

Заземјувачи и заземјувачки системи во електроенергетските мрежи

Електроенергетски кабли во заземјувачкиот систем

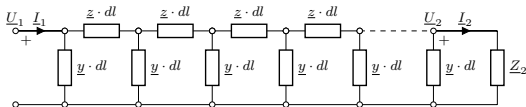
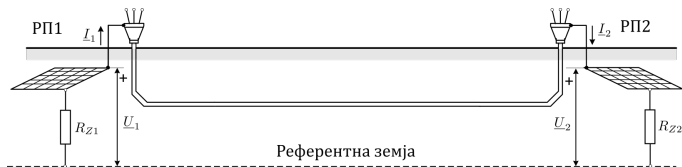
М. Тодоровски

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

Кабли со неизолиран метален плашт



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

$$\underline{Y}_Z = \frac{1}{R_Z} = \frac{\pi \cdot l}{\rho \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{h \cdot d_k}}},$$

$$\underline{y} = g + jb = \frac{\underline{Y}_Z}{l} = \frac{\pi}{\rho \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{h \cdot d_k}}}.$$

Кабли со изолиран метален плашт

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

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

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

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

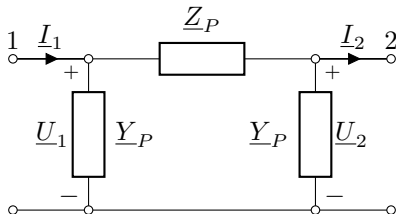
$$\underline{U}(x) = \underline{U}_2 \cdot \text{ch}\underline{\gamma}(l - x) + \underline{Z}_C \cdot \underline{I}_2 \cdot \text{sh}\underline{\gamma}(l - x),$$

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

Кабли со неизолиран метален плашт, π -шема

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

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



Влезна импеданција и изнесен потенцијал

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

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

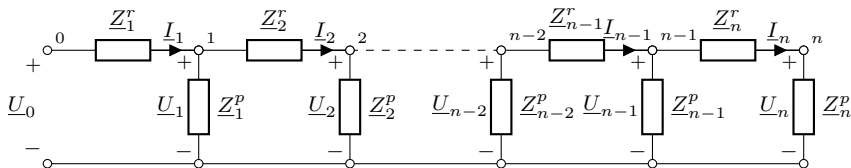
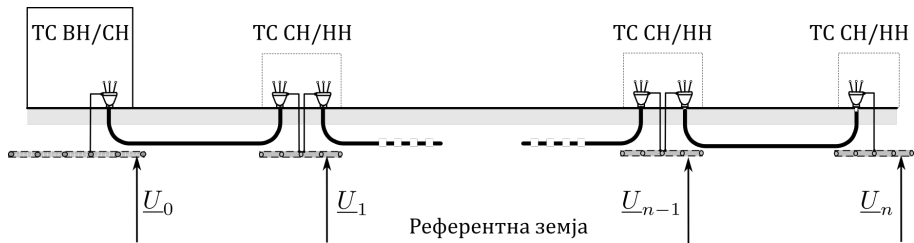
„Долги“ кабли

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

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

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

Кабли со изолиран метален плашт

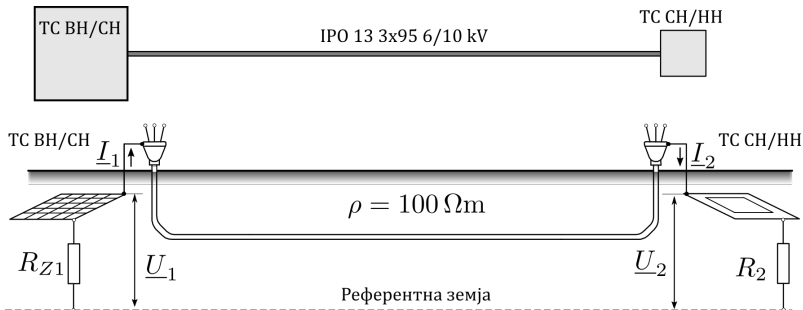


$$\underline{Z}_j^r = \underline{z} \cdot l_j = (r + jx) \cdot l_j,$$

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 СН/НН со импеданција на заштитното заземјување изнесува $\underline{Z}_2 = R_2 = 5 \Omega$. Импеданција по единица должина на металниот плашт заедно со челичната арматура е $\underline{z} = (0,7 + j2) \Omega/\text{km}$. Потребно е да се пресмета

- влезната импеданција на кабелот \underline{Z}_{vl} ;
- граничната должина l_d после која кабелот може да се смета за долг;
- коефициентот на изнесување на потенцијалот k_i ;
- параметрите \underline{Z}_P и \underline{Y}_P на π -заменската шема на кабелот.



