

1. РЕШАВАЊЕ НА ЗАЗЕМЈУВАЧКИТЕ СИСТЕМИ СО ПРИМЕНА НА MATLAB

Заземјувачките системи (ЗС) ќе ги решаваме со помош на матрични равенки каде што што ќе биде потребно одредување на инверзни матрици од матрици чии што елементи се комплексни броеви и чиј ред може да биде прилично голем поради големината на самите системи. Во таков случај решавањето на ЗС со поголем број на јазли, на класичен начин без примена на компјутер, е практично неизводливо. Заради овие причини во наредната точка ќе биде разгледан еден пристап за решавање на ЗС во кој како помошно средство ќе го користиме програмот Matlab, кој во основа е математички програм, но може успешно да се примени и на инженерски проблеми.

1.1. Матрица на адмитанции на заземјувачкиот систем

Според методот на јазлови потенцијали (познат како *метод на независни напони* во теоријата на електричните кола) за секое електрично коло можеме да го напишеме следниот систем равенки:

$$\underline{Y} \cdot \underline{U} = \underline{I}. \quad (1.1)$$

кој што ни дава врска помеѓу векторот на напоните на јазлите \underline{U} и векторот на инјектираните струи во јазлите \underline{I} .

Ако разгледуваниот заземјувачки систем има n независни јазли тогаш димензијата на векторите ќе биде $n \times 1$, при што напоните на јазлите се изразени во однос на референтниот јазел кој претставува дел од земјата која што е доволно оддалечена од ЗС така што при одведување на струјата од ЗС на тлото во тој дел од земјата не се појавуваат потенцијални разлики.

Матрицата на адмитанции на јазлите \underline{Y} има димензии $n \times n$ и за неа важат следните правила:

- дијагоналниот елемент во редицата i е еднаков на сумата на адмитанциите на сите гранки кои го содржат јазелот i (во таа сума треба да се сметаат и адмитанциите на напречните гранки од еквивалентните шеми на надземните водови и каблите доколку ги има);
- вондијагоналниот елемент во редицата i и колоната j е еднаков на негативната сума на адмитанциите на сите

гранки кои едновременно ги содржат јазлите i и j (директни врски меѓу јазлите i и j).

што значи нејзините елементи може да се пресметаат со инспекција на мрежата познавајќи ги параметрите на нејзините елементи.

Во системот равенки (1.1), покрај матрицата адмитанции на јазлите \underline{Y} , познати величини се и инјектираните струи во јазлите, кои што можат да бидат струи на еднофазна куса врска или пак струи на земјоспој во мрежата. Во тој случај, решението на системот равенки (напоните на јазлите) можеме да го добиеме на следниот начин:

$$\underline{U} = \underline{Z} \cdot \underline{I}. \quad (1.2)$$

каде што матрица \underline{Z} се нарекува матрица на импеданции на јазлите на ЗС.

Равенката (1.2) напишана во развиена форма гласи:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{11}\underline{I}_1 + \underline{Z}_{12}\underline{I}_2 + \dots + \underline{Z}_{1i}\underline{I}_i + \dots + \underline{Z}_{1n}\underline{I}_n &= \underline{U}_1 \\ \underline{Z}_{21}\underline{I}_1 + \underline{Z}_{22}\underline{I}_2 + \dots + \underline{Z}_{2i}\underline{I}_i + \dots + \underline{Z}_{2n}\underline{I}_n &= \underline{U}_2 \\ \dots & \\ \underline{Z}_{31}\underline{I}_1 + \underline{Z}_{32}\underline{I}_2 + \dots + \underline{Z}_{3i}\underline{I}_i + \dots + \underline{Z}_{3n}\underline{I}_n &= \underline{U}_3 \\ \dots & \\ \underline{Z}_{n1}\underline{I}_1 + \underline{Z}_{n2}\underline{I}_2 + \dots + \underline{Z}_{ni}\underline{I}_i + \dots + \underline{Z}_{nn}\underline{I}_n &= \underline{U}_n \end{aligned} \quad (1.3)$$

