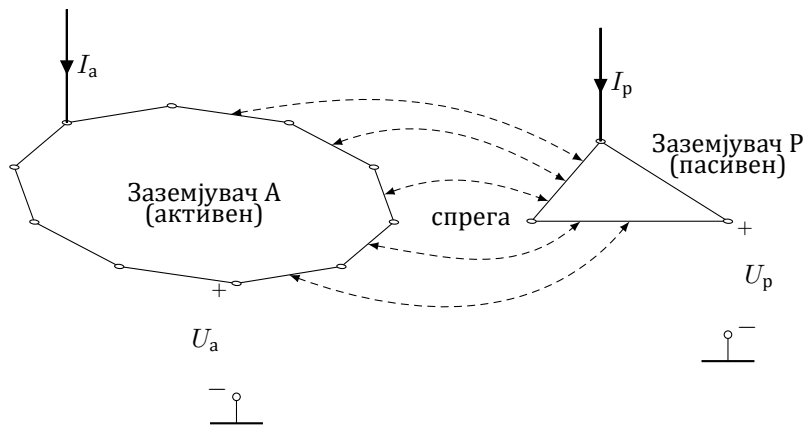
М. Тодоровски

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 заземљувач



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

Равенки за спрегнати заземјувачи

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

$$U_a = E_a \cdot U_p,$$

$$U_p = E_p \cdot U_a,$$

U_a и U_p се напоните на заземјувачите, E_a и E_p се колони со n_a односно n_p единици

$$I_a = (E_a)^T \cdot I_p$$

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

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

$$Y_{ek} \cdot U_p + (E_p)^T \cdot I_p = 0.$$

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

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

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_p \\ U_a \\ U_p \end{bmatrix} = \mathbf{C} \cdot \begin{bmatrix} N_a \\ N_p \\ I_a \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \mathbf{B}^{-1}$$

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

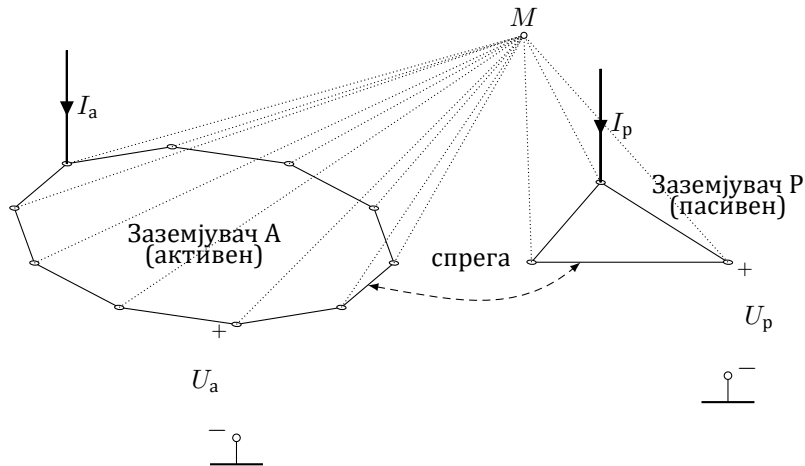
$$R_{ap} = \frac{U_p}{I_a} = C_{m+1,m}$$

$$m = n_a + n_p + 1$$

Матрица B

$n_a + n_p + 2$									
n_a				n_p				1	1
r_{11}	r_{12}	\dots	r_{1,n_a}	r_{1,n_a+1}	\dots	r_{1,n_a+n_p}	-1	0	
r_{21}	r_{22}	\dots	r_{2,n_a}	r_{2,n_a+1}	\dots	r_{2,n_a+n_p}	-1	0	
\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\vdots	
$r_{n_a,1}$	$r_{n_a,2}$	\dots	r_{n_a,n_a}	r_{n_a,n_a+1}	\dots	r_{n_a,n_a+n_p}	-1	0	
$r_{n_a+1,1}$	$r_{n_a+1,2}$	\dots	r_{n_a+1,n_a+1}	r_{n_a+1,n_a+1}	\dots	r_{n_a+1,n_a+n_p}	0	-1	
\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\vdots	
$r_{n_a+n_p,1}$	$r_{n_a+n_p,2}$	\dots	$r_{n_a+n_p,n_a+1}$	$r_{n_a+n_p,n_a+1}$	\dots	$r_{n_a+n_p,n_a+n_p}$	0	-1	
1	1	\dots	1	0	\dots	0	0	0	
0	0	\dots	0	1	\dots	1	0	Y_{ek}	

Потенцијал во точка создаден од спрегнати заземјувачи



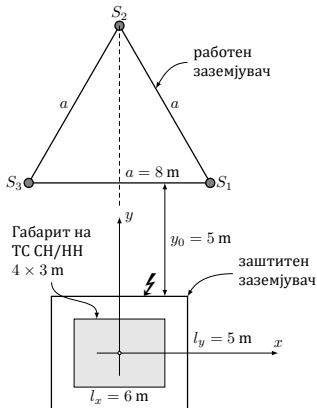
$$\varphi_M = (\mathbf{r}_{aM})^T \cdot \mathbf{I}_a + (\mathbf{r}_{pM})^T \cdot \mathbf{I}_p.$$

Извезен 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**.