Пример 1

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

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

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

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

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

$$\underline{Z}_{v1} = \underline{Z}_C \cdot \frac{\text{ch}(\underline{\gamma}l) + \frac{\underline{Z}_C}{\underline{Z}_2} \cdot \text{sh}(\underline{\gamma}l)}{\text{sh}(\underline{\gamma}l) + \frac{\underline{Z}_C}{\underline{Z}_2} \cdot \text{ch}(\underline{\gamma}l)} = (0,596 + j0,401) \Omega = 0,719 \cdot e^{j34^\circ} \Omega.$$

Пример 1

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

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

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

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

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

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

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;
```

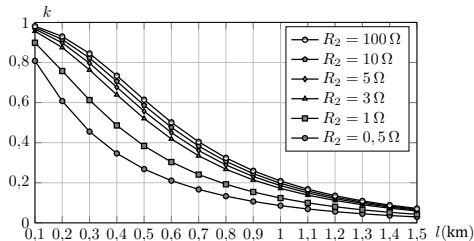
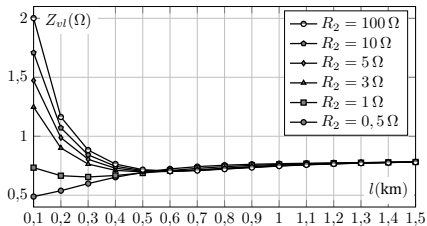
```
>> [Zvl,k,Zp,Yp] = neizolian_param(100,0.75,0.7,0.045,0.7+2j,5)
Zvl = 0.5962 + 0.4015i
k = 0.0894 - 0.3101i
Zp = -0.6211 + 2.0713i
Yp = 1.1376 - 0.3326i
```

Пример 3

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

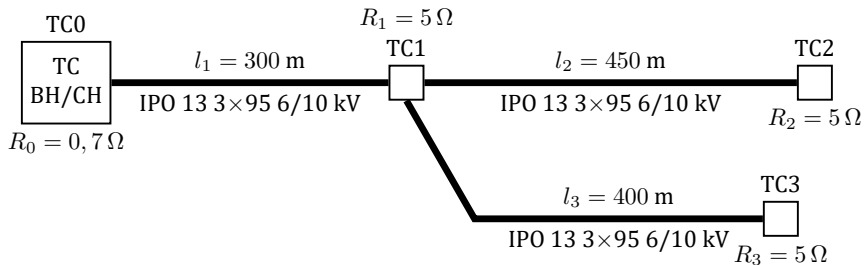
../programi/kabli/kabel_3.m

