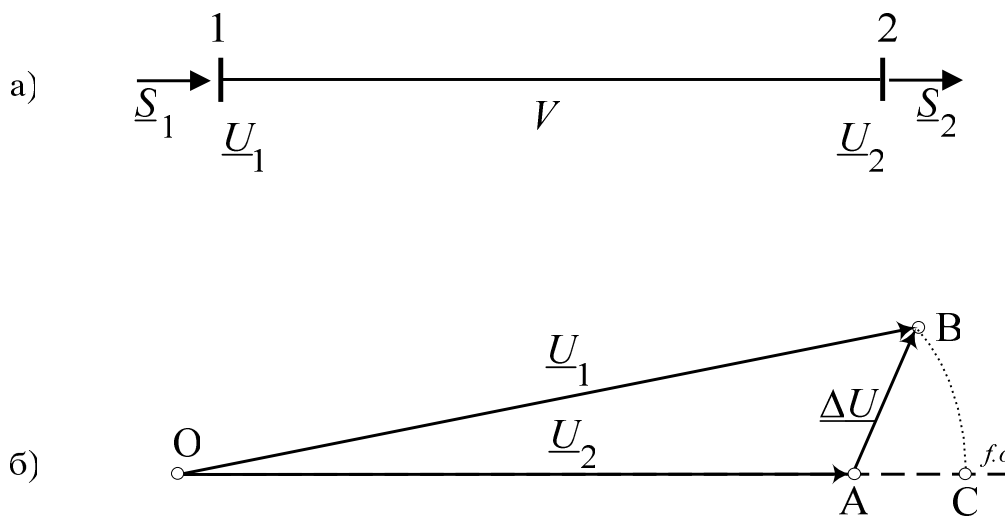


4. ПРЕСМЕТУВАЊЕ НА РАДИЈАЛНИ ЕЛЕКТРИЧНИ МРЕЖИ

4.1. ПРЕСМЕТКА НА ЗАГУБА НА НАПОН НА ВОД

Ќе посматраме симетричен трифазен вод, оптоварен на крајот исто така со симетрично трифазно оптоварување (сл. 4.1 а). Во вакви услови, фазните напони и фазните струи низ водот ќе образуваат трифазен симетричен систем на напони односно струи, респективно.

Ако напонот на почетокот од водот го означиме со $\underline{U}_1$, а напонот на крајот со $\underline{U}_2$, тогаш, разликата на комплексните напони $\underline{U}_1 - \underline{U}_2$ се нарекува **пад на напон** во водот. На сликата 4.1 б падот на напон во водот е означен со векторот АВ.

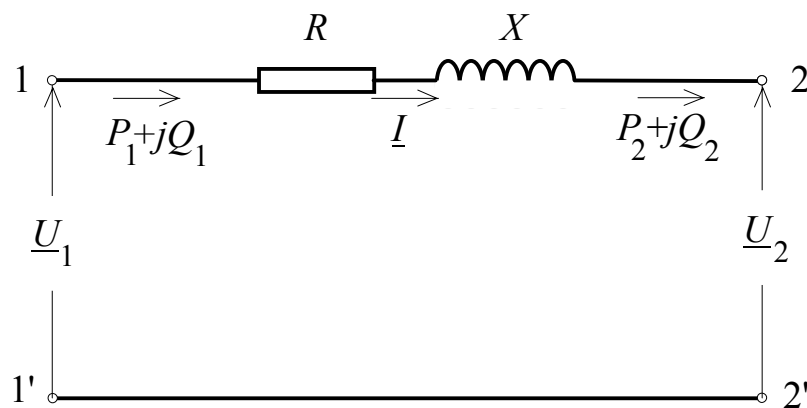


Слика 4.1. Векторски дијаграм на напоните

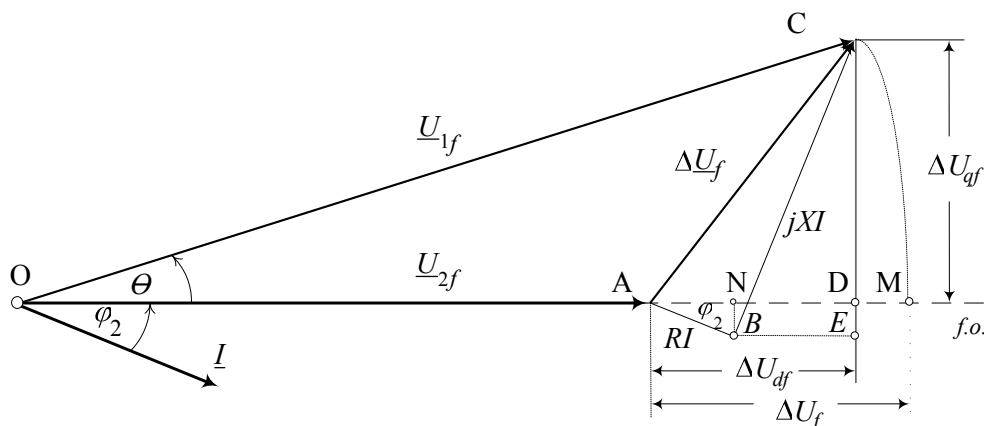
Алгебарската разлика $\Delta U = U_1 - U_2$ на ефективните вредности на напоните на почетокот на водот и на неговиот крај се нарекува **загуба на напонот** во водот. На сликата 4.1 б загубата на напонот е означена со отсечката $\overline{AC}$. Претходните две дефиниции важат како за фазните така и за меѓуфазните (линиските) напони.

Како поедноставен, ќе го посматраме најнапред случајот на надземен вод со среден напон ($U_n \leq 35 \text{ kV}$).

Заменската шема на водот е дадена на сликата 4.2. Ефективната вредност на фазниот напон на почетокот од водот ќе ја означиме со U_{1f} , а на крајот од водот со U_{2f} . Низ водот нека тече струјата I која заостанува зад напонот U_{2f} за агол φ_2 . Комплексната моќност на почетокот од водот ќе ја означиме со $S_1 = P_1 + jQ_1$, а на крајот со $S_2 = P_2 + jQ_2$. Ќе претпоставиме дека се познати приликите на крајот од водот U_{2f} , I , φ_2 и дека треба да се определи напонот U_{1f} и аголот θ меѓу векторите на фазните напони U_{1f} и U_{2f} (сл. 4.3). За разгледуваниот случај ќе го нацртаме векторскиот дијаграм на фазните напони и струи, при што векторот U_{2f} ќе го поставиме на фазната оска.



Слика 4.2. Заменска шема на разгледуваниот вод



Слика 4.3. Векторски дијаграм на фазните напони и струи на водот од сликата 4.1 а

Околу точката О ќе опишеме кружница со радиус ОС и пресекот на оваа кружница со позитивниот дел од фазната оска ќе го означиме со М. Падот на напон во посматраниот вод $\Delta U_f = Z \cdot I$ е претставен на сликата 4.3 со векторот АС,

додека загубата на напон во водот е претставена со отсечката $\overline{AM}$.

Компонентата на фазниот пад на напон во правец на векторот $\underline{U}_{2f}$ се нарекува *подолжна компонента* на падот на фазниот напон и се означува со ΔU_{df} . На сликата 4.3 оваа компонента е претставена со отсечката $\overline{AD}$. Бидејќи е $\overline{AD} = \overline{AN} + \overline{ND} = \overline{AN} + \overline{BE}$, можеме да пишуваме:

$$\Delta U_{df} = R \cdot I \cdot \cos \varphi_2 + X \cdot I \cdot \sin \varphi_2 . \quad (4.1)$$

Компонентата на падот на фазниот напон во правец нормален на векторот $\underline{U}_{2f}$ се нарекува *појречна компонента* на падот на фазниот напон и се означува со ΔU_{qf} . На сликата 4.3 оваа компонента е претставена со отсечката $\overline{CD}$. Бидејќи е $\overline{CD} = \overline{CE} - \overline{DE} = \overline{CE} - \overline{BN}$, следува:

$$\Delta U_{qf} = X \cdot I \cdot \cos \varphi_2 - R \cdot I \cdot \sin \varphi_2 . \quad (4.2)$$

Сега, фазниот напон на почетокот од водот може да се изрази на следниот начин:

$$\underline{U}_{1f} = \underline{U}_{2f} + \Delta \underline{U}_{df} + j \cdot \Delta \underline{U}_{qf} . \quad (4.3)$$

Ако последната равенка ја помножиме одлево и оддесно со $\sqrt{3}$, за меѓуфазниот (линискиот) напон на почетокот на водот добиваме:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \Delta \underline{U}_d + j \cdot \Delta \underline{U}_q , \quad (4.4)$$

каде што $\underline{U}_2$ е меѓуфазниот напон на крајот од водот, а ΔU_d и ΔU_q се подолжна и попречна компонента на падот на (меѓуфазен) напон, соодветно.