Пример 1

Да се пресмета извезениот 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.



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)
```

$$U_a = 100 \text{ V};$$

$$I_a = 4,034 \text{ A};$$

$$Z_{aa} = (U_a/I_a)_{I_p=0} = 24,789 \Omega;$$

$$U_p = 19,723 \text{ V} = 19,7\% U_a;$$

$$I_p = 0;$$

$$Z_{ap} = (U_p/I_a)_{I_p=0} = 4,889 \Omega.$$

Пример 1

$$\underline{Z}_{ek} = (5 + j0) \Omega$$

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

$$U_a = 100 \text{ V};$$

$$I_a = 4,207 \text{ A};$$

$$Z_{aa} = (U_a/I_a)_{I_p=0} = 23,773 \Omega;$$

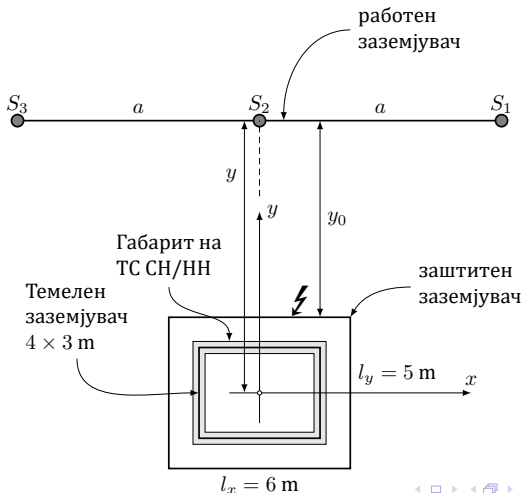
$$U_p = 4,373 \text{ V} = 4,37\% U_a;$$

$$I_p = 0;$$

$$Z_{ap} = (U_p/I_a)_{I_p=0} = 1,040 \Omega.$$

Задача 1

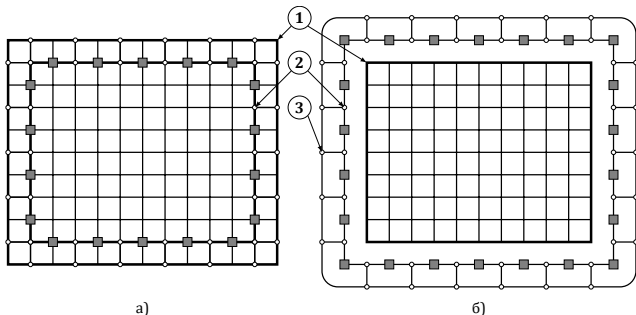
Да се определи $U_{RZ}(\%) = f(\xi)$, $\xi = y/\sqrt{A}$. Со y е означено растојанието помеѓу тежиштето на заштитниот заземјувач и средината на работниот заземјувач, додека $A = l_x \cdot l_y$. Останатите податоци се дадени во книгата.



Заземјување на металната ограда на ТС

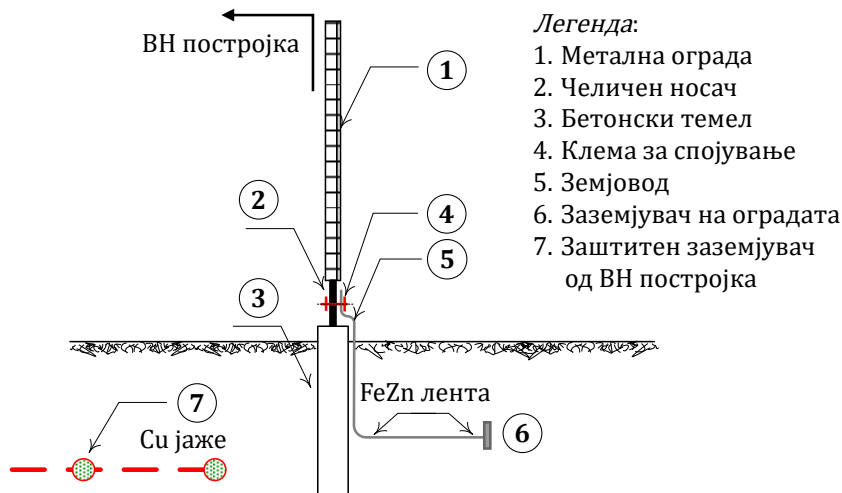
Постојат две можности при изборот на локацијата и димензиите на металната ограда на една постројка

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



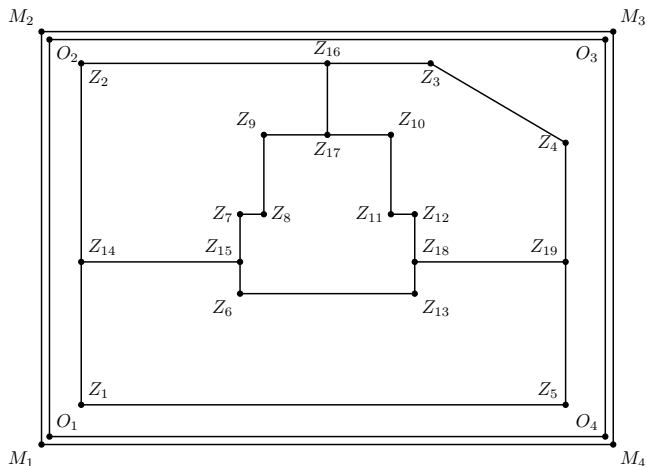
1) мрежест заземјувач, 2) ограда, 3) заземјувач на оградата

Заземјување на металната ограда на ТС



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 $\text{Cu } 50 \text{ mm}^2$ ($d = 9 \text{ mm}$), закопано на длабочина $h = 0,8 \text{ m}$.