Ако инјектираните струи во сите јазли се еднакви на нула, освен во јазелот i , системот равенки (1.3) станува:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{1i}\underline{I}_i &= \underline{U}_1 \\ \underline{Z}_{2i}\underline{I}_i &= \underline{U}_2 \\ \dots & \\ \underline{Z}_{3i}\underline{I}_i &= \underline{U}_3 \\ \dots & \\ \underline{Z}_{ni}\underline{I}_i &= \underline{U}_n \end{aligned} \quad (1.4)$$

од каде што следува:

$$\underline{Z}_{ji} = \frac{\underline{U}_j}{\underline{I}_i}; \quad j = 1, \dots, n; \quad j \neq i \quad (1.5)$$

$$\underline{Z}_{ii} = \frac{\underline{U}_i}{\underline{I}_i}; \quad (1.6)$$

Равенките (1.5) и (1.6) даваат можност да се утврди физичкото значење на елементите на матрицата на импеданциите на ЗС. Така на пример ако во системот единствена екситација е инјектираната струја во јазелот i , еднаква на 1А според (1.5) вондијагоналниот елемент \underline{Z}_{ji} е еднаков на напонот на јазелот j . Дијагоналниот елемент \underline{Z}_{ii} е специјален случај од претходниот кога $i = j$ и тој е влезна импеданција на ЗС, набљудувана кај јазелот i .

Матрицата \underline{Y} (а преку неа и \underline{Z}) може да се пресмета на повеќе начини, меѓутоа во натамошниот текст ќе биде изнесен еден начин за формирање на двете матрици со помош на програмот Matlab.

1.2. Формирање на матриците \underline{Y} и \underline{Z} во Matlab

Процедурата со којашто се формира матрицата \underline{Y} применувајќи го Matlab како и решението на состојбата во ЗС ќе ја илустрираме преку еден пример. Програмата за пресметки е сместена во m-датотеката [RZS.m](#) која што се наоѓа во фолдерот D:\ASE. Следи изгледот на програмата [ACLF.m](#).

%RZS.m-Program za presmetka na sostojbata vo eden SZ

```
% Presmetka na sostojbata vo eden proizvolen ZS
clc; clear; j=sqrt(-1);
MRZ = load('Mrezal.dat');
ZAZ = load('Zazeml.dat');
[m,xx] = size(MRZ);
Jz = input('Vnesete ja vr. na strujata na dozemen spoj:');
js = input(' Vnesete ja lokacijata na dozemniot spoj: ');

% Citanje na podatocite za mrezata
for k=1:m
    ip(k)=MRZ(k,2); iq(k)=MRZ(k,3);
    Zgr(k)=MRZ(k,4)+MRZ(k,5)*j;
    Ygr(k)=MRZ(k,6)+MRZ(k,7)*j;
end

n=max(max(ip),max(iq)); % vk. broj na jazli vo mrezata
% Citanje na podatocite za zazemjuvacie
[nz,xx]= size(ZAZ); % nz = vk.br.na zazemjuv. vo mrezata

for k=1:nz
    iz(k)=ZAZ(k,1); Rz(k)=ZAZ(k,2); ED(k)=ZAZ(k,3);
    EC(k)=ZAZ(k,4);
end

% Formiranje na matricata Y = inv(Z)
Y = zeros(n,n);
for k=1:nz; kk=iz(k); %dodavanje na Rz na zazemj.od ZS
    Y(kk,kk)=Y(kk,kk)+1/Rz(k);
end

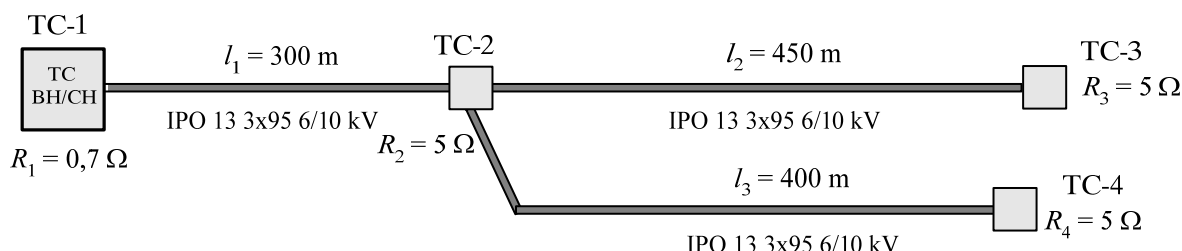
for k=1:m % dodav. na Rgr i Ygr na grankite od mrezata
    Y(ip(k),ip(k))=Y(ip(k),ip(k))+1/Zgr(k)+Ygr(k);
    Y(iq(k),iq(k))=Y(iq(k),iq(k))+1/Zgr(k)+Ygr(k);
    Y(ip(k),iq(k))=Y(ip(k),iq(k))-1/Zgr(k);
    Y(iq(k),ip(k))=Y(ip(k),iq(k));
end
Z = inv(Y); % inverzija na matricata Y

% Presmetka na naponite vo jazlite od ZS
for k=1:n; U(k)=Z(k,js)*Jz; end

% Presmetka na struite vo grankite od ZS
for k=1:m
    Igr(k)=(U(ip(k))-U(iq(k)))/Zgr(k);
    I1(k)=U(ip(k))*Ygr(k)+Igr(k); I2(k)=Igr(k)-U(iq(k))*Ygr(k);
end

% Rezultati od presmetkite
for k=1:n; UU(k)=round(abs(U(k))); end %naponi vo
jazlite od ZS
for k=1:nz; % potenijalni razliki na dopir i cekor
    kk = iz(k); Ed(k) = round(UU(kk)*ED(k)/100); Ec(k) =
round(UU(kk)*EC(k)/100);
end
return
```