Врз основа на последната релација, за ефективната вредност на напонот на почетокот од водот добиваме:

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U_d)^2 + \Delta U_q^2} , \quad (4.5)$$

т.е:

$$U_1 = (U_2 + \Delta U_d) \cdot \sqrt{1 + \frac{\Delta U_q^2}{(U_2 + \Delta U_d)^2}} . \quad (4.6)$$

Во пракса е редовно $U_2 + \Delta U_d \gg \Delta U_q$ што овозможува изразот во средната заграда да се замени, според биномната формула, само со првите два члена од неговиот развој. На тој начин добиваме:

$$U_1 \approx U_2 + \Delta U_d + \frac{\Delta U_q^2}{2 \cdot (U_2 + \Delta U_d)} , \quad (4.7)$$

од каде што може да се пресмета загубата на напон во водот:

$$\Delta U = U_1 - U_2 \approx \Delta U_d + \frac{\Delta U_q^2}{2 \cdot (U_2 + \Delta U_d)} . \quad (4.8)$$

Кај реалните водови, попречната компонента на падот на напон ретко ја надминува вредноста од **5%** од номиналниот напон на водот, т.е.

$$\Delta U_q < 0,05 \cdot U_n .$$

Во тој случај може да се пишува:

$$\frac{\Delta U_q^2}{2 \cdot (U_2 + \Delta U_d)} \approx \frac{\Delta U_q^2}{2 \cdot U_n} < \frac{(0,05 \cdot U_n)^2}{2 \cdot U_n} = 0,00125 \cdot U_n .$$

Од овде произлегува дека **разликата** меѓу загубата на напон во водот ΔU и подолжната компонента на падот на напон ΔU_d е **многу мала** и, по правило, не е поголема од **0,1 – 0,2%** од номиналниот напон U_n , т.е.

$$\Delta U \approx \Delta U_d .$$

Затоа во дистрибутивните мрежи, па дури и во 110 kV мрежи, обично се зема дека загубата на напон во водовите е еднаква на подолжната компонента од падот на напон, т.е:

$$\Delta U \approx \Delta U_d = \sqrt{3} \cdot R \cdot I \cdot \cos \varphi_2 + \sqrt{3} \cdot X \cdot I \cdot \sin \varphi_2 .$$

Имајќи ги предвид релациите:

$$S_1 = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I \quad \text{и} \quad S_2 = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I ,$$

понатаму можеме да пишуваме:

$$\Delta U \approx \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} , \quad (4.9 \text{ а})$$

односно:

$$\Delta U \approx \frac{P_1 R + Q_1 X}{U_1} . \quad (4.9 \text{ б})$$

Според тоа, приближните релации помеѓу ефективните вредности на напоните на почетокот и крајот од водот ќе бидат:

$$U_1 \approx U_2 + \frac{P_2 \cdot R + Q_2 \cdot X}{U_2}, \quad (4.10 \text{ а})$$

и

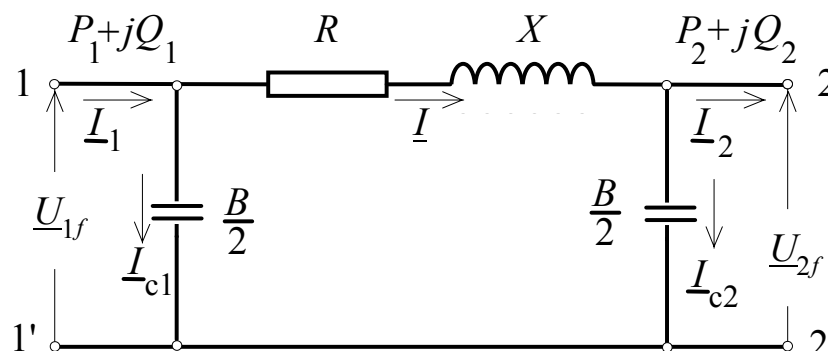
$$U_2 \approx U_1 - \frac{P_1 \cdot R + Q_1 \cdot X}{U_1}. \quad (4.10 \text{ б})$$

Од овие формули се гледа дека **загубата на напон** во водот **главно зависи од неговото оптоварување**. Со порастот на оптоварувањето на водот расте загубата на напон во него, и обратно. Оттука произлегува заклучокот дека во режимот на најголеми оптоварувања загубата на напон во водовите ќе биде поголема отколку во режимот на минимални оптоварувања.

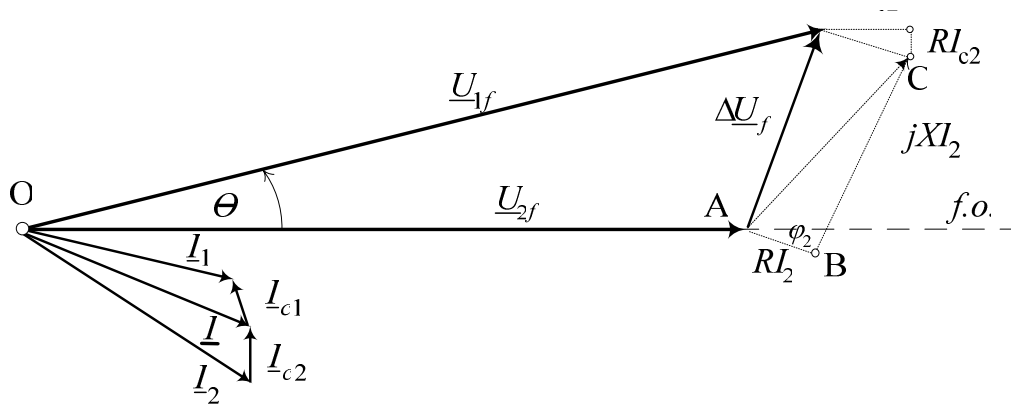
На загубата на напонот во водот влијае и факторот на моќноста на товарот **$\cos \varphi$** . При дадена активна моќност P_2 со зголемувањето на нејзиниот фактор на моќност $\cos \varphi_2$ се намалува бараната реактивна моќност на оптоварувањето Q_2 , што повлекува снижување на загубата на напон во водот.

Во досега разгледуваниот пример не беше земено предвид **влијанието на капацитивноста на водот** врз вредностите на напоните на неговите краеве. Меѓутоа, кај високонапонските водови (**$U_n \geq 110 \text{ kV}$**) капацитивноста на водовите **не смее да се занемарува**, па затоа, во наредниот дел, ќе го анализираме и тој случај.

Ќе посматраме сега високонапонски вод со номинален напон 110 kV. На сликата 4.4 е прикажана неговата заменска шема, додека на сликата 4.5 а е прикажан неговиот фазорски (векторски) дијаграм.



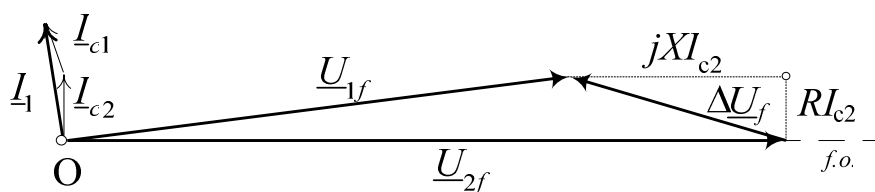
Слика 4.4



Слика 4.5 а. Векторски дијаграм на напоните и струите за водот од сликата 4.4

Од споредбата на дијаграмите од сликите 4.3 и 4.5 а станува очигледно дека присуството на капацитивните струи I_{c1} и I_{c2} , генерирани од попречните (капацитивни) гранки на водот, ја намалува подолжната компонента на падот на напон ΔU_d , а ја зголемува попречната компонента на падот на напон ΔU_q и со тоа врши намалување на загубата на напон во водот.

Да го анализираме сега влијанието на капацитивноста врз работата на еден неоптоварен вод (т.е. вод кој работи во режим на празен од). Дијаграмот за овој случај е прикажан на сликата 4.5 б. Од овој дијаграм се гледа дека кога водот е неоптоварен, напонот на неговиот крај е поголем од напонот на неговиот почеток, т.е. $U_{2f} > U_{1f}$, односно $U_2 > U_1$.



Слика 4.5 б. Векторски дијаграм на вод во празен од

Колкаво ќе биде **покачувањето на напонот** на крајот од водот **ќе зависи од неговата должина**. Значително покачување на напонот на крајот на водот ќе имаме кај долгите високонапонски преносни водови со номинален напон над 220 kV или кај високонапонските кабли ($U_n \geq 110$ kV).

Така, на пример, ако надземниот вод е долг **250 km**, тогаш покачувањето на напонот ќе изнесува околу **3,5%**, но

веќе при должина од **500 km** покачувањето на напонот на крајот од водот ќе изнесува над **15%** од номиналниот напон, што е сосема неприфатливо.

