

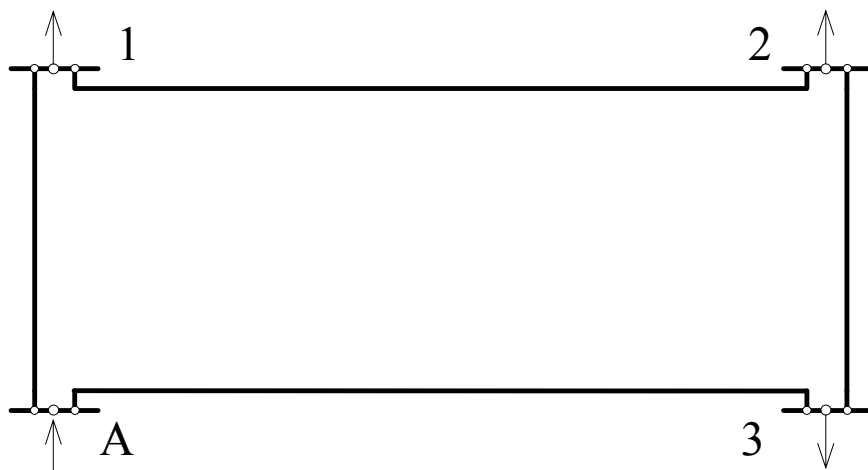
5. ПРЕСМЕТКА НА ЈАМКАСТИ И СЛОЖЕНО-ЗАТВОРЕНИ МРЕЖИ

Основниот недостаток на отворените мрежи е малата сигурност на електроснабдувањето на потрошувачите со електрична енергија. При повреда на еден од водовите доаѓа до прекин во снабдувањето со електрична енергија на сите потрошувачи кои се напојуваат преку него, а прекилот ќе трае сѐ до откривањето и отстранувањето на повредата, што може да изнесува и неколку десетини саати.

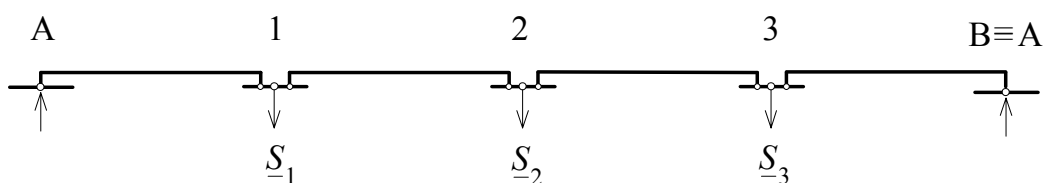
Подоверливо напојување со електрична енергија на потрошувачите се постига со градба на **затворени мрежи**, кои од своја страна се делат на:

- *јамкасти* (јамаксти) и
- *сложено-затворени*.

5.1. РАСПРЕДЕЛБА НА МОЌНОСТИ ВО ЈАМКАСТИ МРЕЖИ



Слика 5.1. Јамкаста (прстенеста) мрежа

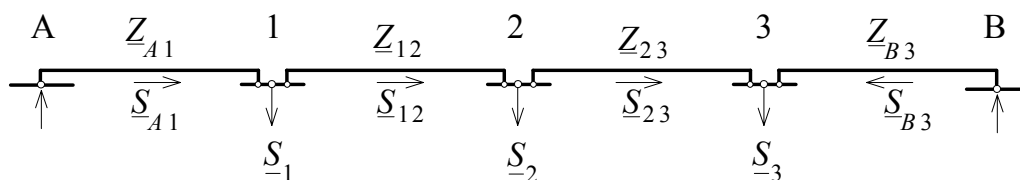


Слика 5.2. Прстенеста мрежа отворена во точката на напојување (двострано напојувана мрежа)

Да го разгледаме случајот на едноставна јамкаста мрежа (слика 5.1). Нека мрежата се состои од 4 водови меѓусебно поврзани со точките "А" , "1", "2" и "3". Мрежата се напојува од точката "А". Ако прстенот (јамката) кој го образуваат четирите вода го пресечеме низ напојната точка "А" и го отвориме (развиеме), ќе ја добиеме шемата од сликата 5.2, која претставува магистрален вод напојуван од двата краја. Притоа напоните во крајните точки "А" и "В" имаат еднакви ефективни вредности и еднакви фазни агли, што е сосема разбирливо, бидејќи точките "А" и "В" всушност претставуваат една иста точка.

Пресметката на двострано-напојуваната мрежа од сликата 5.2 се врши со помош на пресметковната шема, прикажана на сликата 5.3. Во оптоварувањата $\underline{S}_1$, $\underline{S}_2$ и $\underline{S}_3$, прикажани во мрежата, се вклучени и генерираните реактивни моќности на поедините водови. Исто така, доколку јазлите "1", "2" и "3" претставуваат трансформаторски станици (ТС) , во споменатите потрошувачи ќе треба да бидат вклучени и загубите на моќност во самите трансформатори.

Насоките на моќностите низ гранките од мрежата $\underline{S}_{A-1}$, $\underline{S}_{1-2}$, $\underline{S}_{2-3}$ и $\underline{S}_{B-3}$ се усвојуваат произволно. Вистинските насоки на моќностите ќе се добијат како резултат на пресметките.



Слика 5.3. Двострано напојувана мрежа со еднакви напони на краиштата

Во првата апроксимација претпоставуваме дека нема загуби на моќност во водовите и дека сите напони во мрежата се еднакви на номиналниот. Бидејќи точките "А" и "В" во мрежата од сликата 5.3 се една иста точка, за јамката А-1-2-3-А можеме , според II Кирхофов закон, да напишеме:

$$\underline{Z}_{A1} \cdot \underline{I}_{A1} + \underline{Z}_{12} \cdot \underline{I}_{12} + \underline{Z}_{23} \cdot \underline{I}_{23} - \underline{Z}_{B3} \cdot \underline{I}_{B3} = 0 . \quad (5.1)$$

Бидејќи е претпоставено дека сите напони се еднакви на номиналниот, за струјата I_{ij} низ гранката " $i - j$ " може да се пишува:

$$I_{ij} = \frac{\underline{S}_{ij}^*}{\sqrt{3} \cdot U_n}, \text{ т.е. } \underline{S}_{ij} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{ij}^* . \quad (5.2)$$

Според тоа, ако равенката (5.1) ја конјугираме и потоа целата ја помножиме со $\sqrt{3} \cdot U_n$, ќе добиеме:

$$\underline{S}_{A1} \cdot \underline{Z}_{A1}^* + \underline{S}_{12} \cdot \underline{Z}_{12}^* + \underline{S}_{23} \cdot \underline{Z}_{23}^* - \underline{S}_{B3} \cdot \underline{Z}_{B3}^* = 0 . \quad (5.3)$$

Бидејќи ги занемаривме загубите, моќностите низ гранките од мрежата ќе ги добиеме на едноставен начин ако ги изразиме преку моќноста $\underline{S}_{A1}$ низ водот А-1 и преку моќностите на потрошувачите, т.е:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{12} &= \underline{S}_{A1} - \underline{S}_1; \\ \underline{S}_{23} &= \underline{S}_{A1} - \underline{S}_1 - \underline{S}_2; \\ \underline{S}_{B3} &= \underline{S}_1 + \underline{S}_2 + \underline{S}_3 - \underline{S}_{A1} . \end{aligned} \quad (5.4)$$

Ако моќностите $\underline{S}_{ij}$ од релациите (5.3), изразени преку непознатата моќност $\underline{S}_{A1}$ ги замениме во (5.1), ќе добиеме:

$$\begin{aligned} &\underline{S}_{A1} \cdot \underline{Z}_{A1}^* + (\underline{S}_{A1} - \underline{S}_1) \cdot \underline{Z}_{12}^* + (\underline{S}_{A1} - \underline{S}_1 - \underline{S}_2) \cdot \underline{Z}_{23}^* - \\ &- (\underline{S}_1 + \underline{S}_2 + \underline{S}_3 - \underline{S}_{A1}) \cdot \underline{Z}_{B3}^* = 0 \end{aligned} \quad (5.5)$$

т.е.

$$\begin{aligned} &\underline{S}_{A1} \cdot (\underline{Z}_{A1}^* + \underline{Z}_{12}^* + \underline{Z}_{23}^* + \underline{Z}_{B3}^*) - \underline{S}_1 \cdot (\underline{Z}_{12}^* + \underline{Z}_{23}^* + \underline{Z}_{B3}^*) - \\ &- \underline{S}_2 \cdot (\underline{Z}_{23}^* + \underline{Z}_{B3}^*) - \underline{S}_3 \cdot \underline{Z}_{B3}^* = 0 \end{aligned} \quad (5.6)$$

Ако ги воведеме ознаките:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{AB} &= \underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{B3}; \\ \underline{Z}_{1B} &= \underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{B3}; \\ \underline{Z}_{2B} &= \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{B3}, \end{aligned} \quad (5.7)$$

$$\underline{Z}_{A1} = \underline{Z}_{A1}; \quad \underline{Z}_{A2} = \underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{12}; \quad \underline{Z}_{A3} = \underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23}, \quad (5.8)$$

тогаш следува:

$$\underline{S}_{A1} = \frac{\underline{S}_1 \cdot \underline{Z}_{1B}^* + \underline{S}_2 \cdot \underline{Z}_{2B}^* + \underline{S}_3 \cdot \underline{Z}_{3B}^*}{\underline{Z}_{AB}^*} \text{ и} \quad (5.9)$$

$$\underline{S}_{B3} = \frac{\underline{S}_1 \cdot \underline{Z}_{A1}^* + \underline{S}_2 \cdot \underline{Z}_{A2}^* + \underline{S}_3 \cdot \underline{Z}_{A3}^*}{\underline{Z}_{AB}^*} .$$

Во општ случај, кога прстенестата мрежа напојува n оптоварувања, би било:

$$\underline{S}_{A1} = \frac{\sum_{i=1}^n \underline{S}_i \cdot \underline{Z}_{iB}^*}{\underline{Z}_{AB}^*} ; \quad (5.10)$$

$$\underline{S}_{Bn} = \frac{\sum_{i=1}^n \underline{S}_i \cdot \underline{Z}_{Ai}^*}{\underline{Z}_{AB}^*} .$$

По определувањето на моќностите $\underline{S}_{A1}$ и $\underline{S}_{Bn}$ низ главните делници од прстенот, со помош на I Кирхофов закон за моќности, применет на јазлите од мрежата "1", "2", "3" . . . "n", се определуваат и моќностите во останатите делови од мрежата.

Определувањето на тековите на моќностите во водовите од јамкастата мрежа, според наведените формули, е прва етапа од пресметката. По неа следи втора етапа, во која се пресметуваат загубите на напон и загубите на моќности во поедините делници од мрежата.

Ќе претпоставиме дека како резултат од првата етапа од пресметките е добиена распределба на тековите на моќности, како на сликата 5.4.а, при што кон точката "2" моќноста доаѓа од двете страни на мрежата. Ваквата точка во мрежата се нарекува *точка на раздел* или *разделна точка*, и на шемите обично се означува со зацрнет триаголник ▼.