Пример 1. (Решавање на задачата 7.5). На сликата 1.1 е прикажан еден кабелски извод изведен со каблите од типот IPO 13 3 x 95 6/10 kV со кои се врши поврзување на ТС СН/НН со изворната ТС ВН/СН.



**Слика 1.1. 10 kV кабелска мрежа од задачата 7.5
и модел на нејзиниот заземјувачки систем**

Каблите во поедините секции се со должини $l_1 = 300\text{m}$, $l_2 = 450\text{m}$ и $l_3 = 400\text{m}$ соодветно. Тие се поставени во земја со специфична отпорност $\rho = 100 \Omega\text{m}$ на длабочина од $0,7 \text{ m}$. Надворешниот пречник на кабелот изнесува $d_k = 0,045\text{m}$, импедансата по единица должина на металниот плашт заедно со челичната арматура е $\underline{z} = (0,7 + j2,0) \Omega/\text{km}$.

Отпорноста на распростирање на мрежестиот заземјувач на ТС ВН/СН е $R_1 = 0,7 \Omega$, инјектираната струја при еднофазна куса врска на примарните собирници на ТС ВН/СН е $I_1 = 1000 \text{ A}$. Сите ТС СН/НН имаат исти вредности на отпорите на распростирање на заштитното заземјување и тие изнесуваат $R_2 = R_3 = R_4 = 5 \Omega$.

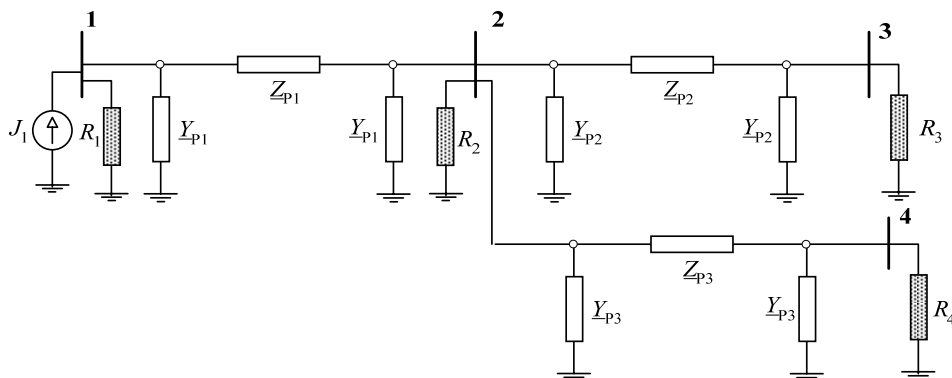
Решение

Најнапред треба да ги индексираме јазлите на мрежата при што индексите треба да одат од 1 до 4 (во општ случај од 1 до n , последователно без прескокнати броеви), а потоа ги пресметуваме параметрите на елементите на заменските шеми на каблите чии вредности се дадени во табелата 1.1.