4.2. ПРЕСМЕТУВАЊЕ НА ЗАГУБАТА НА МОЌНОСТ ВО ВОД

Нека е водот претставен со заменската шема од сл. 4.4. Комплексната моќност на крајот од редната импеданција ќе биде еднаква на моќноста на оптоварувањето $P_2 + jQ_2$, намалена за моќноста jQ_{c2} што ја генерира попречната гранка (половината на капацитивноста на водот), приклучена на крајот од водот. Притоа е:

$$Q_{c2} = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_{c2} = U_2^2 \cdot \frac{B}{2} \approx U_n^2 \cdot \frac{B}{2} . \quad (4.11)$$

Привидната моќност на крајот од редната гранка $\underline{S}_{12}''$ (види сл. 4.6) може да се изрази и преку струјата $\underline{I}$ низ импеданцијата $\underline{Z}$ и напонот $\underline{U}_2$ на крајот од водот, т.е:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{12}'' &= P_2 + j(Q_2 - Q_{c2}); \\ S_{12}'' &= \sqrt{P_2^2 + (Q_2 - Q_{c2})^2} = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I \end{aligned} \quad (4.12)$$

од каде што следува:

$$I^2 = \frac{(\underline{S}_{12}'')^2}{3 \cdot U_2^2} = \frac{P_2^2 + (Q_2 - Q_{c2})^2}{3 \cdot U_2^2} . \quad (4.13)$$

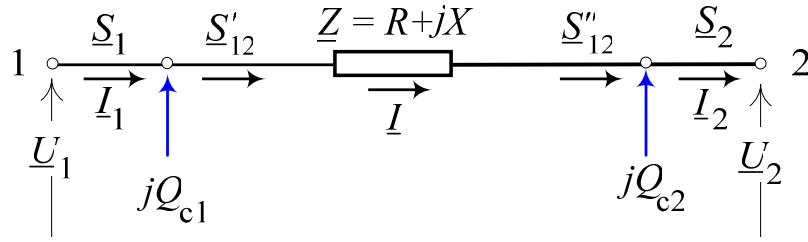
Загубите на активна и реактивна моќност во редната гранка $\underline{Z} = (R + jX)$ ќе бидат:

$$\begin{aligned} \Delta P_V &= 3R \cdot I^2 = \frac{P_2^2 + (Q_2 - Q_{c2})^2}{U_2^2} \cdot R ; \\ \Delta Q_V &= 3X \cdot I^2 = \frac{P_2^2 + (Q_2 - Q_{c2})^2}{U_2^2} \cdot X . \end{aligned} \quad (4.14)$$

Комплексната моќност $\underline{S}_{12}'$ на почетокот од редната гранка (сл. 4.6) ќе биде:

$$\underline{S}_{12}' = \underline{S}_{12}'' + (\Delta P_V + j\Delta Q_V) . \quad (4.15)$$

Ако со Q_{c1} ја означиме моќноста што ја генерира левата попречна гранка приклучена на почетокот од водот (т.е. половината од капацитивноста на водот), тогаш за комплексната моќност $\underline{S}_1$ на почетокот од водот (сл. 4.6) ќе добиеме:



Слика 4.6

$$Q_{c1} = \frac{B}{2} \cdot U_1^2 \approx \frac{B}{2} \cdot U_n^2 ; \quad (4.16)$$

$$\underline{S}_1 = (P_1 + jQ_1) = \underline{S}'_{12} - jQ_{c1} = (\underline{S}''_{12} + \Delta P_V + j\Delta Q_V) - jQ_{c1},$$

т.е:

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_{12} + \Delta P_V + j\Delta Q_V - jQ_{c1} - jQ_{c2} , \quad (4.17)$$

од каде што следува:

$$P_1 = P_2 + \Delta P_V , \text{ т.е.}$$

$$P_1 = P_2 + \frac{P_2^2 + (Q_2 - Q_{c2})^2}{U_2^2} \cdot R \quad (4.18)$$

и

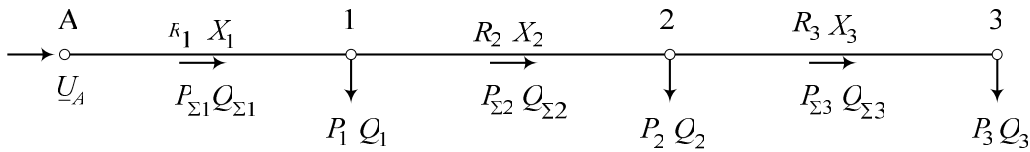
$$Q_1 = Q_2 + \Delta Q_V - (Q_{c1} + Q_{c2})$$

или

$$Q_1 \approx Q_2 + \frac{P_2^2 + (Q_2 - Q_{c2})^2}{U_2^2} \cdot X - B \cdot U_n^2 . \quad (4.19)$$

4.3. ПРЕСМЕТКА НА ЗАГУБА НА НАПОН И ЗАГУБА НА МОЌНОСТ ВО РАДИЈАЛНИ МРЕЖИ

4.3.1. Неразгранета мрежа



Слика 4.7. Приказ на магистрален вод

Ќе посматраме најнапред неразгранета мрежа – магистрален вод, кој напојува три потрошувачи. Притоа станува збор за дистрибутивна мрежа, каде што должините на водовите се релативно мали, па според тоа, ќе бидат мали и загубите на напон и загубите на моќност во поедините делници (водови) од мрежата. Освен тоа капацитивностите на водовите можат да не се земаат предвид. Во тој случај, со примена на I Кирхофов закон за моќности, ќе имаме:

$$P_{Σ3} = P_3, \quad Q_{Σ3} = Q_3; \quad P_{Σ2} = P_2 + P_3, \quad Q_{Σ2} = Q_2 + Q_3; \text{ и}$$

$$P_{Σ1} = P_1 + P_2 + P_3, \quad Q_{Σ1} = Q_1 + Q_2 + Q_3,$$

односно

$$P_{Σk} = \sum_{i=k}^3 P_i; \quad Q_{Σk} = \sum_{i=k}^3 Q_i. \quad (4.20)$$

Бидејќи фазните разлики меѓу напоните во точките "А", "1", "2" и "3" се мали, вкупната загуба на напонот од напојната точка "А" до крајната точка "3" ќе ја добиеме како алгебарска сума на загубите на напоните на поедините делници: А – 1, 1 – 2 и 2 – 3, т.е:

$$\Delta U \equiv \Delta U_{A-3} = \Delta U_{A-1} + \Delta U_{1-2} + \Delta U_{2-3}, \text{ т.е:} \quad (4.21)$$

$$\Delta U = \frac{P_{Σ1} \cdot R_1 + Q_{Σ1} \cdot X_1}{U_1} + \frac{P_{Σ2} \cdot R_2 + Q_{Σ2} \cdot X_2}{U_2} + \frac{P_{Σ3} \cdot R_3 + Q_{Σ3} \cdot X_3}{U_3} \quad (4.22)$$

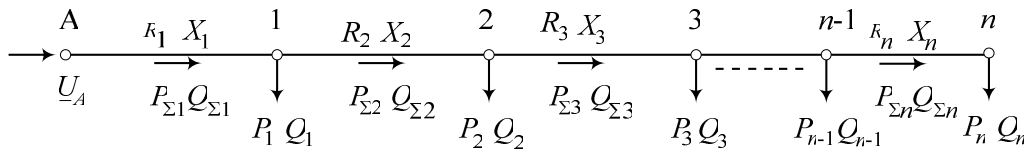
$$\Delta U = \sum_{i=1}^3 \frac{P_{Σi} \cdot R_i + Q_{Σi} \cdot X_i}{U_i}. \quad (4.23)$$

Ако вредностите на непознатите напони U_1 , U_2 и U_3 ги апроксимираме со номиналниот напон U_n , тогаш загубата на напон во мрежата ΔU ќе биде:

$$\Delta U \approx \sum_{i=1}^3 \frac{P_{\Sigma i} \cdot R_i + Q_{\Sigma i} \cdot X_i}{U_n} = \frac{1}{U_n} \cdot \sum_{i=1}^3 (P_{\Sigma i} \cdot R_i + Q_{\Sigma i} \cdot X_i) . \quad (4.24)$$

Во општ случај, кога магистралниот вод напојува произволен број потрошувачи n (сл. 4.8), загубата на напон во мрежата ќе изнесува:

$$\Delta U \approx \sum_{i=1}^n \frac{P_{\Sigma i} \cdot R_i + Q_{\Sigma i} \cdot X_i}{U_n} = \frac{1}{U_n} \cdot \sum_{i=1}^n (P_{\Sigma i} \cdot R_i + Q_{\Sigma i} \cdot X_i) . \quad (4.25)$$



Слика 4.8. Магистрален вод со произволен број потрошувачи

Загубата на напон на делот од мрежата меѓу напојната точка "А" и произволната точка "k" во мрежата ќе изнесува:

$$\Delta U_{A-k} \approx \sum_{i=1}^k \frac{P_{\Sigma i} \cdot R_i + Q_{\Sigma i} \cdot X_i}{U_n} = \frac{1}{U_n} \cdot \sum_{i=1}^k (P_{\Sigma i} \cdot R_i + Q_{\Sigma i} \cdot X_i) . \quad (4.26)$$

Во посебен случај, кога магистралниот вод (било да е надземен или, пак, кабелски) е со ист пресек по целата своја должина, тогаш е:

$$\Delta U_{A-k} \approx \sum_{i=1}^k \frac{P_{\Sigma i} \cdot R_i + Q_{\Sigma i} \cdot X_i}{U_n} = \frac{1}{U_n} \cdot (r \cdot \sum_{i=1}^k P_{\Sigma i} \cdot l_i + x \cdot \sum_{i=1}^k Q_{\Sigma i} \cdot l_i) , \quad (4.27)$$

каде што r и x се активната и реактивната отпорност на водот по единица должина, а l_i е должина (km) на i -тата делница (секција).