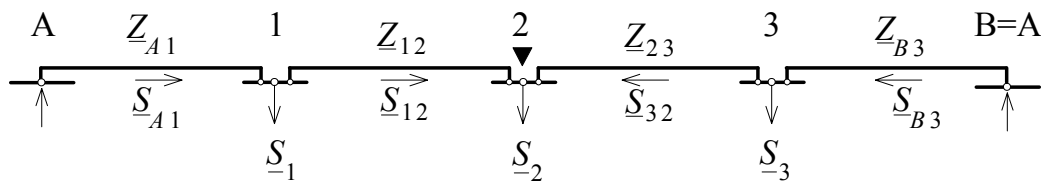
Очигледно е дека ништо нема да се измени ако во шемата од сликата 5.4 а извршиме раздвојување на мрежата во разделната точка, како што е тоа прикажано на сликата 5.4 б. При ова раздвојување потрошувачот $\underline{S}_2$ во разделната точка се дели на два фиктивни потрошувачи:

$$\underline{S}'_2 = \underline{S}_{12} \text{ и}$$

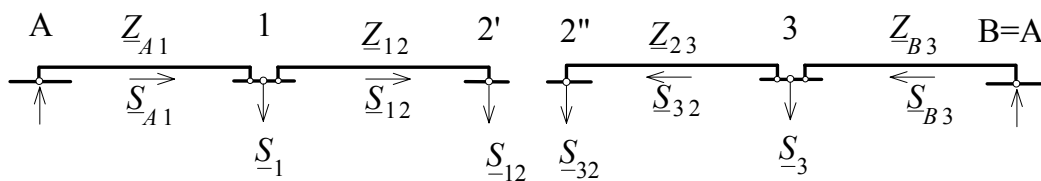
$$\underline{S}''_2 = \underline{S}_{32} ,$$

при што важи (види сл. 5.4 б и сл. 5.5):

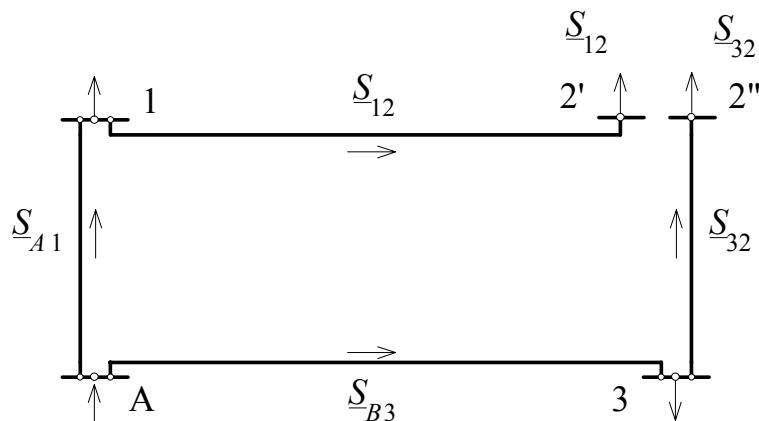
$$\underline{S}'_2 + \underline{S}''_2 = \underline{S}_{12} + \underline{S}_{32} = \underline{S}_2 .$$



Слика 5.4 а



Слика 5.4 б



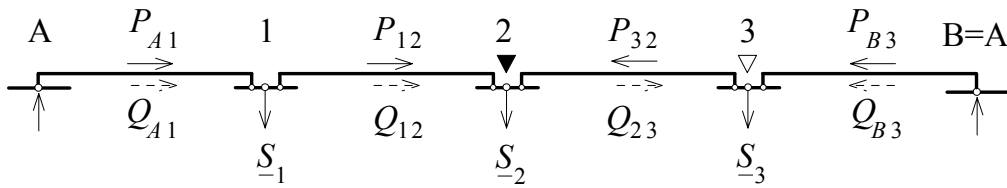
Слика 5.5. Сечење на мрежата во разделната точка

Значи, тековите на моќности низ водовите од мрежата прикажана на сликата 5.4 а, а исто така и напоните, се исти со моќностите и напоните во мрежата на сликата 5.4 б. Меѓутоа, шемата од сликата 5.4 б содржи **два независни дела** и секој од нив **претставува радијална** мрежа со познати оптоварувања и познат напон во напојната точка. Затоа натамошната пресметка може да се спроведува како и за радијалните мрежи.

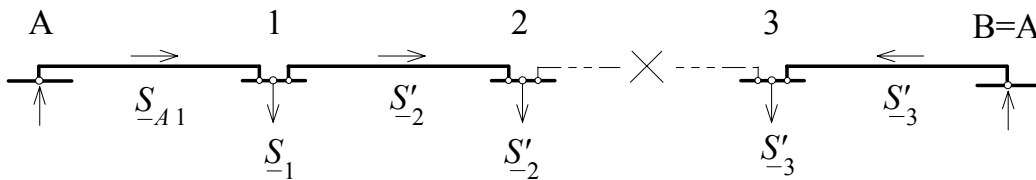
Доколку се работи за ВН преносна прстенеста мрежа, најнапред ќе биде потребно да се определат поточните вредности на моќностите, уважувајќи ги и загубите на моќност во секој од деловите на мрежата, а потоа да се премине кон пресметување на напоните во мрежата. Кај

дистрибутивните мрежи влијанието на загубите на моќноста обично не се зема предвид.

По изведувањето на првиот чекор од пресметките може да се случи во мрежата да се јават **две разделни точки** – едната за активна, а другата за реактивна моќност. Таков случај е прикажан на сликата 5.6 а, во која точката "2" е разделна точка за активна моќност и е обележена со знакот ▼, додека точката "3" е разделна точка за реактивната моќност и на сликата е обележена со знакот ▽.



Слика 5.6 а



Слика 5.6 б

И во овој случај, наместо да се разгледува двострано напојувана мрежа, како на сликата 5.6 а, може да се разгледуваат две радијални мрежи, како на сликата 5.6 б. Притоа, водот 2–3 е испуштен, но при определувањето на фиктивните оптоварувањата $\underline{S}'_2$ и $\underline{S}'_3$ треба да се земат во предвид и загубите на моќност во водот меѓу разделните точки "2" и "3". Овие загуби (приближно) изнесуваат:

$$\Delta P_{23} = \frac{P_{32}^2 + Q_{23}^2}{U_n^2} \cdot R_{23}; \quad \Delta Q_{23} = \frac{P_{32}^2 + Q_{23}^2}{U_n^2} \cdot X_{23}, \quad (5.11)$$

така што, за моќностите на фиктивните потрошувачи $\underline{S}'_2$ и $\underline{S}'_3$ се добива:

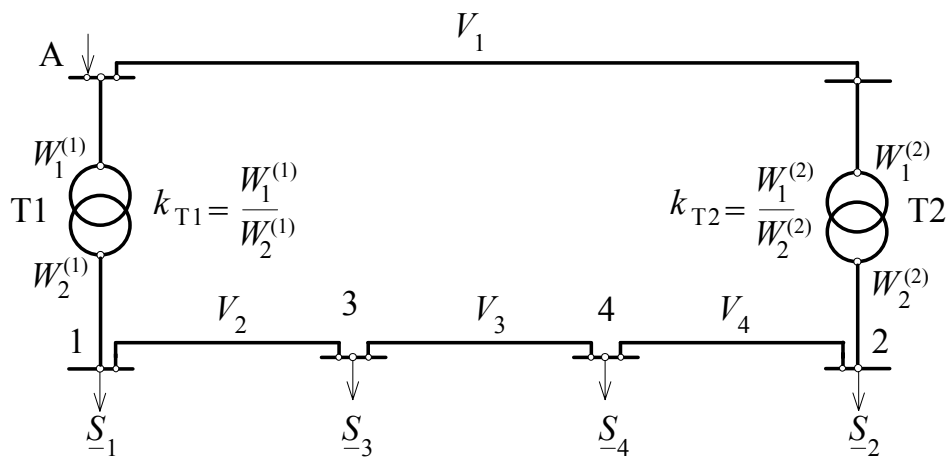
$$\underline{S}'_2 = P'_2 + jQ'_2 = P_{12} + j(Q_{12} + \Delta Q_{23}); \quad (5.12)$$

$$\underline{S}'_3 = P'_3 + jQ'_3 = (P_{B3} + \Delta P_{23}) + jQ_{B3}$$

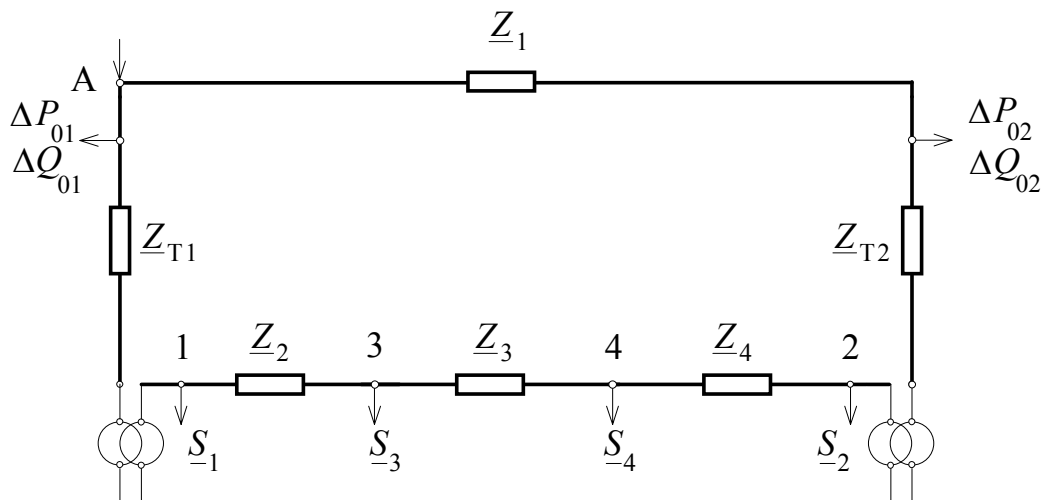
5.2. ЈАМКАСТА МРЕЖА СО ТРАНСФОРМАТОРИ

Да го разгледаме и случајот на мрежата чија шема е прикажана на сликата 5.7 а. Тука јамката ја образуваат водови од **две напонски нивоа**, поврзани со соодветни енергетски трансформатори.

Заменската шема на оваа мрежа е прикажана на сликата 5.7 б. Во неа фигурираат импеданциите на сите водови и трансформатори. Со **идеалните трансформатори**, чиито преносни односи на трансформација изнесуваат, k_{T1} и k_{T2} , респективно, прикажана е магнетската спрега меѓу двете мрежи со различни напонски нивоа.

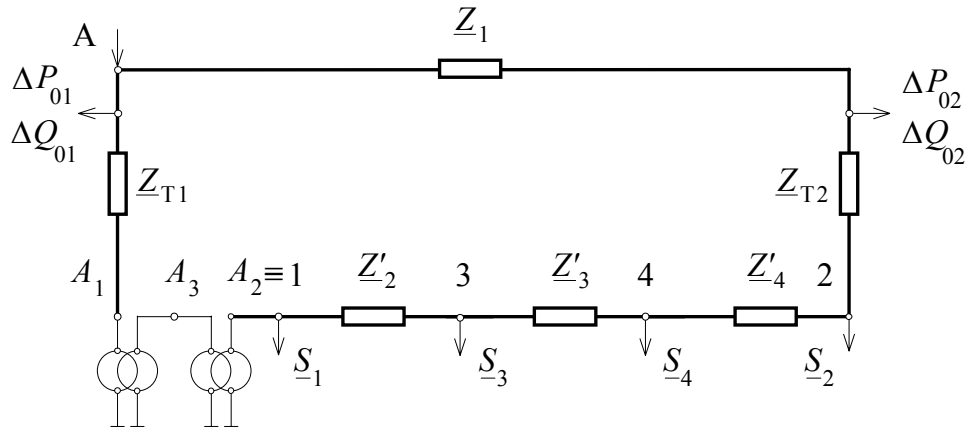


Слика 5.7 а

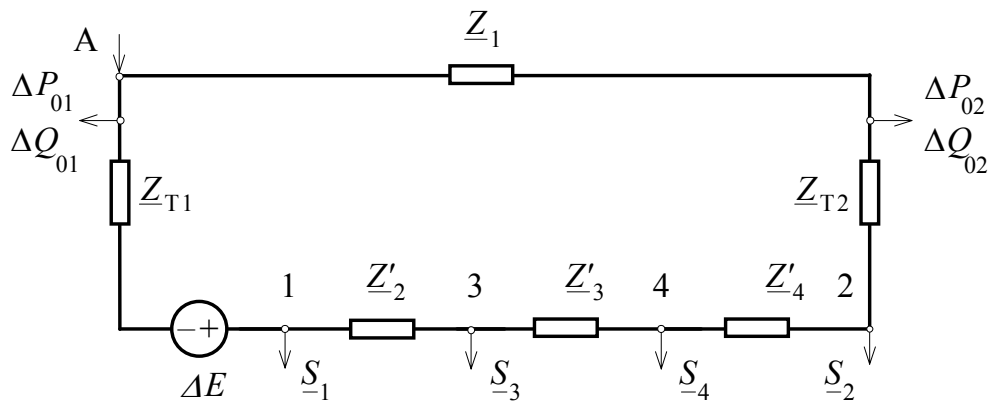


Слика 5.7 б

Ако импеданциите $\underline{Z}_2$, $\underline{Z}_3$ и $\underline{Z}_4$ се сведат на напонско ниво на водот V_1 со импеданција $\underline{Z}_1$, заменската шема на разгледуваната мрежа може да се претстави како на сликата 5.7 в. Во оваа шема идеалниот трансформатор T2 е преместен веднаш до идеалниот трансформатор T1.