Табела 1.1. Параметри на заменските шеми на одделните кабелски секции од мрежата

Секција	Должина	$\underline{Z}_p(\Omega)$	$\underline{Y}_p(\text{S})$
TC1–TC2	300 m	$0,14 + j0,651$	$0,617 - j0,038$

TC2–TC3	450 m	$0,082 + j1,057$	$0,845 - j0,107$
TC2–TC4	400 m	$0,116 + j0,914$	$0,774 - j0,08$



Слика 1.2. Заземјувачки систем на 10 kV кабелска мрежа

На сликата 1.2 е прикажано електричното коло со кое е претставен заземјувачкиот систем на набљудуваната кабелска мрежа. Во него секоја кабелска секција е претставена со соодветната П–еквивалентна шема, додека секој заземјувач на поедините ТС е прикажан со неговата отпорност на распростирање. Во колото на ЗС се наоѓа и струјниот генератор J_1 со кој што се моделира струјата на земјоспојот.

Резултатите од пресметките ги сместуваме во текстуална (ascii) датотека со име [Mreza1.dat](#) (сместена во фолдерот [D:\ASE](#)) која што го има следниот изглед :

```
1, 2, 0.14034, 0.65136, 0.61775, -0.03790
2, 3, 0.08167, 1.05700, 0.84507, -0.10671
2, 4, 0.11637, 0.91395, 0.77440, -0.07954
```

Во секоја редица од оваа датотека се сместени податоци за една гранка (кабел), при што нивното значење е следното :

- 1) индекс на почетниот јазел на гранката;
- 2) индекс на крајниот јазел на гранката;
- 3) реален дел од надолжната импеданција на гранката, Ω ;
- 4) имагинарен дел од надолжната импеданција на гранката, Ω ;
- 5) реален дел од попречната проводност на гранката, S;
- 6) имагинарен дел од попречната проводност на гранката, S.

Податоците за заземјувачите ги сместуваме во друга текстуална датотека со име `Zazem1.dat` (сместена во фолдерот `D:\ASE`) која што го има следниот изглед :

```
1, 0.7, 18, 12
2, 5, 12, 9
3, 5, 16, 13
4, 5, 16, 13
```

Во секоја редица од оваа датотека се сместени податоци за еден заземјувач од мрежата, при што нивното значење е следното:

1. индекс на јазелот во кој се наоѓа заземјувачот;
2. отпорност на распростирање на заземјувачот (Ω);
3. најголем напон на допир на заземјувачот (%);
4. најголем напон на чекор на заземјувачот (%).

Читањето на податоците за гранките во Matlab се прави со помош на командата:

```
MRZ = load('Mrezal.dat');
```

со што во Matlab е формирана променливата `MRZ` која ја има следната вредност:

```
1  1  2  0.1403  0.6514  0.6178  -0.0379
2  2  3  0.0817  1.0570  0.8451  -0.1067
3  3  4  0.1164  0.9140  0.7744  -0.0795
```

т.е. таа ги содржи параметрите на каблите онака како што тие се внесени во датотеката `Mrezal.dat`.

На сличен начин се вчитуваат и податоците за заземјувачите во мрежата со командата:

```
ZAZ = load('Zazem1.dat');
```

со што се добива променливата `ZAZ` која ќе има вредност:

```
1, 0.7, 18, 12
2, 5, 12, 9
3, 5, 16, 13
4, 5, 16, 13
```

Откако ќе се формира матрицата \underline{MRZ} , слди постапката за формрање на матрицата на адмитанси \underline{Y} на ЗС.

$$\underline{Y} = \begin{pmatrix} 2.362 - 1.505i & -0.316 + 1.467i & 0 & 0 \\ -0.316 + 1.467i & 2.963 - 3.708i & -0.073 + 0.94i & -0.137 + 1.077i \\ 0 & -0.073 + 0.94i & 1.118 - 1.047i & 0 \\ 0 & -0.137 + 1.077i & 0 & 1.111 - 1.156i \end{pmatrix}.$$