Бидејќи е:

$$P_{\Sigma i} = \sum_{j=i}^n P_j = P_i + P_{i+1} + \dots + P_n ,$$

$$Q_{\Sigma i} = \sum_{j=i}^n Q_j = Q_i + Q_{i+1} + \dots + Q_n ,$$

може да се пишува:

$$\sum_{i=1}^n P_{\Sigma i} \cdot R_i = P_{\Sigma 1} \cdot R_1 + P_{\Sigma 2} \cdot R_2 + \dots + P_{\Sigma n} \cdot R_n ,$$

или

$$\sum_{i=1}^n P_{\Sigma i} \cdot R_i = R_1 \cdot \sum_{j=1}^n P_{\Sigma j} + R_2 \cdot \sum_{j=2}^n P_{\Sigma j} + \dots + R_n \cdot P_{\Sigma n} \quad (4.28)$$

или:

$$\sum_{i=1}^n P_{\Sigma i} \cdot R_i = P_1 \cdot R_1 + P_2 \cdot (R_1 + R_2) + \dots + P_n \cdot (R_1 + R_2 + \dots + R_n) , \quad (4.29)$$

т.е.

$$\sum_{i=1}^n P_{\Sigma i} \cdot R_i = \sum_{k=1}^n P_k \cdot R_{A-k} , \quad (4.30)$$

каде што со R_{A-k} е означена вкупната активна отпорност на водот помеѓу точките "А" и "k". Аналогно се добива:

$$\sum_{i=1}^n Q_{\Sigma i} \cdot X_i = \sum_{k=1}^n Q_k \cdot X_{A-k} , \quad (4.31)$$

каде што со X_{A-k} е означена вкупната индуктивна отпорност на водот помеѓу точките "А" и "k".

Според тоа, равенката со која се пресметува загубата на напон во магистрален вод може да се напише на следниот начин:

$$\Delta U = \frac{1}{U_n} \cdot \sum_{k=1}^n (P_k \cdot R_{A-k} + Q_k \cdot X_{A-k}) . \quad (4.32)$$

Во случајот кога водот има **ист напречен пресек** и е од ист тип по целата своја должина, ќе имаме:

$$R_{A-k} = r \cdot l_{A-k} \text{ и } X_{A-k} = x \cdot l_{A-k}$$

па последната формула го добива обликот:

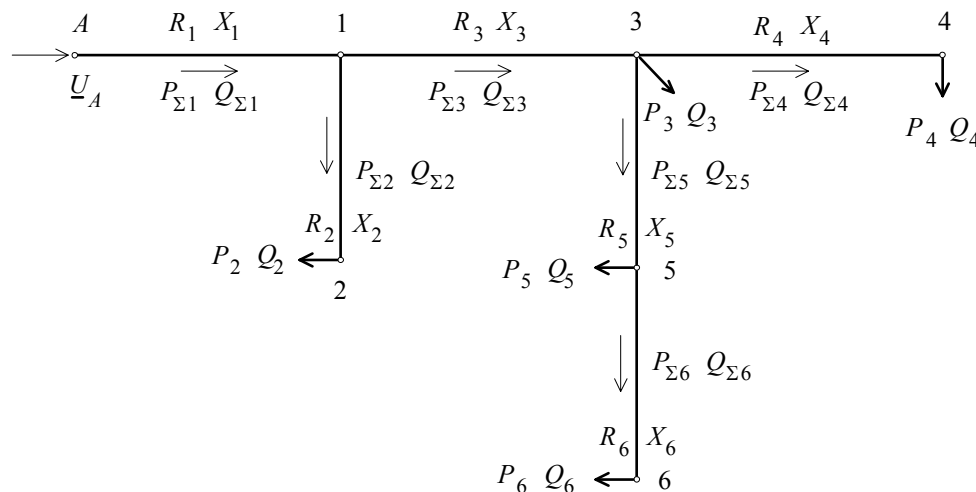
$$\Delta U = \frac{1}{U_n} \cdot (r \cdot \sum_{k=1}^n P_k \cdot l_{A-k} + x \cdot \sum_{k=1}^n Q_k \cdot l_{A-k}) . \quad (4.33)$$

Во последниот случај загубата на напон во магистралниот вод се определува преку вредностите на "моментот" на оптоварувањето, т.е. преку производите на моќноста и растојанието до точката на напојување.

4.3.2. Разгранета мрежа

Да ја посматраме мрежата прикажана на сликата 4.9. Претпоставуваме дека ни е познат напонот U_A и дека се познати параметрите на сите водови, како и оптоварувањата во сите јазли од мрежата.

Напонот (или поточно речено ефективната вредност на напонот) во било која точка од мрежата може да се пресмета како разлика на напонот во напојната точка "А" и загубата на напон во сите водови преку кои се врши напојувањето на посматраната точка. На пример, напонот во точката "6" во мрежата од сл. 4.9 може да се пресмета на следниот начин:



Слика 4.9. Пример за разгранета мрежа

$$U_6 = U_A - (\Delta U_{A-1} + \Delta U_{1-3} + \Delta U_{3-5} + \Delta U_{5-6}) . \quad (4.34)$$

Моќностите низ делниците од мрежата $P_{\Sigma i}$ и $Q_{\Sigma i}$ (со занемарување на загубите на моќност), согласно сликата 4.9, ќе бидат:

делница $A - 1$:

$$P_{\Sigma 1} = P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 ; \quad Q_{\Sigma 1} = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 ,$$

делница $1 - 2$:

$$P_{\Sigma 2} = P_2 ; \quad Q_{\Sigma 2} = Q_2 ,$$

делница $1 - 3$:

$$P_{\Sigma 3} = P_3 + P_4 + P_5 + P_6 \ ; \ Q_{\Sigma 3} = Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \ ,$$

делница 3 – 4:

$$P_{\Sigma 4} = P_4 \ ; \ Q_{\Sigma 4} = Q_4 \ ,$$

делница 3 – 5:

$$P_{\Sigma 5} = P_5 + P_6 \ ; \ Q_{\Sigma 5} = Q_5 + Q_6 \ ,$$

делница 5 – 6:

$$P_{\Sigma 6} = P_6 \ ; \ Q_{\Sigma 6} = Q_6 \ .$$

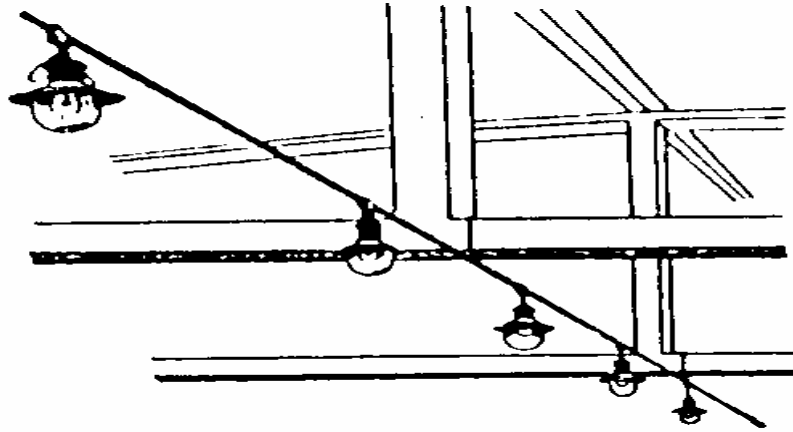
Според тоа, напонот U_6 , на пример, ќе се пресмета на следниот начин:

$$U_6 \approx U_A - \frac{1}{U_n} \cdot [(P_{\Sigma 1} \cdot R_1 + Q_{\Sigma 1} \cdot X_1) + (P_{\Sigma 3} \cdot R_3 + Q_{\Sigma 3} \cdot X_3) + (P_{\Sigma 5} \cdot R_5 + Q_{\Sigma 5} \cdot X_5) + (P_{\Sigma 6} \cdot R_6 + Q_{\Sigma 6} \cdot X_6)] \ . \quad (4.35)$$

Сосема исто се постапува и при пресметувањето на напонот во било која друга точка од мрежата. На тој начин можеме да ја определиме *загубата на напон во мрежата*. Притоа под загуба на напон во мрежата ќе ја подразбираме *разликата на ефективните вредности* на напонот во напојната точка "А" U_A и напонот на точката од мрежата која има најмал напон.