Слика 5.7 в



Слика 5.7 г

Нека е познат напонот во точката "A1". Бидејќи во идеалните трансформатори нема ниту редни ниту паралелни импеданции, напонот во точката "A2" ќе го добиеме директно од преносниот однос на трансформаторот T1, т.е:

$$U_{A3} = U_{A1} \cdot \frac{W_2^{(1)}}{W_1^{(1)}} \cdot U_{A1} = \frac{U_{A1}}{k_{T1}}.$$

Слично, за трансформаторот T2 можеме да пишуваме:

$$U_{A3} = U_{A2} \cdot \frac{W_2^{(2)}}{W_1^{(2)}} = \frac{U_{A2}}{k_{T2}}.$$

Со изедначување на десните страни од последните две релации добиваме:

$$U_{A2} = U_{A1} \cdot \frac{k_{T2}}{k_{T1}} .$$

Значи ако двата трансформатора имаат **еднакви коефициенти** на трансформација ($k_{T1} = k_{T2}$), тогаш ќе биде $U_{A1} = U_{A2}$, па точките "A1" и "A2" можат да бидат кусо врзани, т.е. идеалните трансформатори ќе можеме да ги **испуштиме** од шемата.

Ако коефициентите на трансформација k_{T1} и k_{T2} не се меѓусебно еднакви, тогаш ни напоните во точките "A1" и "A2" нема да бидат меѓусебно еднакви, па точките "A1" и "A2" не ќе смееме да ги здружиме во една единствена точка. Во овој случај идеалните трансформатори ќе можат да се изостават од заменската шема само ако наместо нив, во неа вклучиме еден идеален напонски генератор (сл. 5.7 г), чија ЕМС $\underline{\Delta E}$ ќе се определи како:

$$\underline{U}_{A1} + \underline{\Delta E} = \underline{U}_{A2} ,$$

од каде што следува:

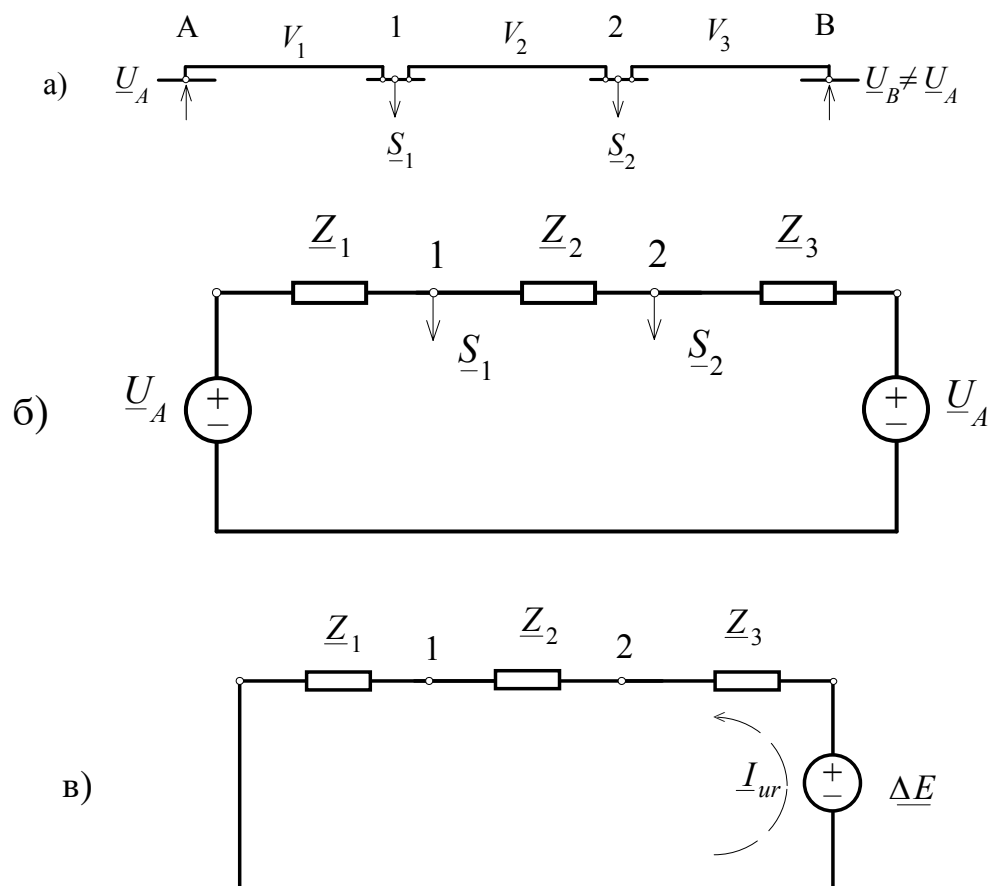
$$\underline{\Delta E} = \underline{U}_{A2} - \underline{U}_{A1} = \underline{U}_{A1} \cdot \left(\frac{k_{T2}}{k_{T1}} - 1 \right) . \quad (5.13)$$

Со тоа, заменската шема на мрежата може да се прикаже во облик како на сликата 5.7 г.

5.3. ДВОСТРАНО НАПОЈУВАНА МРЕЖА СО РАЗЛИЧНИ НАПОНИ НА КРАИШТАТА

При пресметката на електричните мрежи, напојувани од неколку независни извори на моќност, често се користи принципот на суперпозиција. Според овој принцип струите низ гранките од мрежата можат да се добијат како збир (суперпозиција) на низа компоненти, чиј број е еднаков на бројот на изворите (екситаациите) во мрежата. Секоја од компонентните струи се определува како последица на дејствувањето на само еден од изворите, додека напоните (односно ЕМС) на сите останати извори се земаат еднакви на нула.

Мрежа со двострано напојување и со различни напони на крајните точки спаѓа во редот на електричните мрежи со независни извори на моќност. Затоа и во овој случај ќе се применува принципот на суперпозиција. Еден од можните пристапи за решавањето на оваа мрежа е илустриран со шемите од сликата 5.8 а, 5.8 б и 5.8 в.



**Слика 5.8. Двострано напојувана мрежа
со различни напони на краиштата**

На сликата 5.8 а е прикажана појдовната шема а), при што $\underline{U}_A \neq \underline{U}_B$. Шемите б) и в) на сликата 5.8 се шеми соодветни за примена на **принципот на суперпозиција**. Притоа, напонот на точката "В" е разделен на две компоненти, од кои едната е еднаква со напонот на точката "А", т.е:

$$\underline{U}'_B = \underline{U}_A \quad ; \quad \underline{U}''_B = \underline{\Delta E} \quad ; \quad \underline{U}_B = \underline{U}'_B + \underline{U}''_B . \quad (5.14)$$

Струите во појдовната шема ќе се добијат како суперпозиција на два система на струи. Едниот систем се добива под дејство на напоните $\underline{U}_A = \underline{U}_B$ (при $\underline{\Delta E} = 0$) (сл. 5.8 б), а другиот се добива под дејство на ЕМС $\underline{\Delta E}$, при што е (сл. 5.7 в) :

$$\underline{U}_A = \underline{U}_B = 0 .$$

Наведените шеми овозможуваат да се изведат точни пресметки за појдовната шема. Но, во инженерската пракса многу често се прават определени претпоставки со кои се постигнува упростување во пресметките, при што точноста на решението (која во најголема мера зависи од точноста со која ги знаеме влезните податоци) се намалува во прифатлива мера.

Ако е во прашање мрежа со номинален напон $U_n \leq 110$ kV, може да се претпостави дека напоните во сите точки се еднакви на номиналниот и за пресметката на мрежата чија што шема е прикажана на сликата 5.8 б (двострано напојувана мрежа со еднакви напони на краиштата) можат да се користат веќе изведените формули (5.10):

$$\underline{S}_{A1} = \frac{\sum_{i=1}^n \underline{S}_i \cdot \underline{Z}_{iB}^*}{\underline{Z}_{AB}^*} \quad ; \quad \underline{S}_{Bn} = \frac{\sum_{i=1}^n \underline{S}_i \cdot \underline{Z}_{Ai}^*}{\underline{Z}_{AB}^*} .$$

Кога ја решаваме состојбата во мрежата (т.е. распределбата на моќности во мрежата) под дејство на ЕМС $\underline{\Delta E}$, потрошувачите $\underline{S}_1$ и $\underline{S}_2$ ќе треба да ги претставиме со нивните импеданции. Меѓутоа, бидејќи вредностите на овие импеданции во споредба со импеданциите од мрежата $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$ и $\underline{Z}_3$ се многу големи, тие практично нема да дејствуваат врз распределбата на струите и нив можеме да ги испуштиме. Во

тој случај, низ јамката ќе тече само *сирејата на урамнојежување (сирејата на изедначување)* I_{ur} .

$$I_{ur} = \frac{\Delta E_f}{Z_1 + Z_2 + Z_3} = \frac{U_{Bf} - U_{Af}}{Z_1 + Z_2 + Z_3} . \quad (5.15)$$

На тој начин за моќностите низ главните делови на мрежата добиваме:

$$\begin{aligned} S_{A1} &= \sqrt{3} \cdot U_A \cdot (-I_{ur})^* + \frac{S_1 \cdot (Z_2^* + Z_3^*) + S_2 \cdot Z_3^*}{Z_{AB}^*} ; \text{ и} \\ S_{B3} &= \sqrt{3} \cdot U_B \cdot I_{ur}^* + \frac{S_1 \cdot Z_1^* + S_2 \cdot (Z_2^* + Z_3^*)}{Z_{AB}^*} \end{aligned} \quad (5.16)$$

или

$$\begin{aligned} S_{A1} &= U_A \cdot \frac{U_A^* - U_B^*}{Z_{AB}^*} + \frac{S_1 \cdot (Z_2^* + Z_3^*) + S_2 \cdot Z_3^*}{Z_{AB}^*} ; \\ S_{B2} &= U_B \cdot \frac{U_B^* - U_A^*}{Z_{AB}^*} + \frac{S_1 \cdot Z_1^* + S_2 \cdot (Z_2^* + Z_3^*)}{Z_{AB}^*} . \end{aligned} \quad (5.17)$$

Во општ случај, кога мрежата напојува произволен број потрошувачи n , претходните формули ќе го имаат следниот облик:

$$\begin{aligned} S_{A1} &= U_A \cdot \frac{U_A^* - U_B^*}{Z_{AB}^*} + \sum_{i=1}^n \frac{S_i \cdot Z_{iB}^*}{Z_{AB}^*} ; \\ S_{B2} &= U_B \cdot \frac{U_B^* - U_A^*}{Z_{AB}^*} + \sum_{i=1}^n \frac{S_i \cdot Z_{Ai}^*}{Z_{AB}^*} . \end{aligned} \quad (5.18)$$

По пресметувањето на моќностите S_{A1} и S_{Bn} во **главните делници** од мрежата, се пристапува кон определувањето на моќностите низ **останатите гранки**, а потоа и кон определувањето на **разделната точка** во мрежата, на сосема ист начин како и кај јамкастите мрежи. Потоа се определуваат загубите на напонот од едната напојна точка до разделната точка, како и вкупните загуби на моќност во мрежата. За контрола на пресметаните моќности во мрежата може да се пресмета и загубата на напонот од другата страна на напојната точка.

5.4. МЕТОД НА РАЗДВОЈУВАЊЕ НА МРЕЖАТА

Решавањето на јамкастите и сложено-затворените мрежи, во општ случај, бара операции со комплексни броеви, при што резултатите се добиваат со висока точност. Но во праксата често се среќаваат задачи во кои се бара определување на **приближната распределба** на моќностите во мрежата (на пример при **димензионирање** на мрежата, при **проверка** на термичките оптоварувања на нејзините елементи како и при проверка на напонските прилики) кое треба да се врши повеќекратно, за разни вклопни состојби во мрежата и за разни режими на работа, при што не се бара висока точност на добиените резултати. Во таквите случаи од интерес е решението (макар и приближно) да го добиеме со што е можно помалку пресметковни операции и за што е можно пократко пресметковно време.

Секое упростување на пресметковната постапка, во принцип, доведува до скратување на обемот на пресметките, но и до намалување на точноста на резултатите. Ако упростувањата се значителни, а притоа се добиваат резултати со прифатлива точност, тогаш постапката има соодветно практично значење. Една од таквите постапки е и постапката условно наречена **раздвојување на мрежата**.