Со инверзија на матрицата \underline{Y} ја добиваме матрицата \underline{Z} која изнесува:

$$\underline{Z} = \text{inv}(\underline{Y});$$

$$\underline{Z} = \begin{pmatrix} 0.327 + 0.134i & 0.11 - 0.041i & 0.033 - 0.064i & 0.044 - 0.067i \\ 0.11 - 0.041i & 0.199 + 0.093i & 0.129 - 0.04i & 0.146 - 0.029i \\ 0.033 - 0.064i & 0.129 - 0.04i & 0.518 + 0.374i & 0.054 - 0.074i \\ 0.044 - 0.067i & 0.146 - 0.029i & 0.054 - 0.074i & 0.499 + 0.375i \end{pmatrix}.$$

Откако ќе ја добиеме матрицата \underline{Z} познавајќи ја матрицата на инјектираните струи во јазлите, може да ги пресметаме напоните во секој од јазлите на ЗС, користејќи ја релацијата (1.2).

Матрицата на инјектирани струи во јазлите претставува (како што беше и порано кажано) матрица колона која во нашите разгледувања ќе содржи нулти елементи освен елементот којшто се наоѓа во редицата која соодветствува на јазелот во којшто настанал земјоспој, и вредноста на инјектираната струја во тој јазел е еднаква на струјата на доземниот спој. Во нашиот случај, бидејќи имаме еднофазна куса врска во јазелот $js = 1$ со вредност од $I_z = 1000$ А, матрицата колона со инјектираните струи во јазлите е:

$$\underline{J} = \begin{bmatrix} 1000 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Напоните на јазлите ги пресметуваме со изразот:

$$\underline{U}_k = \underline{Z}_{k,js} \cdot I_z; \quad k = 1, 2, 3, 4.$$

или со командата:

```
% Presmetka na naponite vo jazlite od ZS
for k=1:n; U(k)=Z(k,js)*Jz; end
```


со што добиваме:

$$U = \begin{bmatrix} 327.23 + j134.46 \\ 110.45 - j40.55 \\ 33.34 - j64.33 \\ 43.63 - j66.60 \end{bmatrix}$$

Модулите на напоните $|\underline{U}_k|$ во јазлите од ЗС се сместуваат во векторот UU , кој заокружен на цели броеви, ги добива следните вредности на напоните во јазлите (V):

$$UU = [354 \quad 118 \quad 72 \quad 80]$$

На крајот останува уште да се пресметаат најголемите напони на допир и чекор U_d и U_c кај секој заземјувач. При тоа, за овие напони, заокружени на цели броеви, во (V), добиваме:

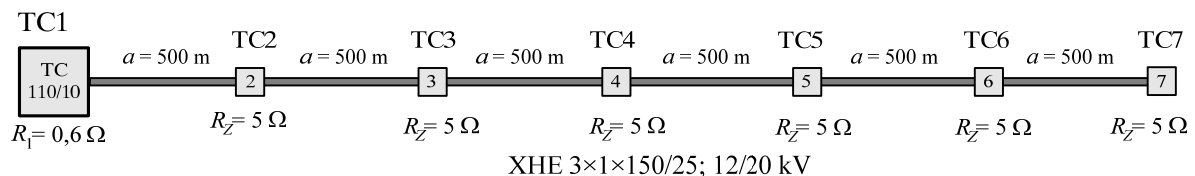
$$E_d = \begin{matrix} 64 & 14 & 12 & 13 \end{matrix}$$