4.3.3. Мрежа со континуирано оптоварување

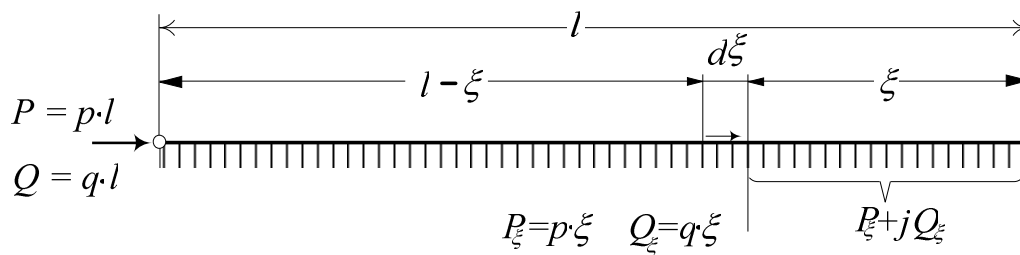
Во некои случаи, на пример при проектирањето на мрежа на надворешно осветление на град, село, фабричка хала и слично, оптоварувањата на водовите се претставуваат рамномерно распределени по нивната должина.



Слика 4.10. Мрежа со континуирано оптоварување

Ако при пресметките би се зела предвид секоја светилка одделно, тогаш пресметувањето би било премногу комплицирано, а надомест за тоа би било малото зголемување на точноста на резултатите.

Нека посматраме вод со должина l и подолжни параметри r и x , рамномерно оптоварен (сл. 4.11) со вкупно активно оптоварување $P = p \cdot l$ и вкупно реактивно оптоварување $Q = q \cdot l$. Притоа, со p и q се означени активото и реактивното оптоварување на водот по единица должина (т.е. линиската густина на товарот, изразена во W/m и var/m).



Слика 4.11. Кон објаснувањето на равенките (4.36) – (4.40)

Загубата на напон во бесконечно мал елемент $d\xi$, што се наоѓа на растојание ξ од крајот на водот (слика 4.11), ќе биде:

$$d(\Delta U) = \frac{P_{\xi} \cdot r \cdot d\xi}{U_n} + \frac{Q_{\xi} \cdot x \cdot d\xi}{U_n} = \frac{(p \cdot \xi) \cdot r \cdot d\xi}{U_n} + \frac{(q \cdot \xi) \cdot x \cdot d\xi}{U_n}, \quad (4.36)$$

а вкупната загуба на напон во целиот вод ќе биде:

$$\Delta U = \int_0^l d(\Delta U) = \frac{p \cdot r}{U_n} \cdot \int_0^l \xi \cdot d\xi + \frac{q \cdot x}{U_n} \cdot \int_0^l \xi \cdot d\xi = \frac{p \cdot r \cdot l^2}{2U_n} + \frac{q \cdot x \cdot l^2}{2U_n} . (4.37)$$

Бидејќи е $R = r \cdot l$ и $X = x \cdot l$, равенката (4.37) може да се напише и на следниот начин:

$$\Delta U = \frac{1}{2} \cdot \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_n} . (4.38)$$

Претходната формула укажува на тоа дека **загубата на напонот** во водот со рамномерно распределено оптоварување по целата негова должина е за **два пати** **помала** отколку во случајот кога целото тоа оптоварување би било концентрирано на крајот од водот. Тоа значи дека, кога се пресметува загубата на напон во континуирано оптоварен вод, целиот товар може да се замени со едно концентрирано оптоварување поставено на средината на водот. Притоа концентрираното оптоварување е еднакво на сумарното оптоварување на водот.

Ако водот е составен од повеќе секции со различни оптоварувања по единица должина, тогаш за секоја секција одделно, се определува соодветното концентрирано оптоварување и случајот се решава како и кај мрежите со неколку товари.

Да ги определиме загубите на моќност во континуирано оптоварениот вод. Загубите на активна моќност $d(\Delta P)$ на елементарниот дел dx се:

$$d(\Delta P) = 3 \cdot r \cdot d\xi \cdot I_\xi^2 = r \cdot d\xi \cdot \frac{P_\xi^2 + Q_\xi^2}{U_n^2} ,$$

или

$$d(\Delta P) = r \cdot d\xi \cdot \frac{p^2 \cdot \xi^2 + q^2 \cdot \xi^2}{U_n^2} = \frac{p^2 + q^2}{U_n^2} \cdot r \cdot \xi^2 \cdot d\xi , (4.39)$$

а во сиот вод:

$$\Delta P = \int_0^l d(\Delta P) = \frac{p^2 + q^2}{U_n^2} \cdot r \cdot \int_0^l \xi^2 \cdot d\xi = \frac{p^2 + q^2}{U_n^2} \cdot r \cdot \frac{l^3}{3} , (4.40)$$

односно:

$$\Delta P = \frac{1}{3} \cdot \frac{P^2 + Q^2}{U_n^2} \cdot R . \quad (4.41)$$

Со аналогно расудување, за загубите на реактивната моќност би добиле:

$$\Delta Q = \frac{1}{3} \cdot \frac{P^2 + Q^2}{U_n^2} \cdot X . \quad (4.42)$$

При познат фактор на моќност $\cos \varphi = P/S = P/\sqrt{P^2 + Q^2}$ претходните два изрази можат да се напишат во следниот вид:

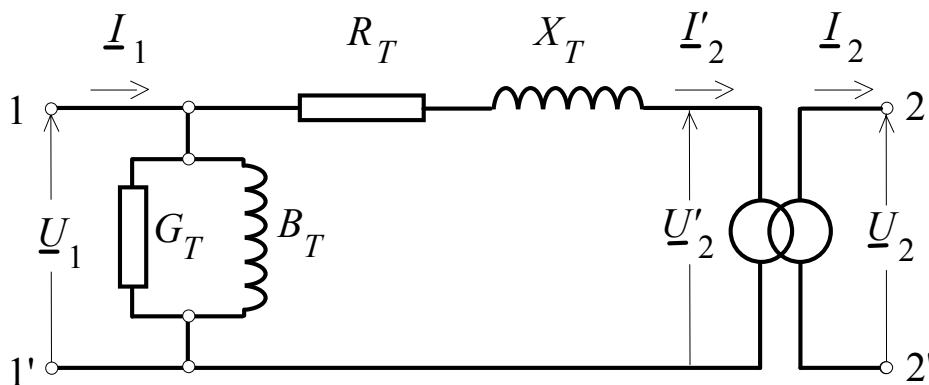
$$\Delta P = \frac{1}{3} \cdot \frac{P^2 \cdot R}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi} ; \quad \Delta Q = \frac{1}{3} \cdot \frac{P^2 \cdot X}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi} . \quad (4.43)$$

Од формулите (4.41), (4.42) и (4.43) се гледа дека при континуирано распределено оптоварување **загубите** на активната и реактивната моќност во водот **се за три пати помали** во однос на случајот кога целиот товар би бил концентриран на крајот од водот. Тоа значи дека, кога се пресметува загубата на моќност во континуирано оптоварен вод, целиот товар може да се замени со едно концентрирано оптоварување, поставено на 1/3 од почетокот на водот. Притоа концентрираното оптоварување е еднакво на сумарното оптоварување на водот.