Нека е потребно да се пресмета распределбата на моќностите во јамкастата мрежа, во чиј состав влегуваат трансформатори со различни коефициенти на трансформација и од која се напојуваат неколку потрошувачи. Како што веќе беше покажано во поглавјето 5.2, во тој случај во заменската шема на мрежата се воведува напонски генератор со ЕМС $\underline{\Delta E}$, а сумата на падовите на напоните во импеданциите на заменската шема треба да биде еднаква на споменатата ЕМС $\underline{\Delta E}$. Ако притоа контурата се состои од m гранки низ кои што течат струите $\underline{I}_i$ ($i = 1, 2, \dots, m$), врз основа на II Кирхофов закон можеме да пишуваме:

$$\underline{\Delta E} = \sqrt{3} \cdot \underline{\Delta E}_f = \sqrt{3} \cdot \sum_{i=1}^m \underline{Z}_i \cdot \underline{I}_i . \quad (5.19)$$

Под претпоставката дека напоните во сите јазли од мрежата се приближно еднакви на номиналниот напон, множејќи ги обете страни од равенката (5.19) со U_n , добиваме:

$$\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \underline{\Delta E}_f = \underline{\varepsilon} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot \sum_{i=1}^m \underline{Z}_i \cdot \underline{I}_i = \sum_{i=1}^m (P_i - jQ_i) \cdot (R_i + jX_i) . \quad (5.20)$$

Ако се означи:

$$\underline{\varepsilon} = \sum_{i=1}^m (P_i \cdot R_i + Q_i \cdot X_i) - j \sum_{i=1}^m (P_i \cdot X_i - Q_i \cdot R_i) = \varepsilon_a + j\varepsilon_r , \quad (5.21)$$

следува:

$$\varepsilon_a = \sum_{i=1}^m (P_i \cdot R_i + Q_i \cdot X_i) ; \text{ и} \quad (5.22 \text{ а})$$

$$\varepsilon_r = \sum_{i=1}^m (P_i \cdot X_i - Q_i \cdot R_i) . \quad (5.22 \text{ б})$$

Ако е позната вредноста на $\underline{\varepsilon}$ (која може да биде и 0 доколку во контурите од мрежата воопшто нема трансформатори, што е многу чест случај, или пак доколку сите трансформатори во контурата имаат исти преносни односи), претходните две равенки заедно со соодветните равенки, напишани според I Кирхофов закон, овозможуваат да се определат моќностите во сите m гранки на разгледуваната мрежа.

Од равенките (5.22 а, б) се гледа дека распределбата на активните и реактивните моќности зависи како од активните така и од реактивните отпорности на елементите од мрежата.

Равенката (5.22 а) можеме да ја напишеме во облик:

$$\begin{aligned} \varepsilon_a = & \frac{R_1}{X_1} \cdot P_1 \cdot X_1 + \frac{R_2}{X_2} \cdot P_2 \cdot X_2 + \dots + \frac{R_n}{X_n} \cdot P_m \cdot X_m + \\ & + \frac{X_1}{R_1} \cdot Q_1 \cdot R_1 + \frac{X_2}{R_2} \cdot Q_2 \cdot R_2 + \dots + \frac{X_n}{R_n} \cdot Q_m \cdot R_m . \end{aligned} \quad (5.23)$$

Во посебен случај, кога важи условот:

$$\frac{X_1}{R_1} = \frac{X_2}{R_2} = \frac{X_3}{R_3} = \dots = \frac{X_n}{R_n} = \xi = \text{const.} , \quad (5.24)$$

мрежата се нарекува *хомогена*. Тогаш равенката (5.23) го добива обликот:

$$\varepsilon_a = \frac{1}{\xi} \cdot \sum_{i=1}^m P_i \cdot X_i + \xi \cdot \sum_{i=1}^m Q_i \cdot R_i . \quad (5.25)$$

Равенката (5.22 б) може да се напише на следниот начин:

$$\sum_{i=1}^m Q_i \cdot R_i = \sum_{i=1}^m P_i \cdot X_i - \varepsilon_r . \quad (5.26)$$

Со решавање на равенките (5.25) и (5.26) добиваме:

$$\sum_{i=1}^m P_i \cdot X_i = \frac{\varepsilon_a + \xi \cdot \varepsilon_r}{\xi + 1/\xi} = \varepsilon' , \quad (5.27 \text{ а})$$

$$\sum_{i=1}^m Q_i \cdot R_i = \frac{\varepsilon_a - \varepsilon_r / \xi}{\xi + 1/\xi} = \varepsilon'' . \quad (5.27 \text{ б})$$

Десните страни на равенките (5.27 а) и (5.27 б) можат да се сметаат за познати, бидејќи тие се еднозначно определени преку познатите вредности ε_a , ε_r и ξ . Равенката (5.27 а) служи за определување на распределбата на активните моќности, додека равенката (5.27 б) служи за определување на распределбата на реактивните моќности низ гранките од мрежата.

Последните две равенки се *независни* една од друга и кажуваат дека кај хомогените мрежи распределбата на *активните моќности* зависи само од *реактивните отпорности* на мрежата, а распределбата на *реактивните моќности*, зависи само од *активните отпорности*. Овој заклучок овозможува пресметката на приближната распределба на моќности да се упрости преку нејзиното спроведување на две заменски шеми. Првата од нив ќе биде составена само од реактанциите на мрежата и ќе служи за определување на распределбата на активните моќности. Втората шема ќе биде составена само од резистанциите на елементите од мрежата и врз основа на неа ќе се определува распределбата на реактивните моќности. На тој начин, појдовната заменска шема се раздвојува на две шеми, што дало повод оваа постапка да се нарече *метод на раздвојување на мрежата*.

Посебна погодност на овој метод е во тоа што со воведувањето на две шеми и со раздвојувањето на тековите

на активните и реактивните моќности е избегнато оперирањето со комплексни броеви, па работејќи само со реални броеви, пресметката значително се олеснува и забрзува.

Тргувајќи од равенката (5.22 б), на сосема аналоген начин, за хомогена мрежа се добиваат и следните релации:

$$\sum_{i=1}^m P_i \cdot R_i = \frac{\varepsilon_r + \varepsilon_a / \xi}{\xi + 1 / \xi} = \varepsilon_1 , \quad (5.28 \text{ а})$$

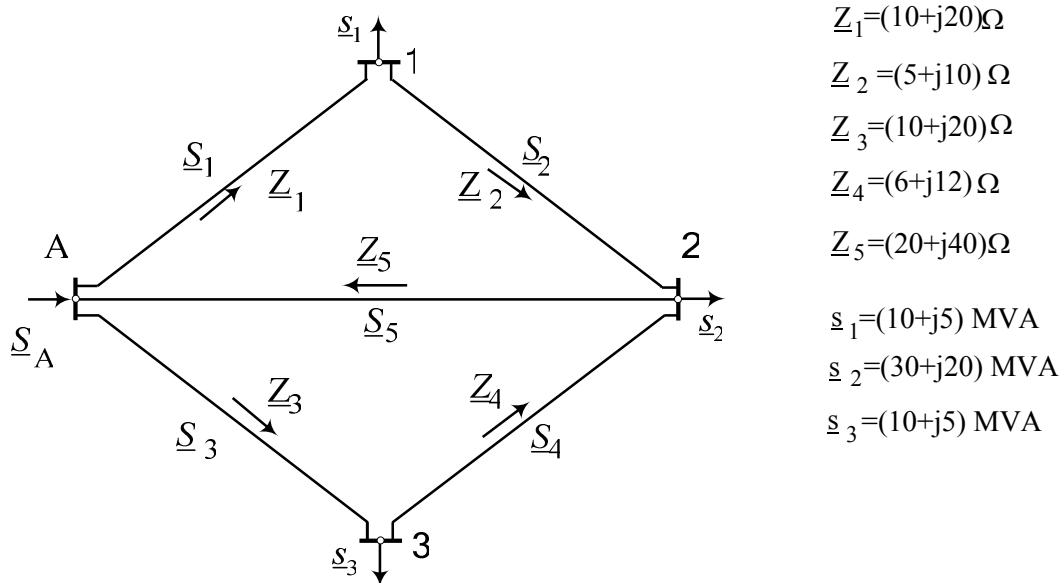
$$\sum_{i=1}^m Q_i \cdot X_i = \frac{\xi \cdot \varepsilon_a - \varepsilon_r}{\xi + 1 / \xi} = \varepsilon_2 . \quad (5.28 \text{ б})$$

Тоа значи дека распределбата на активните моќности кај хомогените мрежи може да се определи и со помош на заменската шема која содржи само активни отпорности, а распределбата на реактивните моќности може да се определи со користење на заменската шема, составена само од реактивните отпорности. Овој пристап е, во поглед на добиените резултати, сосема рамноправен со претходниот.

Ако мрежата **не е наполно хомогена**, т.е. ако во неа постојат и елементи со поинаков однос X/R , тоа ќе услови и определена **грешка** во резултатите од пресметките добиени со помош на методот на раздвојување. При поголема нехомогеност и грешката ќе биде поголема. Сепак, истражувањата покажале дека за вообичаените мрежи со номинален напон до 110 kV грешката обично не е голема. Притоа, претходните два пристапа не се подеднакво успешни.

Подобро приближување до вистинската распределба на моќностите се добива ако при пресметката со методот на раздвојување распределбата на **активните моќности** се определува преку заменската шема на мрежата составена од **реактанциите**, додека распределбата на **реактивните моќности** се определува преку заменската шема на мрежата, составена само од **резистанциите** на елементите од мрежата.

Задача бр. 1. 110 kV мрежа е прикажана на сликата 1.1. Познати се моќностите на потрошувачите во собирниците 1, 2 и 3, зададени во MVA, како и импеданциите на поедините водови, изразени во Ω . Да се одреди распределбата на моќности во мрежата.

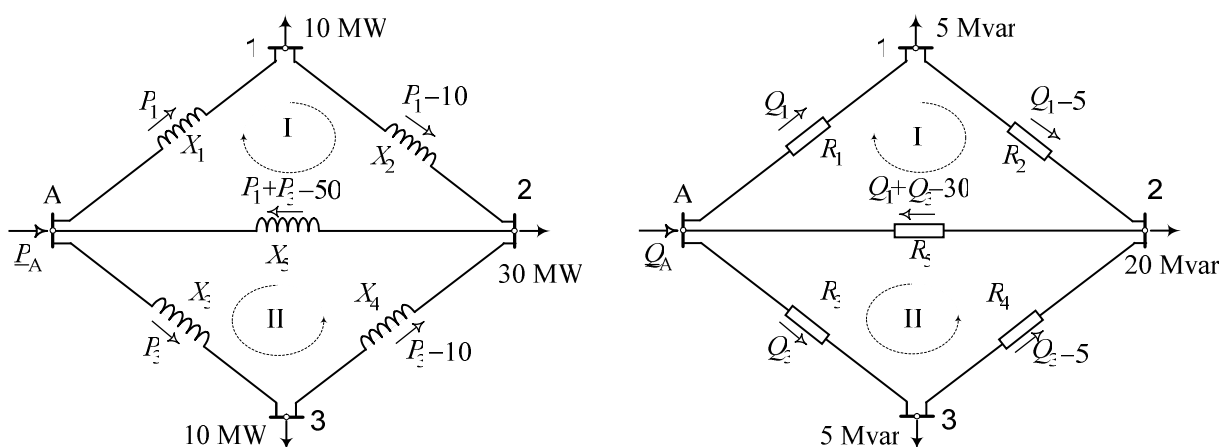


Слика 1.1. 110 kV мрежа со две независни контури

Решение

Бидејќи мрежата е хомогена (водовите имаат иста подолжна импеданција), можеме да го примениме методот на раздвојување. Значи, ќе формираме две шеми (слика 1.2).

Шемата од сликата 2–лево, составена само од реактанциите на елементите, ќе ни служи за определување на распределбата на активните моќности, додека шемата од сликата 2–десно, составена само од активните отпорности, ќе ни послужи за определување на тековите на реактивните моќности.