$$E_c = \begin{matrix} 42 & 11 & 9 & 10 \end{matrix}$$

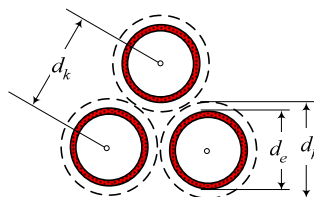
$$\square \quad \square \quad \square$$

1.3. Примери за пресметка на извоз на потенцијали

Пример 2. (Решавање на задачата 7.8). Ќе разгледаме еден 10 kV кабелски извод (слика 1.3), изведен со кабли од типот ХНЕ 49А 3×1×150/25 12/20 kV. Жилите на кабелот се сместени во кабелски ров на длабочина $h = 0,7$ m во формација триаголник. Надворешниот механички пречник на секоја жила изнесува $d_k = 0,03$ m. Секоја жила на изолацијата има т.н "електрична заштита" во форма на бакарни жици преку кои се намотани и бакарни ленти, со вкупен пресек 25 mm^2 . Таа може да се еквивалентира со шуплива цевка со надворешен пречник $d_e = 0,025$ m. Растојанието помеѓу оските на таквите шупливи цевки изнесува d_k (слика 1.3). Должината на кабелскиот извод изнесува $l = 3000$ m и може да се смета дека напојуваните 6 ТС се рамномерно распоредени по неговата должина, на растојание $a = 500$ m, како на сликата 1.2. Секоја ТС СН/НН има сопствен заштитен заземјувач кој ги има следните карактеристики $R_z = 5 \Omega$, $U_{d,\max} = 14\%$, $U_{d,\max} = 7\%$. При еднофазна куса врска во ВН дел од напојната ТС 110/10 kV струјата на земјоспој изнесува 2280 А. Отпорот на распростирање на мрежестиот заземјувач на ТС ВН/СН е $R_1 = 0,6 \Omega$.



Слика 1.3. 10 kV кабелски извод со 6 ТС СН/НН



Слика 1.4. Диспозиција на кабелските жили

Решение

И во овој случај ќе ја користиме истата програма RZS.m со таа разлика што сега ќе имаме други влезни датотеки со податоци за гранките и заземјувачите. Тие датотеки се

[Mreza2.dat](#) во која ги сместуваме параметрите на каблите од мрежата и која го има следниот изглед:

```
1, 2, 0.145, 0.334, 0, 0
2, 3, 0.145, 0.334, 0, 0
3, 4, 0.145, 0.334, 0, 0
4, 5, 0.145, 0.334, 0, 0
5, 6, 0.145, 0.334, 0, 0
6, 7, 0.145, 0.334, 0, 0
```

И датотеката [Zazem2.dat](#) во која се дадени податоците за заземјувачите и која го има следниот изглед:

```
1, 0.6, 14, 7
2, 5, 14, 7
3, 5, 14, 7
4, 5, 14, 7
5, 5, 14, 7
6, 5, 14, 7
7, 5, 14, 7
```

Единствената промена која што треба да ја направиме во програмата [RZS.m](#) е во промената на влезните датотеки така што сега имаме:

```
MRZ = load('Mreza2.dat'); % zadaca 7.8
ZAZ = load('Zazem2.dat');
```

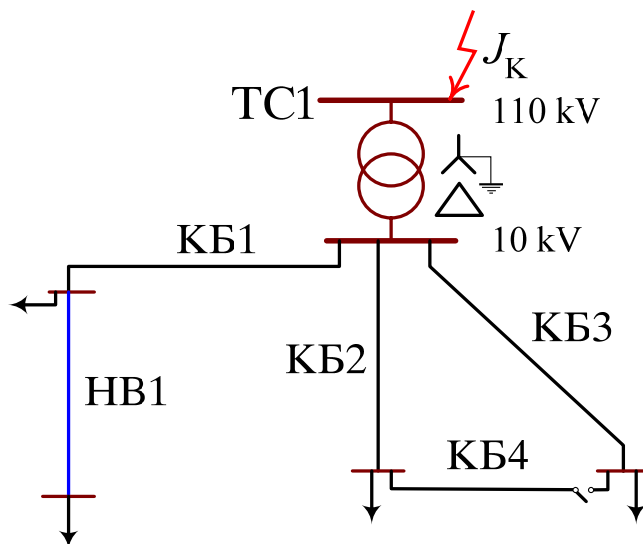
На крајот како решение за напоните на заземјувачите и максималните вредности на напоните на допир и чекор добиваме:

$$UZ = \begin{pmatrix} 999.881 \\ 810.807 \\ 673.016 \\ 578.429 \\ 518.663 \\ 485.119 \\ 470.456 \end{pmatrix} \quad UZD = \begin{pmatrix} 99.988 \\ 81.081 \\ 134.603 \\ 173.529 \\ 207.465 \\ 97.024 \\ 117.614 \end{pmatrix} \quad UZC = \begin{pmatrix} 99.988 \\ 56.756 \\ 80.762 \\ 86.764 \\ 93.359 \\ 58.214 \\ 47.046 \end{pmatrix}$$

□ □ □

Пример 3. (Решавање на задачата слична на примерот од слика 8.1. од главата 8).