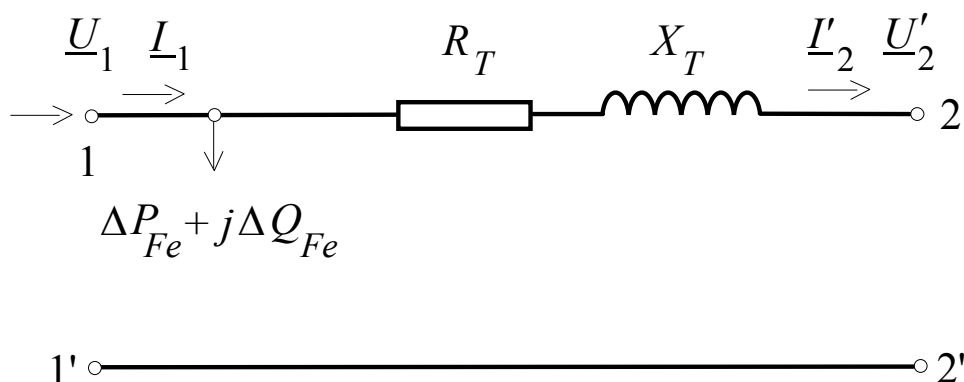
4.4. ЗАГУБА НА НАПОН И ЗАГУБА НА МОЌНОСТ ВО ТРАНСФОРМАТОРИ

Двонамотните трансформатори всушност треба да се претставуваат со заменска шема како на сликата 4.12. Во неа, покрај параметрите на трансформаторот што од порано ги знаеме, е присутен и еден идеален трансформатор со познат преносен однос k . Со помош на него вршиме сведување на напонот $\underline{U}_2$ и струјата $\underline{I}_2$.

Меѓутоа, при пресметувањата на ЕЕС, од практични причини, идеалниот трансформатор не го прикажуваме во соодветните заменски шеми, но неговото присуство сепак го уважуваме, т.е. вршиме сведување на сите електрични величини на едно исто напонско ниво. Поради тоа, наместо со шемата од слика 4.12, вообичаено е трансформаторите да се претставуваат со шемата од сл. 4.13.



Слика 4.12. Идеален трансформатор во заменската шема на енергетски трансформатор



Слика 4.13. Вообичен приказ на шема на трансформатор

Покрај испуштањето на идеалниот трансформатор, во шемата од сл. 4.13 е извршено уште едно упростување. Имено, со оваа шема не е опфатена зависноста на загубите во гранката на магнетизирање од напонот (а која всушност претставува сложена функција од погонскиот напон), туку тие се претставени како константни. Ако привидната моќност S_2 и факторот на моќност $\cos \varphi_2$ на секундарната страна од трансформаторот се познати, тогаш загубата на напонот во трансформаторот ќе се определи по постапка која е аналогна на онаа што ја применуваме и кај водовите. Најнапред се пресметува подолжната компонента на падот на напон ΔU_d , а потоа и попречната ΔU_q :

$$\begin{aligned}\Delta U_d &= \sqrt{3} \cdot I'_2 \cdot (R_T \cdot \cos \varphi_2 + X_T \cdot \sin \varphi_2) = \\ &= \frac{S_2}{U'_2} \cdot (R_T \cdot \cos \varphi_2 + X_T \cdot \sin \varphi_2) \quad ,\end{aligned}\quad (4.44)$$

$$\begin{aligned}\Delta U_q &= \sqrt{3} \cdot I'_2 \cdot (X_T \cdot \cos \varphi_2 - R_T \cdot \sin \varphi_2) = \\ &= \frac{S_2}{U'_2} \cdot (X_T \cdot \cos \varphi_2 - R_T \cdot \sin \varphi_2) \quad .\end{aligned}\quad (4.45)$$

Бидејќи напонот U'_2 најчесто не ни е познат, а по правило тој малку се разликува од својата номинална вредност, претходните изрази приближно ќе бидат:

$$\begin{aligned}\Delta U_d &= \frac{S_2}{U_n} \cdot (R_T \cdot \cos \varphi_2 + X_T \cdot \sin \varphi_2) ; \\ \Delta U_q &= \frac{S_2}{U_n} \cdot (X_T \cdot \cos \varphi_2 - R_T \cdot \sin \varphi_2) .\end{aligned}\quad (4.46)$$

а за загубата на напон и овде ќе важи приближната релација:

$$\Delta U \approx \Delta U_d + \frac{\Delta U_q^2}{2U_n} . \quad (4.47)$$

Вообичаено е загубата на напонот да се изразува во проценти од номиналниот напон и во тој случај таа се нарекува *процентуална загуба на напонот*. Неа ја пресметуваме од релациите:

$$\Delta U \% = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100 ,$$

односно:

$$\Delta U \% = \Delta U_d \% + \frac{(\Delta U_q \%)^2}{200} . \quad (4.48)$$

Ако се земе дека е:

$$\begin{aligned} u_k \% &= \sqrt{(u_{ka} \%)^2 + (u_{k\sigma} \%)^2} ; \\ R_T &= \frac{u_{ka} \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} ; \\ X_T &= \frac{u_{k\sigma} \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} , \end{aligned} \quad (4.49)$$

можеме да пишуваме:

$$\Delta U_d = \frac{S_2}{U_n} \cdot \left(\frac{u_{ka} \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \cos \varphi_2 + \frac{u_{k\sigma} \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \sin \varphi_2 \right) , \quad (4.50)$$

$$\Delta U_q = \frac{S_2}{U_n} \cdot \left(\frac{u_{k\sigma} \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \cos \varphi_2 - \frac{u_{ka} \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \sin \varphi_2 \right) , \quad (4.51)$$

односно:

$$\Delta U_d \% = \frac{S_2}{S_n} \cdot (u_{ka} \% \cdot \cos \varphi_2 + u_{k\sigma} \% \cdot \sin \varphi_2) , \quad (4.52)$$

$$\Delta U_q \% = \frac{S_2}{S_n} \cdot (u_{k\sigma} \% \cdot \cos \varphi_2 - u_{ka} \% \cdot \sin \varphi_2) . \quad (4.53)$$

Оптоварувањето на еден трансформатор честопати се изразува преку односот $\alpha = S_2 / S_n$, кој се нарекува *коэффициент на оптоварување* на трансформаторот. Со неговото воведување, последните формули ќе имаат облик:

$$\Delta U_d \% = \alpha \cdot (u_{ka} \% \cdot \cos \varphi_2 + u_{k\sigma} \% \cdot \sin \varphi_2) , \quad (4.54)$$

$$\Delta U_q \% = \alpha \cdot (u_{k\sigma} \% \cdot \cos \varphi_2 - u_{ka} \% \cdot \sin \varphi_2) . \quad (4.55)$$

Загубите на активната и реактивната моќност во трансформаторот ќе бидат:

$$\Delta P_T = \Delta P_{Fe} + 3 \cdot R_T \cdot (I_2')^2 = \Delta P_{Fe} + \frac{P_2^2 + Q_2^2}{(U_2')^2} \cdot R_T , \quad (4.56)$$

$$\Delta Q_T = \Delta Q_{Fe} + 3 \cdot X_T \cdot (I_2')^2 = \Delta Q_{Fe} + \frac{P_2^2 + Q_2^2}{(U_2')^2} \cdot X_T . \quad (4.57)$$

Ако се земе дека е $U_2' \approx U_n$, тогаш, со оглед на следните две релации:

$$\Delta P_k \approx \Delta P_{Cun} = R_T \cdot \frac{S_n^2}{U_n^2} \quad \text{и} \quad Z_T \approx X_T = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} ,$$

можеме да пишуваме:

$$\alpha = \frac{S_2}{S_n} \tag{4.58}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_T &= \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2 ; \\ \Delta Q_T &= \frac{S_n}{100} \cdot [i_o \% + u_k \% \cdot \alpha^2] , \end{aligned} \tag{4.59}$$

Во случајот кога n идентични, паралелно врзани трансформатори работат оптоварени со вкупен товар $S_2 = P_2 + jQ_2$, тогаш загубите во празен од на групата ќе бидат n пати поголеми, додека еквивалентните параметри R_T и X_T , а со тоа и загубите во редната гранка на еквивалентниот трансформатор, ќе бидат n пати помали. На тој начин вкупните загуби ќе изнесуваат:

$$\begin{aligned} \Delta P_T &= n \cdot \Delta P_{Fe} + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2 ; \\ \Delta Q_T &= \frac{S_n}{100} \cdot [n \cdot i_o \% + \frac{1}{n} \cdot u_k \% \cdot \alpha^2] . \end{aligned} \tag{4.60}$$

4.5. ДИМЕНЗИОНИРАЊЕ НА РАДИЈАЛНИТЕ ДИСТРИБУТИВНИ МРЕЖИ

Во досегашните електрични пресметки на електро-енергетските мрежи беа познати оптоварувањата и сите параметри на мрежата (т.е. должините на водовите, нивните напречни пресеци, растојанијата помеѓу спроводниците итн.), а со пресметките се определуваше загубата на напон и загубата на моќност, како и напонските прилики во самата мрежа. На тој начин вршме контрола дали пресметаната загуба на напон е поголема од својата пропишана вредност или не. Вакви пресметки се прават уште во фазата на проектирањето на мрежата, но и подоцна, во текот на експлоатацијата, на пример кога треба да се провери можноста за приклучување на нови потрошувачи кон постојната мрежа итн.