Слика 1.2. Раздвојување на хомогената мрежа на X и R – мрежа

Врз основа на Кирхофовите закони, за мрежата од шема од сл. 1.1 ги пишуваме равенките:

$$P_1 \cdot X_1 + (P_1 - 10) \cdot X_2 + (P_1 + P_3 - 50) \cdot X_5 = 0;$$

$$P_3 \cdot X_3 + (P_3 - 10) \cdot X_4 + (P_1 + P_3 - 50) \cdot X_5 = 0;$$

или во среден облик, по заменувањето на конкретните вредности за реактанциите на водовите X_i :

$$70 \cdot P_1 + 40 \cdot P_3 = 2100;$$

$$40 \cdot P_1 + 72 \cdot P_3 = 2120.$$

Решението на овој систем равенки ќе биде:

$$\mathbf{P_1 = 19,3 MW} \text{ и } \mathbf{P_3 = 18,7 MW}.$$

На сличен начин, за шемата од сликата 1.2–десно ги пишуваме равенките:

$$Q_1 \cdot R_1 + (Q_1 - 5) \cdot R_2 + (Q_1 + Q_3 - 30) \cdot R_5 = 0;$$

$$Q_3 \cdot R_3 + (Q_3 - 5) \cdot R_4 + (Q_1 + Q_3 - 30) \cdot R_5 = 0;$$

или, по заменувањето за вредностите на R_i :

$$35 \cdot Q_1 + 20 \cdot Q_3 = 625;$$

$$20 \cdot Q_1 + 36 \cdot Q_3 = 630;$$

од каде што се добива:

$$\mathbf{Q_1 = 11,5 Mvar} \text{ и } \mathbf{Q_3 = 11,2 Mvar}.$$

Значи, ги добиваме моќностите низ водовите А-1 и А-3:

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_{A-1} = (P_1 + jQ_1) = (19,3 + j11,5) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_3 = \underline{S}_{A-3} = (P_3 + jQ_3) = (18,7 + j11,2) \text{ MVA}.$$

Моќностите низ останатите водови се определуваат со примена на I Кирхофов закон за моќности:

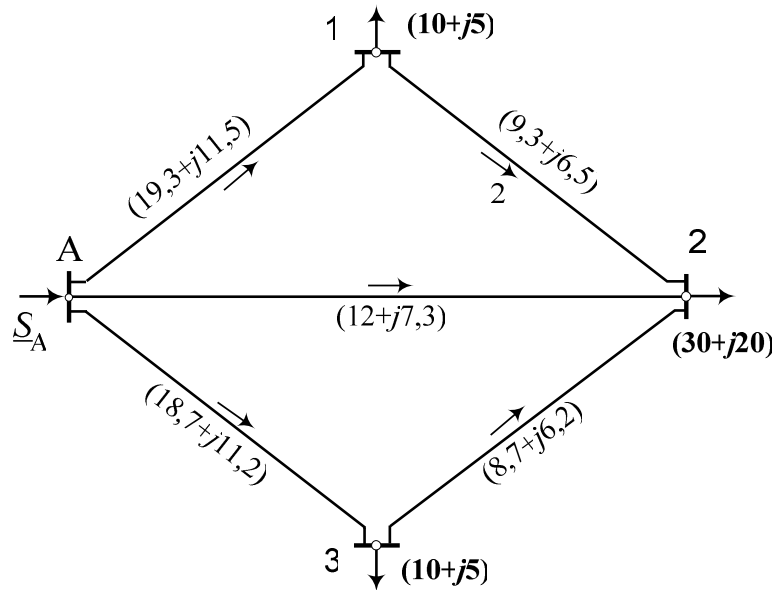
$$\underline{S}_2 = \underline{S}_{1-2} = \underline{S}_1 - \underline{s}_1 = (19,3 + j11,5) - (10 + j5) = (9,3 + j6,5) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_4 = \underline{S}_{3-2} = \underline{S}_3 - \underline{s}_3 = (18,7 + j11,2) - (10 + j5) = (8,7 + j6,2); \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_5 = \underline{S}_{2-A} = \underline{S}_1 + \underline{S}_3 - (\underline{s}_1 + \underline{s}_2 + \underline{s}_3) = (-12 - j7,3) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{A-2} = -\underline{S}_5 = (12 + j7,3) \text{ MVA}.$$

Распределбата на комплексните моќности во зададената мрежа е прикажана на сликата 1.3.

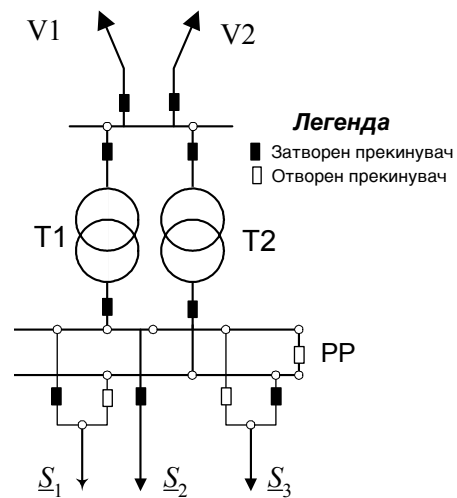


Слика 1.3. Интегрална распределба на моќности во мрежата



Задача бр. 2. Се посматра примерот обработуван во задачата 2.35. Сумарното оптоварување на трафостаницата изнесува $\underline{S}_{T\Sigma} = (P_{T\Sigma} + jQ_{T\Sigma}) = (50 + j24,22) \text{ MVA}$.

Трансформаторите T1 и T2 работат одвоено на секундарната (CH) страна и се различно оптоварени. Согласно на тоа тие работат со различни преносни односи, како што следи:



Слика 2.1

$$S_{T1} = (P_{T1} + jQ_{T1}) = (30 + j14,53) \text{ MVA};$$

$$k_{T1} = W_1 / W_2 = 110 \cdot (1 - 4 \times 1,25\%) / 10,5 = 9,952$$

$$S_{T2} = (P_{T2} + jQ_{T2}) = (20 + j9,69) \text{ MVA};$$

$$k_{T2} = W_1 / W_2 = 110 \cdot (1 + 2 \times 1,25\%) / 10,5 = 10,738.$$

Како што е пресметано во задачата 2.35, за ваквиот режим на работа загубите во трансформацијата изнесуваат:

$$\Delta P_{T\Sigma} = \Delta P_{T1} + \Delta P_{T2} = 182,53 + 101,13 = 283,66 \text{ kW}.$$

Да се пресмета каква ќе биде распределбата на моќности во трансформаторите и колкави ќе бидат загубите во секој од нив ако се затвори прекинувачот РР така што тие продолжат да работат во паралела и покрај тоа што имаат различни преносни односи.

Бројни вредности:

T1: 40 MVA; $(110+12 \times 1,25\%)/10,5 \text{ kV/kV}$; $u_k=11\%$; $i_0=0,6\%$;
 $\Delta P_{Cun} = 211 \text{ kW}$; $\Delta P_{Fe} = 36 \text{ kW}$; T2 $\equiv$ T1

Решение:

Кога обата трансформатора би работеле со еднакви преносни односи $k_{T1} = k_{T2}$, тогаш, сумарната моќност на потрошувачите ќе се подели на половина. Во тој случај би имале:

$$\underline{S}_{T\Sigma} = (P_{T\Sigma} + jQ_{T\Sigma}) = (50 + j24,16) \text{ MVA};$$

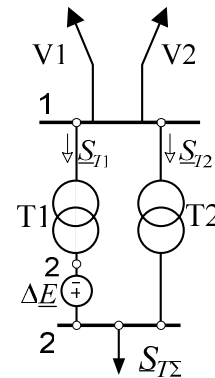
$$\underline{S}_{T1} = \underline{S}_{T\Sigma}/2 = (P_{T1} + jQ_{T1}) = (25 + j12,08) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{T2} = \underline{S}_{T\Sigma}/2 = (P_{T2} + jQ_{T2}) = (25 + j12,08) \text{ MVA}.$$

Во ваквиот режим на работа загубите во трансформацијата ќе бидат најмали и, како што е покажано во задачата 2.35, вкупните загуби во трансформацијата би изнесувале:

$$\Delta P_{T\Sigma} = \Delta P_{T1} + \Delta P_{T2} = 137,8 + 137,8 = 275,6 \text{ kW}.$$

Но во случајов поради тоа што е $k_{T1} \neq k_{T2}$, во контурата образувана од трансформаторите ќе се јави дополнителна ЕМС $\Delta \underline{E} = \sqrt{3} \cdot \Delta \underline{E}_f = \underline{U}_2 \cdot (k_{T2}/k_{T1} - 1)$. Таа ќе протера низ контурата струја на урамно тежување $\underline{I}_{ur}$ чија што вредност, во согласност со сликата 2.2, ќе ја добиеме на следниот начин. Најнапред ќе го пресметаме напонот $\underline{U}_2$ на СН собирница под услов обата трансформатора да работат со своите номинални преносни односи.



Слика 2.2

Нека притоа претпоставиме дека напонот на ВН страна е $\underline{U}_1 = \underline{U}_{1n} = 110 \text{ kV}$. Понатаму имаме:

$$\underline{U}_{1sv} = \underline{U}_1/k_{T1} = 110/(110/10,5) = 10,5 \text{ kV};$$

$$\underline{Z}_{T1} = \underline{Z}_{T2} = (0,015 + j0,303) \Omega; \text{ (сведено на СН страна)}$$

$$\Delta \underline{U}_d = \frac{P_{T1} \cdot R_{T1} + Q_{T1} \cdot X_{T1}}{\underline{U}_n} = 0,384 \text{ kV};$$

$$\Delta U_q = \frac{P_{T1} \cdot X_{T1} - Q_{T1} \cdot R_{T1}}{U_n} = 1,41 \text{ kV};$$

$$\Delta U_{T1} = \Delta U_d + \Delta U_q^2 / (2U_n) = 0,479 \text{ kV}.$$

$$U_2 = U_{1sv} - \Delta U_{T1} = 10,021 \text{ kV};$$

$$\Delta E = U_2 \cdot \left(\frac{k_{T2}}{k_{T1}} - 1 \right) = 10,021 \cdot \left(\frac{10,738}{9,952} - 1 \right) = 0,791 \text{ kV}.$$

$$I_{ur} = \Delta E_f / (Z_{T1} + Z_{T2}) = (0,036 - j0,752) \text{ kA}.$$

На струјата I_{ur} одговара моќноста на урамнотежување S_{ur} :

$$S_{ur} = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_{ur}^* = (0,655 + j13,668) \text{ MVA}.$$

Според тоа, моќностите S_{T1} и S_{T2} со коишто ќе бидат оптоварени трансформаторите T1 и T2 во овој режим ќе бидат:

$$S_{T1} = S_{T\Sigma} / 2 + S_{ur} = (25,655 + j25,778) \text{ MVA}; S_{T1} = 36,369 \text{ MVA};$$

$$S_{T2} = S_{T\Sigma} / 2 - S_{ur} = (24,394 - j1,558) \text{ MVA}; S_{T2} = 24,394 \text{ MVA}.$$

За ваквата распределба коефициентите на оптоварување на трансформаторите ќе бидат:

$$\alpha_1 = 36,857/40 = 0,909 \text{ и } \alpha_2 = 24,414/40 = 0,610.$$

Соодветно на тоа, загубите во трансформаторите ќе бидат:

$$\Delta P_{T1} = 36 + 211 \cdot 0,909^2 = 210,4 \text{ kW},$$

$$\Delta P_{T2} = 36 + 211 \cdot 0,610^2 = 114,5 \text{ kW},$$

$$\Delta P_{T\Sigma} = \Delta P_{T1} + \Delta P_{T2} = 210,4 + 114,5 = 324,9 \text{ kW}.$$

Значи вкупните загуби во трансформацијата се поголеми од загубите што би се имале за режимот кога трансформаторите работат одвоено на секундарната страна. Покрај ова, се забележува дека првиот трансформатор е оптоварен за околу 50% повеќе од вториот и по степенот на оптовареност тој е блиску до својата термичка граница. Тоа се должи на појавата на струјата (моќноста) на урамнотежување.

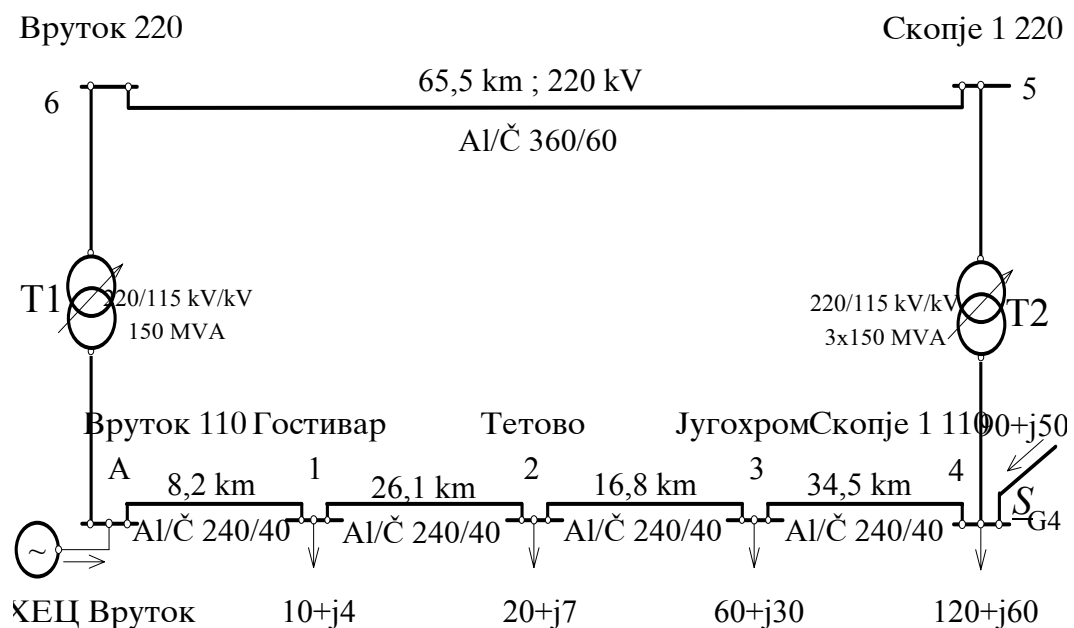
Од примерот може да се заклучи дека за да биде степенот на оптоварување на трансформаторите ист и за да бидат загубите во трансформацијата најмали ќе мора обата трансформатора да работат со усогласени (еднакви) преносни односи $k_{T1} = k_{T2}$ доколку сакаме тие да работат во паралела.