Задача 2 – точки на заземљувачот, резултат

координати изразени во метри		
$Z_1 (4, 4)$	$Z_{10} (43, 38)$	$Z_{19} (65, 22)$
$Z_2 (4, 47)$	$Z_{11} (43, 28)$	$O_1 (0, 0)$
$Z_3 (48, 47)$	$Z_{12} (46, 28)$	$O_2 (0, 50)$
$Z_4 (65, 37)$	$Z_{13} (46, 18)$	$O_3 (70, 50)$
$Z_5 (65, 4)$	$Z_{14} (4, 22)$	$O_4 (70, 0)$
$Z_6 (24, 18)$	$Z_{15} (24, 22)$	$M_1 (-1, -1)$
$Z_7 (24, 28)$	$Z_{16} (35, 47)$	$M_2 (-1, 51)$
$Z_8 (27, 28)$	$Z_{17} (35, 38)$	$M_3 (71, 51)$
$Z_9 (27, 38)$	$Z_{18} (46, 22)$	$M_4 (71, -1)$

$$U_a = 55,3 \text{ V};$$

$$I_a = 20 \text{ A};$$

$$Z_{aa} = (U_a / I_a)_{I_p=0} = 2,765 \Omega;$$

$$U_p = 28 \text{ V} = 50,6\% U_a;$$

$$I_p = 0;$$

$$Z_{ap} = (U_p / I_a)_{I_p=0} = 1,4 \Omega.$$

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.
 - ▶ „Издначување на потенцијалите“ е галванско поврзување на сите метални делови и инсталации и нивно поврзување со заземјувачот.

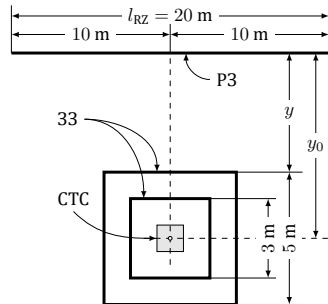
Задача 3

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 закопан на длабочина $h_2 = 1$ m.

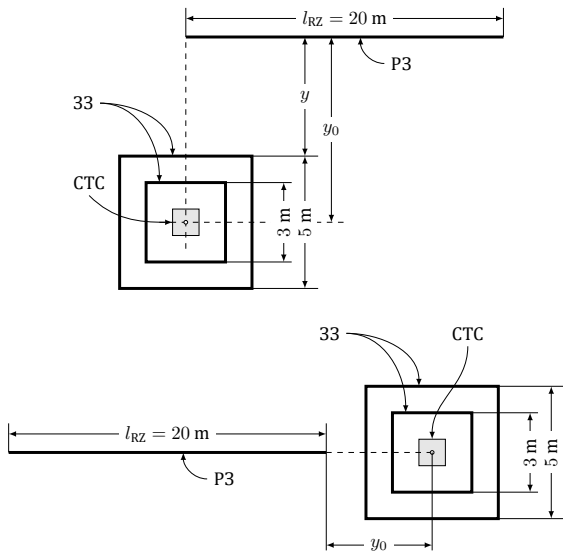
Работниот заземјувач е од поцинкувана челична лента FeZn 30×4 ($d = 22$ mm) со должина $l_{RZ} = 20$ m, закопан на длабочина $h_{RZ} = 0,8$ m.

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

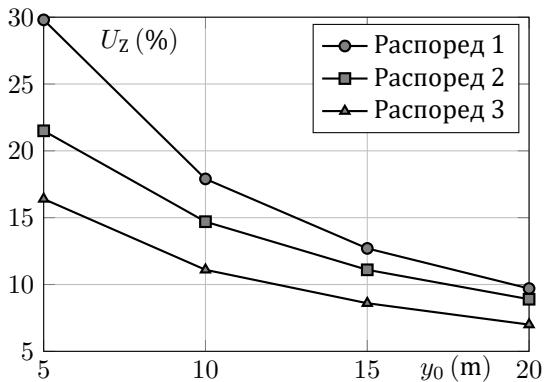
Да се определи $U_{RZ}(y_0)$ за y_0 од множеството: 5, 10, 15, 20 и 25 m.



Задача 3



Задача 3 – решение



Задача 4

Отпорноста на распростирање 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.