При проектирањето може да се јави потреба и од решавање на друг вид проблеми. Имено, таков проблем е, на пример, димензионирањето, т.е. определувањето на потребниот пресек на поедините водови во мрежата, така што загубите на напонот од напојната точка до "електрички" најоддалечените приемници, во режимите на најголеми оптоварувања, не ќе бидат поголеми од некоја однапред зададена, дозволена загуба на напон ΔU_{doz} .

Да се задржиме малку на особеностите со кои се карактеризира решавањето на оваа задача.

Ќе разгледаме најнапред едноставен случај, кога преку трифазен симетричен вод се напојува трифазно симетрично оптоварување (сл. 4.1), па е потребно да се определи површината на напречниот пресек S така што загубата на напон во него нема да биде поголема од одредена, однапред зададена вредност ΔU_{doz} .

Бидејќи погонската индуктивна отпорност на трифазните водови малку се менува со промената на нивниот пресек, вообичаено е пресметките да се вршат со просечните вредности за индуктивната отпорност x , кои практично зависат само од номиналниот напон на водот (бидејќи напонот условува определени растојанија меѓу фазните спроводници, а од нив зависи и големината на отпорноста x). За потребите

на димензионирањето можат да се користат просечните вредности за параметарот x , дадени во следната табела:

Табела 4.1. Просечни вредности на подолжните реактанции на водовите со разни номинални напони

Номинален напон kV	Просечна вредност за x (Ω/km)	
	надземни водови	кабелски водови
110	0,40	/
35	0,39	0,12
20	0,38	0,10
10	0,37	0,08
до 1	0,34	0,06

При познато оптоварување на водот $\underline{S} = P + jQ$, позната должина l и позната (односно претпоставена) индуктивна отпорност x , од равенката за загуба на напонот се добива:

$$\Delta U = \Delta U_a + \Delta U_r = \frac{P \cdot R}{U_n} + \frac{Q \cdot X}{U_n} \leq \Delta U_{doz}, \quad (4.61)$$

од што следува:

$$\frac{P \cdot R}{U_n} \leq \Delta U_{doz} - \Delta U_r = \Delta U_{doz} - \frac{Q \cdot X}{U_n}, \quad (4.62)$$

Ќе ги воведеме означувањето:

$$\Delta U_{a,doz} = (\Delta U_{doz} - \Delta U_r) = \left(\Delta U_{doz} - \frac{Q \cdot X}{U_n} \right). \quad (4.63)$$

Тогаш, имајќи ја предвид релацијата за отпорноста на водот R :

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{l}{\sigma \cdot S}, \quad (4.64)$$

можеме да пишуваме:

$$\frac{P \cdot R}{U_n} = \frac{P \cdot l}{\sigma \cdot U_n \cdot S} \leq \Delta U_{a,doz}, \quad (4.65)$$

од каде што следи релацијата:

$$S \geq \frac{P \cdot l}{\sigma \cdot U_n \cdot \Delta U_{a,doz}}. \quad (4.66)$$

Бидејќи попречните пресеци на спроводниците се стандардизирани, го избираме првиот најблизок пресек до

пресметаниот. За вака усвоениот пресек сега е можно да се определат точните вредности на подолжните параметри r и x , а потоа и соодветната загуба на напонот.

$$\Delta U = \frac{l}{U_n} \cdot (P \cdot r + Q \cdot x) = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_n} . \quad (4.67)$$

Ако е исполнет условот $\Delta U \leq \Delta U_{doz}$, тогаш избраниот пресек може да се усвои за разгледуваниот вод. Но ако се случи да биде $\Delta U > \Delta U_{doz}$, тогаш ќе треба да се избере следниот поголем стандарден пресек и целата постапка за проверка на загубата на напон уште еднаш да се повтори.

Ако имаме случај на вод кој напојува повеќе потрошувачи (како на сликата 4.8), вкупната загуба на напон во мрежата ќе биде:

$$\begin{aligned} \Delta U &= \frac{1}{U_n} \cdot \sum_{i=1}^n (P_{\Sigma i} \cdot R_i + Q_{\Sigma i} \cdot X_i) \text{ или} \\ \Delta U &= \frac{1}{\sigma \cdot U_n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{P_{\Sigma i} \cdot l_i}{S_i} + \frac{1}{U_n} \cdot \sum_{i=1}^n Q_{\Sigma i} \cdot x_i \cdot l_i . \end{aligned} \quad (4.68)$$

Притоа е земен најопштиот случај кога сите водови од мрежата имаат различни пресеци. Во овој случај, проблемот не е решлив, бидејќи имаме само една равенка (релацијата (4.68) за загубата на напон во водот), во која фигурираат n непознати попречни пресеци: $S_1, S_2, \dots, S_n$.

Равенката (4.68) може да се реши само во случаите кога се воведуваат некои дополнителни услови, кои дозволуваат да се воспостават доволен број релации помеѓу непознатите пресеци.

Таков е, на пример, случајот кога воведуваме услов за константен пресек во мрежата, т.е. $S_1 = S_2 = \dots = S_{n-1} = S_n = S$. Во тој случај, може да се пишува равенката:

$$\Delta U_{doz} = \frac{1}{\sigma \cdot S \cdot U_n} \cdot \sum_{i=1}^n P_{\Sigma i} \cdot l_i + \frac{1}{U_n} \cdot \sum_{i=1}^n Q_{\Sigma i} \cdot x_i \cdot l_i , \quad (4.69)$$

односно:

$$\Delta U_{a, doz} = \Delta U_{doz} - \frac{1}{U_n} \cdot \sum_{i=1}^n Q_{\Sigma i} \cdot x_i \cdot l_i = \frac{1}{\sigma \cdot S \cdot U_n} \cdot \sum_{i=1}^n P_{\Sigma i} \cdot l_i , \quad (4.70)$$

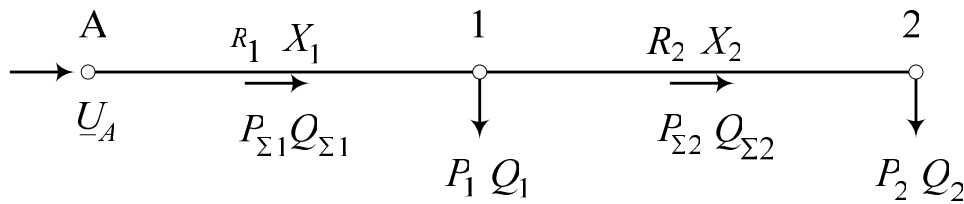
од каде што следува:

$$S = \frac{1}{\sigma \cdot U_n \cdot \Delta U_{a,doz}} \cdot \sum_{i=1}^n P_{\Sigma i} \cdot l_i . \quad (4.71)$$

Натаму за S го усвојуваме најблискиот поголем стандарден пресек и потоа за него вршме проверка на вистинската загуба на напон.

Во низа случаи, како дополнителен услов при изборот на пресеците на спроводниците, се зема **еднаквоста на густиниите на струиите** во сите секции од водот, т.е:

$$J_1 = J_2 = \dots = J_n . \quad (4.72)$$



Слика. 4.14

На сликата 4.14 е прикажана радијална мрежа која напојува два потрошувачи. Загубата на напон во оваа мрежа ќе биде:

$$\Delta U = \frac{1}{U_n} \cdot [(P_{\Sigma 1} \cdot R_1 + Q_{\Sigma 1} \cdot X_1) + (P_{\Sigma 2} \cdot R_2 + Q_{\Sigma 2} \cdot X_2)] . \quad (4.73)$$

Бидејќи е:

$$\begin{aligned} P_{\Sigma 1} &= \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{\Sigma 1} ; & P_{\Sigma 2} &= \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_{\Sigma 2} ; \\ J_1 &= \frac{I_1}{S_1} ; & J_2 &= \frac{I_2}{S_2} \end{aligned} , \quad (4.74)$$

$$\begin{aligned} \frac{P_{\Sigma 1} \cdot R_1}{U_n} &= \sqrt{3} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{\Sigma 1} \cdot \frac{l_1}{\sigma_1 \cdot S_1} ; \\ \frac{P_{\Sigma 2} \cdot R_2}{U_n} &= \sqrt{3} \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_{\Sigma 2} \cdot \frac{l_2}{\sigma_2 \cdot S_2} , \end{aligned} \quad (4.75)$$

равенката за загубата на напонот може да се пишува во вид:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3}}{\sigma} \cdot (J_1 \cdot l_1 \cdot \cos \varphi_{\Sigma 1} + J_2 \cdot l_2 \cdot \cos \varphi_{\Sigma 2}) + \frac{1}{U_n} \cdot \sum_{i=1}^2 Q_{\Sigma i} \cdot x_i , \quad (4.76)$$