5.5. ПРИМЕРИ

Пример 5.1 Се посматра дел од високонапонската преносна мрежа на ЕЕС на Република Македонија, на потегот Вруток - Скопје, прикажан на сликата П.5.1.1. Мрежата работи во карактеристичниот режим на "максимално оптоварување". Потребно е да се пресмета приближната распределба на моќности во мрежата, напонските прилики во неа и да се проценат вкупните загуби во прикажаниот режим. Податоците за оптоварувањата на потрошувачите се дадени во табелата П.5.1.1, додека податоците за параметрите на елементите од мрежата (сведени на 110 kV страна) се дадени во табелата П.5.1.2. Водот 220 kV "Вруток 220 – Скопје 1 220" има подолжни параметри $\underline{z} = (0,08 + j0,42) \Omega/\text{km}$ и $b = 2,62 \mu\text{S}/\text{km}$. Останатите водови се за 110 kV напон и имаат исти подолжни параметри: $\underline{z} = (0,123 + j0,40) \Omega/\text{km}$ и $b = 2,75 \mu\text{S}/\text{km}$. Напонот во напојната точка "А" изнесува $U_A = 115 \text{ kV}$. За трансформаторите се познати следните податоци:

T1: 1 x 150 MVA (220 $\pm$ 12x1,25%)/115 kV/kV $u_k\% = 10,9\%$;

T2: 3x150 MVA (220 $\pm$ 12x1,25%)/115 kV/kV $u_k\% = 15,4\%$.



Слика П.5.1.1. Дел од ЕЕС на Република Македонија

Табела П.5.1.1. Податоци за потрошувачите во системот

реден број	Име на јазелот	Ознака во шемата	P_P MW	Q_P Mvar
1	Вруток 110	A	/	/
2	Гостивар	1	10	4
3	Тетово	2	20	7
4	Југохром	3	60	30
5	Скопје 1 110	4	120	60
6	Скопје 1 220	5	/	/
7	Вруток 220	6	/	0

Табела П.5.1.2. Податоци за параметрите на елементите

реден број	Елемент	Должина km	R Ω	X Ω	B μS
1	Вод А - 1	8,2	1,01	3,28	22,6
2	Вод 1 - 2	26,1	3,21	10,44	71,84
3	Вод 2 - 3	16,8	2,07	6,72	46,2
4	Вод 3 - 4	34,5	4,24	13,80	67,4
5	Трансформатор Т1	–	–	9,61	–
6	Трансформатор Т2	–	–	4,53	–
7	Вод 5 -6	65,5	1,43	7,52	628

Решение:

Бидејќи се работи за високонапонска мрежа, ќе мора да ги уважуваме капацитивностите на водовите и произведуваните реактивни моќности од нив. Затоа, пред да започнеме со пресметките, ќе ги пресметаме (процениме) генерираните моќности Q_{ci} ($i = 1, 6$) што се инјектираат во поедините јазли од мрежата поради присуството на капацитивноста на водовите. Потоа, инјектираните моќности Q_{ci} ќе ги "внесеме" во потрошувачите и на тој начин ќе добиеме мрежа без попречни гранки и нови, фиктивни потрошувачи, со намалени реактивни моќности.

$$Q_{c1} = b \cdot U_n^2 \cdot (l_{A-1} + l_{1-2}) / 2 =$$

$$= 2,75 \cdot 10^{-6} \cdot 110^2 \cdot (8,2 + 26,1) / 2 = \mathbf{0,57 \text{ Mvar}};$$

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_{P1} - jQ_{c1} = (10 + j3,43) \text{ MVA},$$

$$Q_{c2} = b \cdot U_n^2 \cdot (l_{1-2} + l_{2-3}) / 2 =$$

$$= 2,75 \cdot 10^{-6} \cdot 110^2 \cdot (26,1 + 16,8) / 2 = \mathbf{0,71 \text{ Mvar}};$$

$$\underline{S}_2 = \underline{S}_{P2} - jQ_{c2} = (20 + j6,29) \text{ MVA},$$

$$Q_{c3} = b \cdot U_n^2 \cdot \frac{l_{2-3} + l_{3-4}}{2} = 2,75 \cdot 10^{-6} \cdot 110^2 \cdot \frac{16,8 + 34,5}{2} = 0,85 \text{ Mvar};$$

$$\underline{S}_3 = \underline{S}_{P3} - jQ_{c3} = (60 + j29,14) \text{ MVA},$$

$$Q_{c4} = b \cdot U_n^2 \cdot l_{3-4} / 2 = 2,75 \cdot 10^{-6} \cdot 110^2 \cdot 34,5 / 2 = 0,57 \text{ Mvar};$$

$$\underline{S}_4 = \underline{S}_{P4} - \underline{S}_{G4} - jQ_{c4} = (30 + j9,43) \text{ MVA},$$

$$Q_{c5} = b_{220}'' \cdot U_n^2 \cdot \frac{l_{5-6}}{2} = 2,62 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{220^2}{115^2} \cdot 110^2 \cdot \frac{65,5}{2} = 3,8 \text{ Mvar};$$

$$\underline{S}_5 = \underline{S}_{P5} - jQ_{c5} = -j3,80 \text{ MVA},$$

$$Q_{c6} = b_{220}'' \cdot U_n^2 \cdot \frac{l_{5-6}}{2} = 2,62 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{220^2}{115^2} \cdot 110^2 \cdot \frac{65,5}{2} = 3,8 \text{ Mvar};$$

$$\underline{S}_6 = \underline{S}_{P6} - jQ_{c6} = -j3,80 \text{ MVA},$$

$$Q_{c\Sigma} = Q_{c1} + Q_{c2} + Q_{c3} + Q_{c4} + Q_{c5} + Q_{c6} = 10,46 \text{ Mvar}.$$

Приближителне вредности на моќностите $\underline{S}_{A1}$ и $\underline{S}_{A-6}$ низ гранките "А - 1" и "А - 6" ќе ги добијеме со помош на изразите (5.10):

$$\underline{S}_{A-1} = \frac{\underline{S}_1 \cdot \underline{Z}_{1-B}^* + \underline{S}_2 \cdot \underline{Z}_{2-B}^* + \underline{S}_3 \cdot \underline{Z}_{3-B}^* + \underline{S}_4 \cdot \underline{Z}_{4-B}^*}{\underline{Z}_{A-B}^*};$$

$$\underline{S}_{A-6} = \frac{\underline{S}_1 \cdot \underline{Z}_{1-A}^* + \underline{S}_2 \cdot \underline{Z}_{2-A}^* + \underline{S}_3 \cdot \underline{Z}_{3-A}^* + \underline{S}_4 \cdot \underline{Z}_{4-A}^*}{\underline{Z}_{A-B}^*},$$

каде што е:

$$\underline{Z}_{V1} = (1,01 + j3,28) \Omega; \quad \underline{Z}_{V2} = (3,21 + j10,44) \Omega;$$

$$\underline{Z}_{V3} = (2,07 + j6,72) \Omega; \quad \underline{Z}_{V4} = (4,24 + j13,80) \Omega;$$

$$\underline{Z}_{T1} = j9,61 \Omega; \quad \underline{Z}_{T2} = j4,53 \Omega.$$

$$\underline{Z}_{A-B} = \underline{Z}_{VA-1} + \underline{Z}_{V1-2} + \underline{Z}_{V2-3} + \underline{Z}_{V3-4} + \underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{V5-6} + \underline{Z}_{T2}.$$

$$\underline{Z}_{A-B} = (11,96 + j55,90) \Omega,$$

$$\underline{Z}_{1-B} = \underline{Z}_{V1-2} + \underline{Z}_{V2-3} + \underline{Z}_{V3-4} + \underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{V5-6} + \underline{Z}_{T2}$$

$$\underline{Z}_{1-B} = (10,95 + j52,62) \Omega,$$

$$\underline{Z}_{2-B} = \underline{Z}_{V2-3} + \underline{Z}_{V3-4} + \underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{V5-6} + \underline{Z}_{T2} = (7,74 + j42,18) \Omega ,$$

$$\underline{Z}_{3-B} = \underline{Z}_{V3-4} + \underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{V5-6} + \underline{Z}_{T2} = (5,67 + j35,46) \Omega ,$$

$$\underline{Z}_{4-B} = \underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{V5-6} + \underline{Z}_{T2} = (1,43 + j21,66) \Omega ,$$

$$\underline{Z}_{5-B} = \underline{Z}_{V5-6} + \underline{Z}_{T2} = (1,43 + j17,13) \Omega ,$$

$$\underline{Z}_{6-B} = \underline{Z}_{T2} = (0,00 + j9,61) \Omega .$$

Импеданциите $\underline{Z}_{i-A}$ потребни за пресметување на моќноста $\underline{S}_{A-6}$ ќе ги добиеме со помош на следната релација:

$$\underline{Z}_{i-A} + \underline{Z}_{i-B} = \underline{Z}_{A-B} ; \quad i = 1, 6 ,$$

од каде што следи:

$$\underline{Z}_{i-A} = \underline{Z}_{A-B} - \underline{Z}_{i-B} ; \quad i = 1, 6 .$$

На тој начин, како резултат од пресметките се добива следниот резултат:

$$\underline{S}_{A-1} = (74,65 + j23,91) \text{ MVA} \text{ и } \underline{S}_{A-6} = (45,35 + j17,38) \text{ MVA} .$$

Моќностите низ останатите гранки од мрежата ќе ги добиеме со примена на I Кирхофов закон за секој од јазлите 1, 2, 3, 4 и 5:

$$\underline{S}_{1-2} = \underline{S}_{A-1} - \underline{S}_1 = (74,65 + j23,91) - (10,0 + j3,43)$$

$$\underline{S}_{1-2} = (64,65 + j20,48) \text{ MVA} ,$$

$$\underline{S}_{2-3} = \underline{S}_{1-2} - \underline{S}_2 = (64,65 + j20,48) - (20,0 + j6,29)$$

$$\underline{S}_{2-3} = (44,65 + j14,19) \text{ MVA} ,$$

$$\underline{S}_{4-3} = \underline{S}_3 - \underline{S}_{2-3} = (60,0 + j29,14) - (44,65 + j14,19)$$

$$\underline{S}_{4-3} = (15,35 + j14,95) \text{ MVA} ,$$

$$\underline{S}_{5-4} = \underline{S}_{4-3} + \underline{S}_4 = (15,35 + j14,95) + (30,0 + j9,43)$$

$$\underline{S}_{5-4} = (45,35 + j24,38) \text{ MVA} ,$$

$$\underline{S}_{6-5} = \underline{S}_{5-4} + \underline{S}_5 = (45,35 + j24,38) + (0 - j3,80)$$

$$\underline{S}_{6-5} = (45,35 + j20,58) \text{ MVA} .$$

Примената на I Кирхофов закон за јазелот бр. 6 ќе ни послужи како проверка за точноста на пресметките:

$$\underline{S}_{A-6} = \underline{S}_{6-5} + \underline{S}_6 = (45,35 + j20,58) + (0 - j3,80)$$

$$\underline{S}_{A-6} = (45,35 + j16,78) \text{ MVA} ,$$

а тоа е ист резултат со резултатот за моќноста $\underline{S}_{A-6}$, добиен претходно.

Од добиената распределба на моќностите (која претставува **прва апроксимација**) се гледа дека точка на раздел во мрежата ќе биде јазелот "3" (Југохром). Сега следува втората фаза на пресметките во која најнапред ќе се пресметаат (приближно) вредностите на напоните во поедините јазли, а **потоа** ќе се изврши **уточнување** на тековите на моќностите.