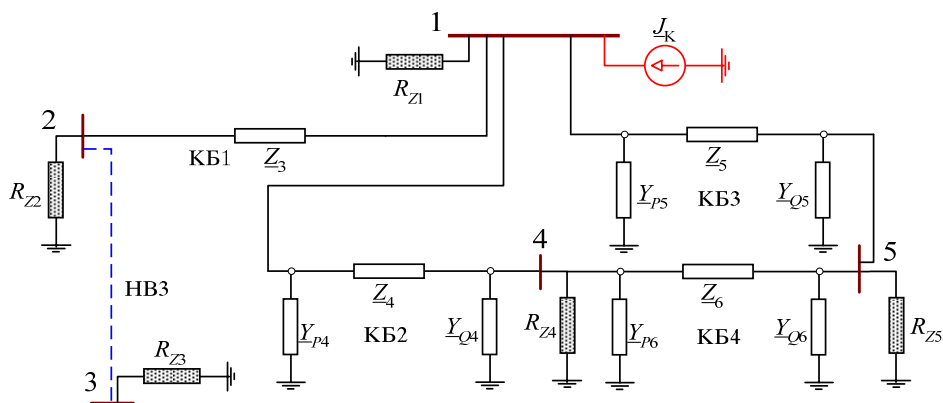
Даден е заземјувачкиот систем на една сложена мрежа прикажан на сликата 1.5. Кабелот КБ1 е со изолиран плашт од типот ХНЕ со должина $l_1 = 500$ m, додека останатите податоци за кабелот се исти како во примерот 2. Каблите КБ2, КБ3 и КБ4 се со неизолиран плашт од типот IPO 13 со должина $l_2 = 500$ m, $l_3 = 700$ m и $l_4 = 500$ m. Начинот на којшто се поставени каблите и нивните карактеристики се како во примерот 1. Надземниот вод НВ1 е без заштитно јаже, додека кабелот КБ4 е отворен на едната страна. Вкупната струја на куса врска изнесува која што се инјектира во мрежестиот заземјувач на трафостаницата е $J_k = 3$ kA. Да се пресметаат напоните на секој заземјувач, како и најголемите напони на допир и чекор.



Слика 1.4. Сложена 10 kV мрежа

Решение

Еквивалентата шема на заземјувачкиот систем е дадена на сликата 1.5 каде што може да се забележи дека гранката 2-3 е во прекин затоа што водот НВ3 нема заштитно јаже. Но во случајот на кабелот КБ4, постои врска помеѓу јазлите 4 и 5 иако тој во дадениот случај е исклучен од едната страна. Тоа ништо не менува во заземјувачкиот систем затоа што тој постојано ги поврзува заземјувачите на јазлите 4 и 5 преку својот метален плашт.



Влезните датотеки во овој случај се:

Mreza3.dat

```

1, 1, 2, 0.145, 0.334, 0, 0
2, 2, 3, 1000000, 1000000, 0, 0
3, 1, 4, 0.028, 1.208, 0.91, -0.138
4, 1, 5, -0.429, 1.888, 1.105, -0.291
5, 4, 5, 0.028, 1.208, 0.91, -0.138

```

Гранката 2-3 која е прекината и има бесконечно голем отпор во влезната датотека е претсавена со редна гранка чии активен и реактивен отпор изнесуваат по 10 MΩ.

Zazem3.dat

```

1, 0.5, 10, 10
2, 5, 30, 15
3, 5, 40, 18
4, 5, 20, 12
5, 5, 25, 10

```

Решението е:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{UZ} &= \begin{pmatrix} 629.968 \\ 610.928 \\ 0.002 \\ 200.627 \\ 166.199 \end{pmatrix} & \mathbf{UZD} &= \begin{pmatrix} 62.997 \\ 183.278 \\ 0.001 \\ 40.125 \\ 41.55 \end{pmatrix} & \mathbf{UZC} &= \begin{pmatrix} 62.997 \\ 91.639 \\ 0 \\ 24.075 \\ 16.62 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

каде за одбележување е дека напонот на јазелот 3 е нула затоа што тој нема врска со остатокот од заз. систем.

□ □ □