```
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;
```



Пример 5

Во делница долга $l = 750$ m (пример 1) се вметнува TC1 на растојание $l_1 = 300$ m од почетокот. Од TC1 се полага кабел кон TC3 со должина $l_3 = 400$ m. Да се пресмета влезната импеданција на почетокот на кабелскиот извод $\underline{Z}_{vl.1}$. Колкави се струите и напоните во заземјувачкиот систем од прикажаната кабелска мрежа за случајот кога во мрежестиот заземјувач од TC ВН/СН, чија што отпорност на распространяње изнесува $R_0 = 0,7 \Omega$, се инјектира струја на доземен спој $J_0 = 1$ kA. Сите TC СН/НН имаат исти вредности на отпорностите на распространяње на заштитното заземјување $R_1 = R_2 = R_3 = 5 \Omega$.



Пример 5

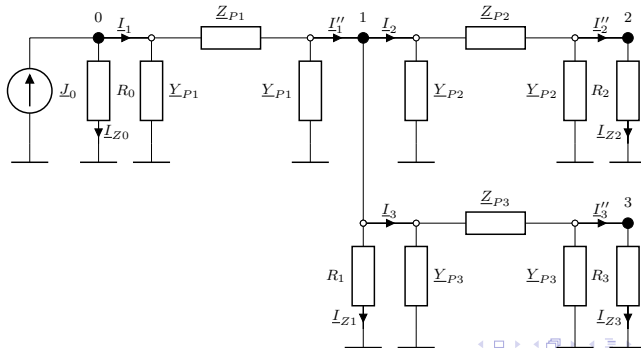
Секција	$\underline{Z}_P (\Omega)$	$\underline{Y}_P (S)$
TC0 – TC1	$0,14034 + j0,65136$	$0,61750 - j0,03790$
TC1 – TC2	$0,08167 + j1,05700$	$0,84507 - j0,10671$
TC1 – TC3	$0,11637 + j0,91395$	$0,77440 - j0,07954$

$$\underline{Z}_{vl.2} = (0,64594 + j0,29855) = 0,7116 \cdot e^{j24,8^\circ} \Omega;$$

$$\underline{k}_{i.2} = 0,616 \cdot e^{-j42,4^\circ}$$

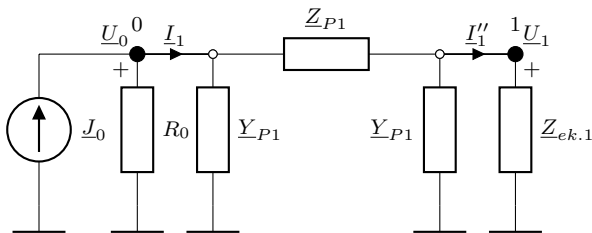
$$\underline{Z}_{vl.3} = (0,67522 + j0,27401) = 0,72870 \cdot e^{j22,1^\circ} \Omega;$$

$$\underline{k}_{i.3} = 0,677 \cdot e^{-j36,6^\circ}$$



Пример 5

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



$$\begin{aligned} \underline{Z}_{vl.1} &= \underline{Z}_C \cdot \frac{\text{ch}(\underline{\gamma}l_1) + \frac{\underline{Z}_C}{\underline{Z}_2} \cdot \text{sh}(\underline{\gamma}l_1)}{\text{sh}(\underline{\gamma}l_1) + \frac{\underline{Z}_C}{\underline{Z}_2} \cdot \text{ch}(\underline{\gamma}l_1)} = (0,46317 + j0,41965) = \\ &= 0,62501 \cdot e^{j42,2^\circ} \Omega, \end{aligned}$$

Пример 5

$$\underline{k}_{i.1} = \frac{1}{\operatorname{ch}(\underline{\gamma}l_1) + \frac{\underline{Z}_C}{\underline{Z}_{ek.1}} \cdot \operatorname{sh}(\underline{\gamma}l_1)} = (0,24523 - j0,22466) = 0,3326 \cdot e^{-j42,5^\circ}.$$

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

$$\underline{U}_0 = \underline{Z}_{ek} \cdot \underline{J}_0 = 353,81 \cdot e^{j22,34^\circ} \text{ V}.$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_0}{\underline{Z}_{ek}} = \frac{353,81 \cdot e^{j22,34^\circ}}{0,62501 \cdot e^{j42,2^\circ}} = 566,084 \cdot e^{-j19,86^\circ} \text{ A};$$

$$\underline{U}_1 = \underline{k}_{i.1} \cdot \underline{U}_0 = 0,3326 \cdot e^{-j42,5^\circ} \cdot 353,81 \cdot e^{j22,34^\circ} = 117,7 \cdot e^{-j20,16^\circ} \text{ V};$$

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_{vl.2}} = \frac{117,7 \cdot e^{-j20,16^\circ}}{0,7116 \cdot e^{j24,8^\circ}} = 165,4 \cdot e^{-j44,96^\circ} \text{ A};$$

$$\underline{U}_2 = \underline{k}_{i.2} \cdot \underline{U}_1 = 0,616 \cdot e^{-j42,4^\circ} \cdot 117,7 \cdot e^{j22,34^\circ} = 72,5 \cdot e^{-j20,06^\circ} \text{ V};$$