За напонот во точката 1 (Гостивар) ќе добиеме (приближно):

$$U_1 \cong U_A - (P_{A-1} \cdot R_1 + Q_{A-1} \cdot X_1) / U_A$$

$$U_1 = 115 - (74,65 \cdot 1,01 + 23,91 \cdot 3,28) / 115 = 113,66 \text{ kV}.$$

Понатаму имаме:

$$U_2 \cong U_1 - (P_{1-2} \cdot R_2 + Q_{1-2} \cdot X_2) / U_1$$

$$U_2 = 113,66 - (64,65 \cdot 3,21 + 20,48 \cdot 10,44) / 113,66 = 109,96 \text{ kV};$$

$$U_3 \cong U_2 - (P_{2-3} \cdot R_3 + Q_{2-3} \cdot X_3) / U_2$$

$$U_3 = 109,96 - (44,65 \cdot 2,07 + 14,19 \cdot 6,72) / 109,96 = 108,25 \text{ kV};$$

$$U_4 \cong U_3 + (P_{4-3} \cdot R_4 + Q_{4-3} \cdot X_4) / U_3 =$$

$$U_4 = 108,25 + (15,35 \cdot 4,24 + 14,95 \cdot 13,80) / 108,25 = 110,76 \text{ kV};$$

$$U_5 \cong U_4 + (P_{5-4} \cdot R_5 + Q_{5-4} \cdot X_5) / U_4 =$$

$$U_5 = 110,76 + (45,35 \cdot 0 + 24,38 \cdot 4,53) / 110,76 = 111,75 \text{ kV},$$

$$U_{5sv} = k_{T2} \cdot U_5 = 213,79 \text{ kV};$$

$$U_6 \cong U_5 + (P_{6-5} \cdot R_6 + Q_{6-5} \cdot X_6) / U_5$$

$$U_6 = 111,75 + (45,35 \cdot 1,43 + 20,58 \cdot 7,52) / 111,75 = 113,72 \text{ kV};$$

$$U_{6sv} = k_{T1} \cdot U_6 = 217,55 \text{ kV}.$$

Сега прстенот ќе го отвориме во точката на раздел "3", (Гостивар).

Потоа, тргнувајќи од точката "3", со "познатиот" напон $U_3 = 108,25 \text{ kV}$ и со познатата моќност $\underline{S}_{2-3} = (44,65 + j14,19) \text{ MVA}$ на крајот од водот V_{2-3} , со помош на изразите (4.18) и (4.19) ќе ги пресметаме загубите на активна и реактивна моќност во водот V_{2-3} , и ќе ја добиеме моќноста на почетокот од водот $\underline{S}'_{2-3}$:

$$\Delta P_{2-3} = \frac{(P_{2-3}')^2 + (Q_{2-3}')^2}{U_3^2} \cdot R_{2-3} = \frac{44,65^2 + 14,19^2}{108,25} \cdot 2,07 = 0,39 \text{ MW},$$

$$\begin{aligned}\Delta Q_{2-3} &= \frac{(P_{2-3}^*)^2 + (Q_{2-3}^*)^2}{U_3^2} \cdot X_{2-3} - \frac{b}{2} \cdot l_{2-3} \cdot U_3^2 = \\ &= \frac{44,65^2 + 14,19^2}{108,25} \cdot 6,72 - \frac{2,75}{2} \cdot 16,8 \cdot 10^{-6} \cdot 108,25^2 = 15,17 \text{ Mvar} .\end{aligned}$$

$$\underline{S}_{2-3}' = \underline{S}_{2-3}'' + \Delta P_{2-3} + j\Delta Q_{2-3} = (45,04 + j15,17) \text{ MVA} .$$

Сега, применувајќи го I Кирхофов закон за јазелот "2", ќе ја определиме моќноста $\underline{S}_{1-2}'$ на крајот од водот V_{2-3} :

$$\underline{S}_{1-2}' = \underline{S}_{2-3}' + \underline{S}_2 = (45,04 + j15,17) + (20 + j7) = (65,04 + j22,17) \text{ MVA} .$$

За да ја пресметаме моќноста $\underline{S}_{1-2}'$ на почетокот од водот V_{1-2} , ќе биде потребно најнапред да ја пресметаме моќноста $\underline{S}_{1-2}$ низ редната гранка на овој вод:

$$\begin{aligned}\underline{S}_{1-2} &= \underline{S}_{1-2}'' - j\frac{b}{2} \cdot l_{1-2} \cdot U_2^2 = \\ &= (65,04 + j22,17) - j0,43 = (65,04 + j21,74) \text{ MVA} .\end{aligned}$$

Загубите на моќност $\underline{\Delta S}_{1-2}$ во водот V_{1-2} ќе бидат:

$$\begin{aligned}\underline{\Delta S}_{1-2} &= \frac{P_{1-2}^2 + Q_{1-2}^2}{U_2^2} \cdot (R_2 + jX_2) - j \cdot b \cdot \frac{l_{1-2}}{2} \cdot (U_1^2 + U_2^2) , \\ \underline{\Delta S}_{1-2} &= \frac{65,04^2 + 21,74^2}{109,96^2} \cdot (3,21 + j10,44) - \\ &- j2,75 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{26,1}{2} \cdot (109,96^2 + 113,66^2) = (1,25 + j3,17) \text{ MVA} .\end{aligned}$$

И конечно, моќноста $\underline{S}_{1-2}'$ на почетокот од водот V_{1-2} ќе изнесува:

$$\begin{aligned}\underline{S}_{1-2}' &= \underline{S}_{1-2}'' + \underline{\Delta S}_{1-2} = (65,04 + j22,17) + (1,25 + j3,17) \\ \underline{S}_{1-2}' &= (66,29 + j25,34) \text{ MVA} .\end{aligned}$$

Понатаму следи постапката за пресметување на моќноста низ водот V_{A-1} , а потоа и моќноста низ преостанатите водови од мрежата. Таа е идентична како во разгледуваниот случај со водот V_{1-2} .

Конечниот резултат од пресметките на тековите на уточнетите моќности во сите гранки од мрежата е прикажан во табелата П.5.1.3. Во истата табела се прикажани и егзактните вредности на моќностите и напоните од разгледуваниот

систем, добиени со помош на компјутер, со една итеративна постапка која дава точни резултати. Од табелата се гледа дека совпаѓањата на вредностите за моќностите и напоните се сосема задоволителни, од каде што може да произлезе заклучокот дека приближната постапка за решавање на прстенестите мрежи, изложена во главата 5 во реалните мрежи дава резултати со сосема задоволителна точност.

Табела П.5.1.3. Резултати од пресметките на напоните и тековите на моќности (заокружени на една децмала) приближни и точни

ред. бр.	Моќност (MVA)	Приближни резултати			Точни резултати		
		Почеток	Крај	U (kV)	Почеток	Крај	U (kV)
1	S_{A-1}	76,8+j30,7	76,3+j29,3	113,7	78,1+j31,9	77,6+j30,3	114,1
2	S_{1-2}	66,3+j25,3	65,0+j22,2	110,0	67,7+j26,3	66,3+j22,9	109,1
3	S_{2-3}	45,0+j15,2	44,7+j14,2	108,3	46,3+j15,9	45,8+j15,1	107,3
4	S_{4-3}	15,5+j15,8	15,4+j15,8	110,8	14,3+j14,3	14,2+j14,9	109,7
5	S_{5-4}	45,5+j26,8	45,5+j25,8	111,8	44,3+j25,3	44,3+j24,3	110,8
6	S_{6-5}	45,8+j20,4	45,5+j26,8	113,7	44,6+j19,7	44,3+j25,3	113,1
7	S_{A-6}	45,8+j22,3	45,8+j20,4	/	44,6+j21,7	44,6+j19,7	/
A	S_A	122,6+j53,0	/	115,0	122,7+j53,6	/	115,0

□ □ □

Пример 5.2 Се посматра мрежата од примерот 5.1, во истиот режим на работа. Да се определи распределбата на моќности и напонските прилики во системот доколку на трансформаторот T1 му се промени преносниот однос, така што тој ќе работи со преносен однос $k_{T1} = 231/115 \text{ kV/kV}$, додека преносниот однос на трансформаторот T2 останува и понатаму неизменет $k_{T2}=k_{T2n}=220/115 \text{ kV/kV}$.

Решение:

Поради тоа што обата трансформатора немаат исти преносни односи, во контурата A-1-2-3-4-5-6-B $\equiv$ A ќе се појави струја на урамнотежување $\underline{I}_{ur}$, односно моќност на урамнотежување $\underline{S}_{ur} = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_A \cdot \underline{I}_{ur}^*$. Поради неа ќе дојде до промена на тековите на моќности, а се разбира и на напонските прилики во мрежата. Вредноста на струјата на урамнотежување низ контурата $\underline{I}_{ur}$, со насока како што е погоре означено (сл. 5.8 б), согласно (5.13), ќе изнесува:

$$\underline{I}_{ur} = \frac{\Delta E_f}{\underline{Z}_{A-B}} = \frac{\Delta E}{\sqrt{3} \cdot \underline{Z}_{A-B}} = \frac{\underline{U}_A}{\sqrt{3} \cdot \underline{Z}_{A-B}} \cdot \left(\frac{k_{T2}}{k_{T1}} - 1 \right),$$

додека за моќност на урамнотежување $\underline{S}_{ur}$ ќе добиеме:

$$\underline{S}_{ur} = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_A \cdot \underline{I}_{ur}^* = \frac{U_A^2}{\underline{Z}_{A-B}^*} \cdot \left(\frac{k_{T2}}{k_{T1}} - 1 \right) = \frac{115^2}{(11,96 - j55,89)} \cdot \left(\frac{220/115}{231/115} - 1 \right),$$

$$\underline{S}_{ur} = (-2,42 - j11,31) \text{ MVA}.$$

Според тоа, приближните (неуточнети) моќности низ гранките од мрежата ќе ги добиеме ако на вредностите на моќностите низ мрежата, добиени со помош на изразите (5.10) им ја додадеме (суперпонираме) моќноста на урамнотежување $\underline{S}_{ur}$. На тој начин ќе добиеме:

$$\underline{S}_{A-1} = \frac{\underline{S}_1 \cdot \underline{Z}_{1-B}^* + \underline{S}_2 \cdot \underline{Z}_{2-B}^* + \underline{S}_3 \cdot \underline{Z}_{3-B}^* + \underline{S}_4 \cdot \underline{Z}_{4-B}^*}{\underline{Z}_{A-B}^*} + \underline{S}_{ur},$$

$$\underline{S}_{A-1} = (72,23 + j12,60) \text{ MVA},$$

$$\underline{S}_{A-6} = \frac{\underline{S}_1 \cdot \underline{Z}_{1-A}^* + \underline{S}_2 \cdot \underline{Z}_{2-A}^* + \underline{S}_3 \cdot \underline{Z}_{3-A}^* + \underline{S}_4 \cdot \underline{Z}_{4-A}^*}{\underline{Z}_{A-B}^*} - \underline{S}_{ur};$$

$$\underline{S}_{A-6} = (47,77 + j28,09) \text{ MVA}$$

Моќностите низ останатите гранки од мрежата ќе ги добијеме со примена на I Кирхофов закон, на ист начин како што тоа беше направено во претходниот пример. Постапувајќи на тој начин добиваме:

$$\underline{S}_{1-2} = \underline{S}_{A-1} - \underline{S}_1 = (72,23 + j12,60) - (10,0 + j3,43)$$

$$\underline{S}_{1-2} = (62,23 + j9,17) \text{ MVA} ,$$

$$\underline{S}_{2-3} = \underline{S}_{1-2} - \underline{S}_2 = (62,23 + j9,17) - (20,0 + j6,29)$$

$$\underline{S}_{2-3} = (42,23 + j2,88) \text{ MVA} ,$$

$$\underline{S}_{4-3} = \underline{S}_3 - \underline{S}_{2-3} = (60,0 + j29,14) - (42,23 + j2,88)$$

$$\underline{S}_{4-3} = (17,77 + j26,27) \text{ MVA} ,$$

$$\underline{S}_{5-4} = \underline{S}_{4-3} + \underline{S}_4 = (17,77 + j26,27) + (30,0 + j9,43)$$

$$\underline{S}_{5-4} = (47,77 + j35,69) \text{ MVA} ,$$

$$\underline{S}_{6-5} = \underline{S}_{5-4} + \underline{S}_5 = (47,77 + j35,69) + (0 - j3,80) =$$

$$\underline{S}_{6-5} = (47,77 + j31,89) \text{ MVA} .$$

Од добиените резултати се гледа дека јазелот "3" (Југохром) повторно ќе биде точка на раздел. По определувањето на точката на раздел следи процедурата за пресметување на напоните и уточнетите вредности на тековите на моќности низ мрежата, на наполно ист начин како во претходниот пример. Како резултат на овие пресметки се добива резултат, прикажан во табелата 5.4. Во истата табела се дадени и точните вредности на моќностите низ гранките и напоните во јазлите, добиени со итеративна постапка.