односно, при $J_1 = J_2 = J$:

$$\frac{\sqrt{3}}{\sigma} \cdot J \cdot (l_1 \cos \varphi_{\Sigma 1} + l_2 \cos \varphi_{\Sigma 2}) = \Delta U_{doz} - \frac{1}{U_n} \cdot \sum_{i=1}^2 Q_{\Sigma i} \cdot x_i = \Delta U_{a, doz} , (4.77)$$

од каде што следува:

$$J = \frac{\sigma \cdot \Delta U_{a, doz}}{\sqrt{3} \cdot (l_1 \cdot \cos \varphi_{\Sigma 1} + l_2 \cdot \cos \varphi_{\Sigma 2})} . \quad (4.78)$$

Не е тешко да се покаже дека во општиот случај, кога мрежата напојува n потрошувачи, како во случајот на сликата 4.8, ќе биде:

$$\Delta U_{a, doz} = \Delta U_{doz} - \frac{1}{U_n} \cdot \sum_{i=1}^n Q_{\Sigma i} \cdot X_i , \quad (4.79)$$

и

$$J = \frac{\sigma \cdot \Delta U_{a, doz}}{\sqrt{3} \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot \cos \varphi_{\Sigma i}} . \quad (4.80)$$

По пресметувањето на густината на струјата J , за која се постигнува условот (4.61) во поглед на загубата на напон во мрежата, се определуваат пресеците на поедините делници од мрежата, според (4.78):

$$S_i = I_i / J ; \quad (i = 1, 2, \dots, n) , \quad (4.81)$$

а потоа тие се заокружуваат на најблиските стандардни постојни пресеци. По изборот се пресметува вистинската загуба на напон во мрежата со точните вредности за активните и реактивните отпорности на гранките од мрежата, се проверува дали е задоволен условот $\Delta U \leq \Delta U_{doz}$ и по потреба се врши корекција на пресеците.

Во радијалните мрежи изведбата на спроводниците со константен пресек не е секогаш целисходна. Имено, во почетните делници на мрежата струјата е поголема во споредба со струјата во крајните делници, поради што и загубите на моќност во првите делници ќе бидат поголеми. За да се искористи металот во спроводниците што е можно порационално, потребно ќе биде почетните делници да бидат изведени со поголем пресек, додека крајните делници да бидат изведени со помал пресек.

Распределбата на металот во спроводниците од поедините делници при однапред зададена големина на дозволената загуба на напонот може да се изврши на различни начини. Како дополнителен услов при определувањето на поедините пресеци во мрежата може да се користи и барањето на *минимална појтрошувачка на материјал* (метал) во спроводниците (што води кон минимизација на цената на чинење на мрежата). За анализа на овој случај повторно ќе го искористиме примерот од сликата 4.14. Со ΔU_{a1} и ΔU_{a2} ќе ги означиме загубите на напонот во активните отпорности R_1 и R_2 на првата, односно втората делница. Во тој случај ќе имаме:

$$\Delta U_{a1} = \frac{P_{\Sigma 1} \cdot R_1}{U_n} = \frac{P_{\Sigma 1} \cdot l_1}{\sigma \cdot U_n \cdot S_1}; \quad \Delta U_{a2} = \frac{P_{\Sigma 2} \cdot R_2}{U_n} = \frac{P_{\Sigma 2} \cdot l_2}{\sigma \cdot U_n \cdot S_2}, \quad (4.82)$$

од каде што следува:

$$S_1 = \frac{P_{\Sigma 1} \cdot l_1}{\sigma \cdot U_n \cdot \Delta U_{a1}}; \quad S_2 = \frac{P_{\Sigma 2} \cdot l_2}{\sigma \cdot U_n \cdot \Delta U_{a2}}. \quad (4.83)$$

Бидејќи е:

$$\Delta U_{a,doz} \equiv \Delta U_{a1} + \Delta U_{a2} = \Delta U_{doz} - \frac{1}{U_n} \cdot \sum_{i=1}^2 Q_{\Sigma i} \cdot X_i, \quad (4.84)$$

може да се пишува:

$$\Delta U_{a2} = \Delta U_{a,doz} - \Delta U_{a1}, \quad (4.85)$$

и

$$S_2 = \frac{P_{\Sigma 2} \cdot l_2}{\sigma \cdot U_n \cdot (\Delta U_{a,doz} - \Delta U_{a1})}. \quad (4.86)$$

Волуменот на употребениот материјал (за една фаза) во мрежата е:

$$V = S_1 \cdot l_1 + S_2 \cdot l_2 = \frac{P_{\Sigma 1} \cdot l_1^2}{\sigma \cdot U_n \cdot \Delta U_{a1}} + \frac{P_{\Sigma 2} \cdot l_2^2}{\sigma \cdot U_n \cdot (\Delta U_{a,doz} - \Delta U_{a1})}. \quad (4.87)$$

Гледаме дека волуменот V е зависен од само една променлива величина ΔU_{a1} . Вредноста на независно променливата ΔU_{a1} , за која ќе имаме минимален волумен на употребениот материјал во спроводниците, ќе ја определиме од равенката:

$$\frac{dV}{d(U_{a1})} = 0, \text{ т.е:} \quad (4.88)$$

$$-\frac{P_{\Sigma 1} \cdot l_1^2}{\sigma \cdot U_n \cdot \Delta U_{a1}^2} + \frac{P_{\Sigma 2} \cdot l_2^2}{\sigma \cdot U_n \cdot (\Delta U_{a,doz} - \Delta U_{a1})} = 0 , \quad (4.89)$$

односно:

$$\frac{P_{\Sigma 1} \cdot l_1^2}{\sigma \cdot U_n \cdot \Delta U_{a1}^2} = \frac{P_{\Sigma 2} \cdot l_2^2}{\sigma \cdot U_n \cdot \Delta U_{a2}^2} . \quad (4.90)$$

Ако двете страни од последната равенка ги поделиме со $\sigma \cdot U_n$ и ги изразиме преку пресеците S_1 и S_2 , ќе добиеме:

$$\frac{S_1^2}{P_{\Sigma 1}} = \frac{S_2^2}{P_{\Sigma 2}} , \quad (4.91)$$

односно,

$$S_2 = S_1 \cdot \frac{\sqrt{P_{\Sigma 2}}}{\sqrt{P_{\Sigma 1}}} . \quad (4.92)$$

Добиениот однос за пресеците на спроводниците соодветствува на минимумот на употребениот материјал за спроводниците. Пресеците S_1 и S_2 на поедините делници ќе ги добиеме од последната релација и од условот за дозволена загуба на напон во мрежата.

$$\frac{P_{\Sigma 1} \cdot l_1}{\sigma \cdot U_n \cdot S_1} + \frac{P_{\Sigma 2} \cdot l_2}{\sigma \cdot U_n \cdot S_2} = \Delta U_{a,doz} . \quad (4.93)$$

Користејќи ја релацијата меѓу пресеците S_1 и S_2 , последната равенка може да се напише во следниот облик:

$$\frac{1}{\sigma \cdot U_n \cdot S_1} \cdot (P_{\Sigma 1} \cdot l_1 + l_2 \cdot \sqrt{P_{\Sigma 1} \cdot P_{\Sigma 2}}) = \Delta U_{a,doz} , \quad (4.94)$$

од каде што следува:

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{\sqrt{P_{\Sigma 1}}}{\sigma \cdot U_n \cdot \Delta U_{a,doz}} \cdot (l_1 \cdot \sqrt{P_{\Sigma 1}} + l_2 \cdot \sqrt{P_{\Sigma 2}}) ; \\ S_2 &= \frac{\sqrt{P_{\Sigma 2}}}{\sigma \cdot U_n \cdot \Delta U_{a,doz}} \cdot (l_1 \cdot \sqrt{P_{\Sigma 1}} + l_2 \cdot \sqrt{P_{\Sigma 2}}) . \end{aligned} \quad (4.95)$$

Ако на сличен начин се анализира случајот кога мрежата се состои од n делници (сл. 4.8), ќе се добие следната зависност:

$$\frac{S_1^2}{P_{\Sigma 1}} = \frac{S_2^2}{P_{\Sigma 2}} = \dots = \frac{S_n^2}{P_{\Sigma n}} = \text{const.}, \quad (4.96)$$

додека за пресекот во k -тата делница S_k добиваме:

$$S_k = \frac{\sqrt{P_{\Sigma k}}}{\sigma \cdot U_n \cdot \Delta U_{a, doz}} \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot \sqrt{P_{\Sigma i}} ; \quad k=1, 2, \dots, n. \quad (4.97)$$

Добиените пресеци S_k се заокружуваат на најблиските стандардни пресеци. Потоа се определуваат подолжните параметри r и x за секој пресек од мрежата и се пресметува загубата на напон во мрежата ΔU . На крајот се проверува дали е задоволен условот (4.61) и по потреба се врши корекција (зголемување) на некои од усвоените пресеци.