$$\underline{I}_3 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_{vl.3}} = \frac{117,7 \cdot e^{-j20,16^\circ}}{0,7287 \cdot e^{j22,1^\circ}} = 161,5 \cdot e^{-j42,26^\circ} \text{ A};$$

$$\underline{U}_3 = \underline{k}_{i.3} \cdot \underline{U}_1 = 0,677 \cdot e^{-j36,6^\circ} \cdot 117,7 \cdot e^{j22,34^\circ} = 79,7 \cdot e^{-j14,26^\circ} \text{ V}.$$

Пример 5

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

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

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

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

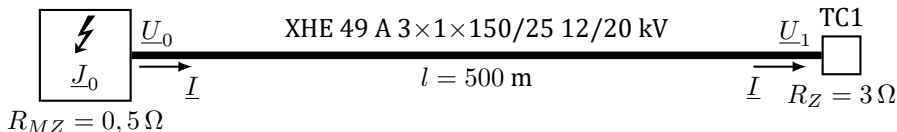
Пример 6

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

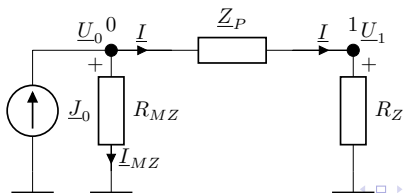
$$\underline{z} = 0,29 + j0,668 = 0,728 \cdot e^{j66,5^\circ} \frac{\Omega}{\text{km}}. \quad (1)$$

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

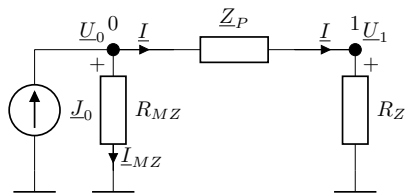
ТС ВН/СН



$$\underline{Z}_P = \underline{z} \cdot l, \quad \underline{Y}_P = 0.$$



Пример 6



$$\underline{U}_1 = \frac{R_Z}{\underline{Z}_P + R_Z} \cdot \underline{U}_0 = \frac{3}{3,145 + j0,334} \cdot 1000 =$$
$$= (943,3 - j100,1) = 948,6 \cdot e^{-j6,1^\circ} \text{ V};$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}_0}{\underline{Z}_P + R_Z} = \frac{1000}{3,145 + j0,334} = (314,4 - j33,4) = 316,2 \cdot e^{-j6,1^\circ} \text{ A.}$$

$$\underline{J}_0 = \underline{I}_{MZ} + \underline{I} = \frac{\underline{U}_0}{R_{MZ}} + \underline{I} = \frac{1000}{0,5} + (314,4 - j33,4) =$$
$$= (2314,4 - j33,4) = 2315 \cdot e^{-j0,83^\circ} \text{ A.}$$

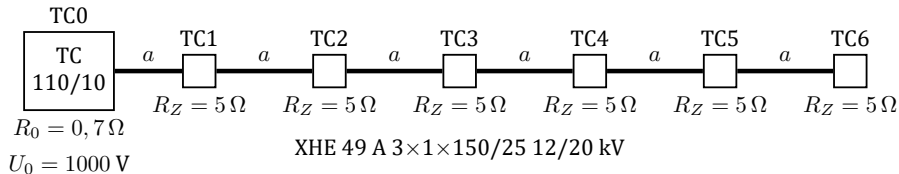
Пример 7

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 примааат заземјувачите на ТС СН/НН како и напоните на допир и чекор. Времето на исклучување на кусата врска изнесува $t = 0, 5 \text{ s}$.



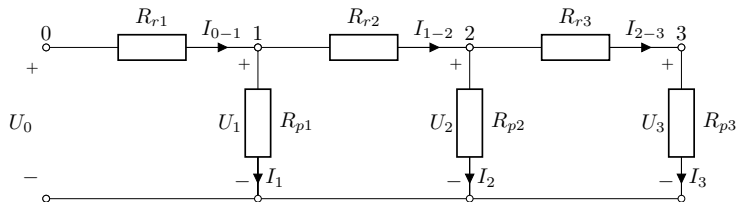
$$\underline{U}_0 = \underline{U}_n \cdot \text{ch}(n\underline{g}) + \underline{Z}_C \cdot \underline{I}_n \cdot \text{sh}(n\underline{g}),$$

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

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 $R_{p1} = R_{p2} = R_{p3} = 1 \Omega$.



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

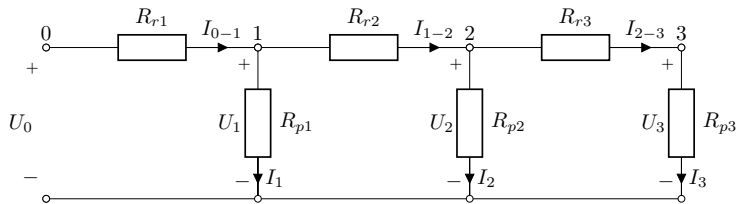
$$U_3 = R_{p3} \cdot I_3 = 1 \text{ V}.$$

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

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

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

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.

Пример 8

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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;
```

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
```