Табела П.5.2.1. Резултати од пресметките на напоните и тековите на моќности (заокружени на една децмала) – приближни и точни ($k_{T1} = 231/115 \text{ kV/kV}$; $k_{T2} = 220/115 \text{ kV/kV}$)

ред. бр.	Моќност (MVA)	Приближни резултати			Точни резултати		
		Почеток	Крај	$U \text{ (kV)}$	Почеток	Крај	$U \text{ (kV)}$
1	$\underline{S}_{A-1}$	74,0+j18,2	73,6+j17,0	114,0	74,2+j19,5	73,7+j18,2	113,8
2	$\underline{S}_{1-2}$	63,6+j13,0	62,5+j10,6	111,4	63,7+j14,2	62,7+j11,7	110,8
3	$\underline{S}_{2-3}$	42,5+j3,6	42,2+j2,9	110,5	42,7+j4,7	42,4+j4,2	109,7
4	$\underline{S}_{4-3}$	18,1+j27,7	17,8+j27,1	114,4	18,0+j25,7	17,6+j25,8	113,6
5	$\underline{S}_{5-4}$	48,1+j39,0	48,1+j37,3	115,8	48,0+j37,0	48,0+j35,7	115,1
6	$\underline{S}_{6-5}$	48,5+j32,2	48,1+j39,0	118,5	48,4+j31,3	48,0+j35,7	118,2
7	$\underline{S}_{A-6}$	48,5+j34,7	48,5+j32,3	/	48,4+j33,8	48,4+j31,3	/
A	$\underline{S}_A$	122,5+j52,3	/	115,0	122,6+j53,3	/	115,0

Пример 5.3 Се посматра мрежата од примерот 5.1. Со помош на методот на раздвојување на моќности да се определи распределбата на моќности и напонските прилики во системот. Обата трансформатора работат со номинален преносен однос $k_{T1} = k_{T2} = k_{Tn} = 220/115 \text{ kV/kV}$.

Решение:

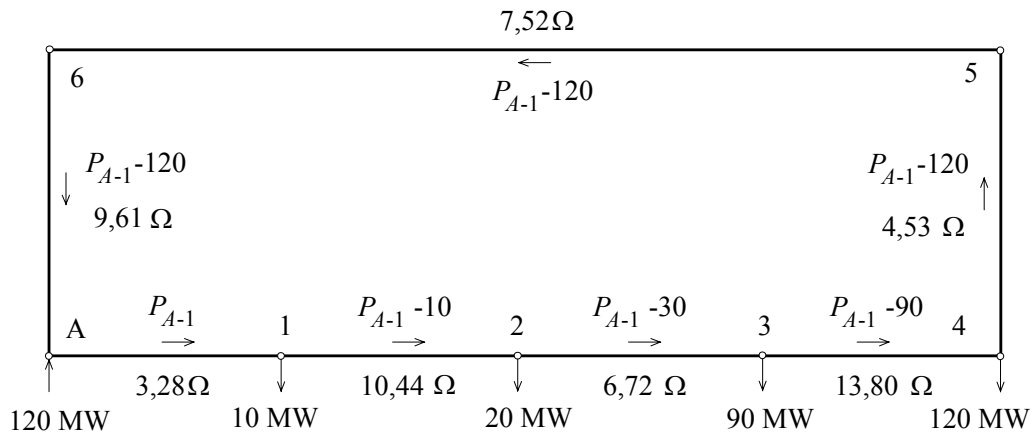
Според овој метод, во хомогените или приближно хомогените мрежи, тековите на активните и реактивните моќности можат да се решаваат одделно. Притоа, тековите на активни моќности во контурата ќе ги добиеме со решавање на мрежата составена од реактанциите на елементите, во која постојат само активните оптоварувања. Слично, тековите на реактивните моќности во мрежата ќе ги добиеме на тој начин што ќе ја решаваме мрежата составена само од активните отпорности, кога во неа постојат само реактивните оптоварувања на потрошувачите. Значи, решавањето на оваа задача ќе се состои во одделно решавање на шемите прикажани на сликите П.5.3.1 и П.5.3.2.

Во шемата на слика П.5.3.1 за непозната величина (моќност) ќе ја прогласиме моќноста P_{A-1} низ гранката "A-1". Моќностите низ останатите гранки од мрежата можеме да ги изразиме преку непознатата моќност P_{A-1} , применувајќи го I Кирхофов закон за секој јазел одделно. Потоа, врз основа на релацијата (5.27 а) ($\sum P_i \cdot X_i = 0$), која е директна последица од примената на II Кирхофов закон за контурата, ќе ја добиеме следната (приближна) равенка:

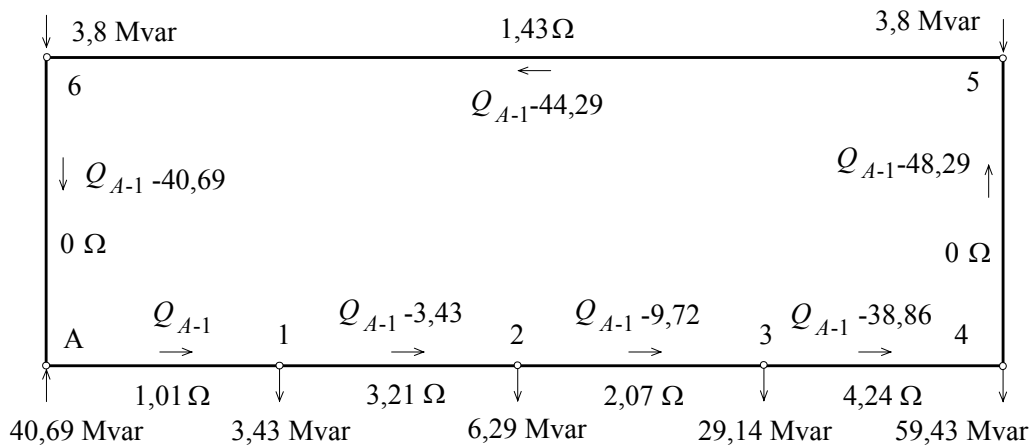
$$P_{A-1} \cdot X_1 + (P_{A-1} - P_1) \cdot X_2 + (P_{A-1} - P_1 - P_2) \cdot X_3 + (P_1 + P_2 + P_3 - P_{A-1}) \cdot X_4 + \\ + (P_1 + P_2 + P_3 + P_4 - P_{A-1}) \cdot (X_5 + X_6 + X_7) = 0,$$

во која единствена непозната е моќноста P_{A-1} . Со нејзиното решавање добиваме:

$$P_{A-1} \cdot 3,28 + (P_{A-1} - 10) \cdot 10,44 + (P_{A-1} - 30) \cdot 6,72 + \\ + (P_{A-1} - 90) \cdot 13,8 + (P_{A-1} - 120) \cdot 21,66 = 0 \Rightarrow P_{A-1} = 74,91 \text{ MW}.$$



**Слика П.5.3.1. Шема за пресметка на
распределбата на активните моќности**

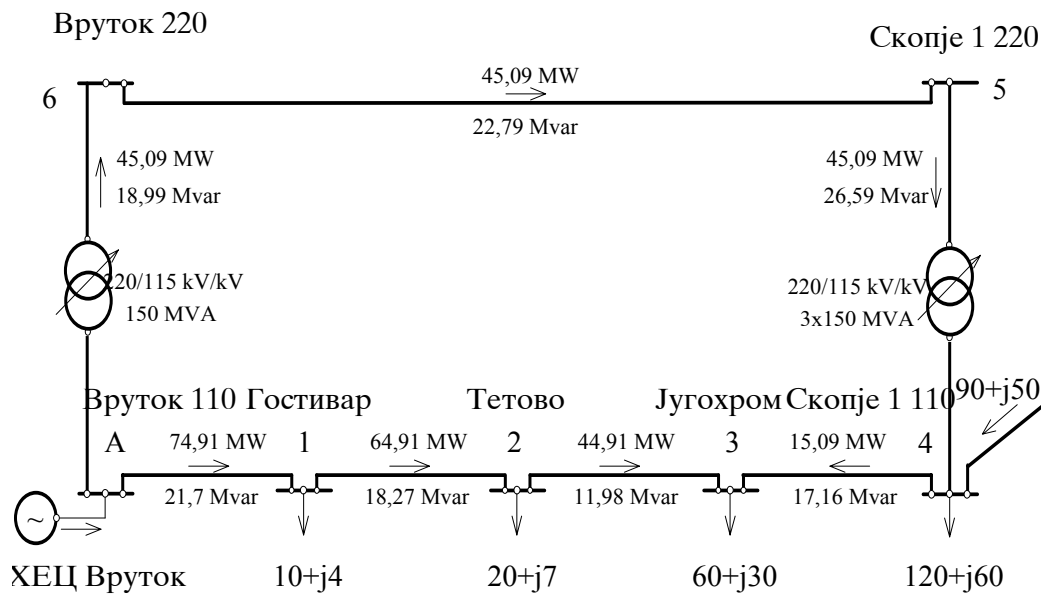


**Слика П.5.3.2. Шема за пресметка на
распределбата на реактивните моќности**

На сосема идентичен начин постапуваме и при решавањето на мрежата составена од активните отпорности низ која течат реактивните моќности (II шема). Како резултат од пресметките добиваме:

$$\begin{aligned}
 & Q_{A-1} \cdot 1,01 + (Q_{A-1} - 3,43) \cdot 3,21 + (Q_{A-1} - 9,72) \cdot 2,07 + \\
 & + (Q_{A-1} - 38,86) \cdot 4,24 + (Q_{A-1} - 48,29) \cdot 0 + \\
 & + (Q_{A-1} - 44,49) \cdot 1,43 + (Q_{A-1} - 40,69) \cdot 0 = 0. \\
 & \Rightarrow Q_{A-1} = 21,7 \text{ Mvar}.
 \end{aligned}$$

Конечната "интегрална" распределба на моќности во мрежата е прикажана на сликата П.5.3.3.



**Слика П.5.3.3. Распределба на моќностите
по првата фаза на пресметките**

Така добиената распределба на моќности е **приближна**, бидејќи, покрај другото, во себе **не ги уважува загубите** на напон и загубите на моќност. Таа претставува само **прва апроксимација** и ќе ни послужи за определување (проценка) на напонските прилики и точката на раздел на моќностите во мрежата.

Понатамошниот тек на пресметките ("сечење" и отворање на прстенот, поделба на мрежата, пресметка на приближните вредности на напоните во јазлите, пресметка на загубите на моќност и **уточнување** на тековите на моќности низ гранките од мрежата) претставуваат **втора фаза** од пресметките и тие се изведуваат на напълно ист начин како што тоа беше направено во примерот 5.1. Резултатите од пресметките што се вршат во оваа фаза, заедно со точните резултати се прикажани во табелата П.5.3.1.

Табела П.5.3.1. Резултати од пресметките на напоните и тековите на моќности добиени со методот на раздвојување (заокружени на една децмала) – приближни и точни

ред. бр.	Моќност (MVA)	Приближни резултати			Точни резултати		
		Почеток	Крај	U (kV)	Почеток	Крај	U (kV)
1	S_{A-1}	77,0+j28,4	76,5+j27,0	113,7	78,1+j31,9	77,6+j30,3	114,1
2	S_{1-2}	66,5+j23,0	65,3+j19,9	110,2	67,7+j26,3	66,3+j22,9	109,1
3	S_{2-3}	45,3+j12,9	44,9+j12,0	108,6	46,3+j15,9	45,8+j15,1	107,3
4	S_{4-3}	15,3+j17,5	15,1+j18,0	111,4	14,3+j14,3	14,2+j14,9	109,7
5	S_{5-4}	45,3+j28,5	45,3+j27,5	112,5	44,3+j25,3	44,3+j24,3	110,8
6	S_{6-5}	45,6+j22,1	45,3+j28,5	113,4	44,6+j19,7	44,3+j25,3	113,1
7	S_{4-6}	45,6+j24,0	45,6+j22,1	/	44,6+j21,7	44,6+j19,7	/
A	S_A	122,6+j52,4	/	115,0	122,7+j53,6	/	115,0

□ □ □