

3. ЗАМЕНСКИ ШЕМИ И ПАРАМЕТРИ НА ЕЛЕМЕНТИТЕ НА ЕЕС

3.1. ВОДОВИ

По должината на водовите, практично рамномерно, се распределени се нивните **погонски параметри**:

- редната **активна отпорност** r ,
- редната **индуктивна отпорност** x ,
- попречната **активна одводност** g и
- попречната **капацитивна проводност** b .

Во практичните пресметки за надземните водови со должина l не поголема од 250 km и за кабелските водови со должина до 50 km, рамномерно распределените параметри на водот можат да се заменат со концентрираните параметри R , X , G и B , при што е:

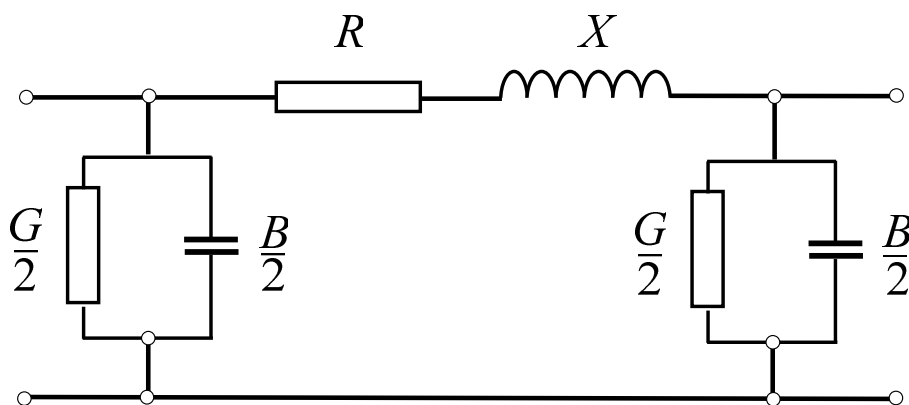
$$R = r \cdot l,$$

$$X = x \cdot l,$$

$$G = g \cdot l,$$

$$B = b \cdot l.$$

Заменската π -шема на водот, која одговара на овие услови, е прикажана на сликата 3.1.



Слика 3.1. Заменска π -шема на вод

Редната активна отпорност r на спроводниците со попречни пресеци што се користат во пракса, при фреквенција **50 Hz** е практично еднаква на нивната активна

отпорност при еднонасочна струја, бидејќи во тие услови појавата на површинскиот ефект (скин ефект) е слабо изразена. Податоците за редните активни отпорности на спроводниците обично се даваат за температура од $+20^{\circ}\text{C}$ и можат да се најдат во каталозите на нивните производители или пак во разни прирачници.

Во недостиг на други податоци редната активна отпорност r_{20} при 20°C на спроводниците од алучел, изразена во Ω/km , со задоволителна точност за практични пресметки може да се определи со равенката:

$$r_{20} = \frac{1000}{34 \cdot A} = \frac{29,4}{A} \frac{\Omega}{\text{km}}. \quad (3.1)$$

Во оваа равенка со A е означена површината на напречниот пресек на алуминиумскиот дел од јажето, изразен во mm^2 .

При температура θ , различна од 20°C , активната отпорност по единица должина r_{θ} се пресметува со следната формула:

$$r_{\theta} = r_{20} \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta - 20)]. \quad (3.2)$$

Во неа со r_{20} е означена подолжната (надолжната) редна отпорност на спроводникот при температура 20°C , додека α е температурниот коефициент на промена на отпорот, кој за алуминиумот (а исто така и за бакарот) приближно изнесува $\alpha = 0,004 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$.

Во погонски услови скин ефект, пораст на температурата и слично) за пресметување на подолжната активната отпорност r на надземните водови се користи релацијата:

$$r_{20} = \frac{1000}{32 \cdot A} = \frac{30,25}{A} \frac{\Omega}{\text{km}}. \quad (3.1.a)$$

Погонската редна индуктивна отпорност x на надземните водови зависи од растојанијата меѓу спроводниците на водот и од нивните радиуси. За трифазните надземни водови таа се пресметува со равенката:

$$x = \frac{\omega \cdot \mu_o}{2\pi} \cdot \left(\ln \frac{D_m}{r_p} + \frac{1}{4} \right), \quad (3.3)$$

т.е.:

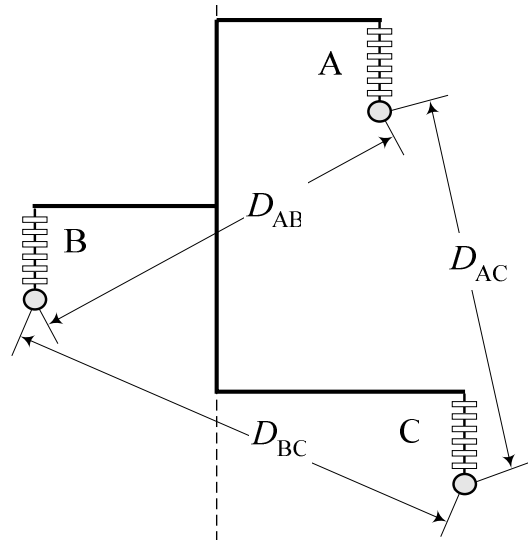
$$x = 0,1445 \cdot \log \frac{D_m}{r_p} + 0,0157 \quad \Omega/\text{km}. \quad (3.4)$$

каде што е:

r_p радиус на спроводникот (се претпоставува дека сите фазни спроводници имаат исти димензии);

D_m *средно-геометриско растојание (СГР)* меѓу фазните спроводници (види сл. 3.2). Тоа се пресметува со равенката:

$$D_m = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{AC} \cdot D_{BC}} , \quad (3.5)$$



Слика 3.2. Диспозиција на фазните спроводници на главата од столбот

Равенката (3.4) може да се напише во следниот облик:

$$x = 0,1445 \cdot \log \frac{D_m}{D_s} . \quad (3.6)$$

Во последната равенка е воведена величината D_s која се нарекува *сопствено средно-геометриско растојание (ССГР)* на спроводникот (спроводниците во снопот).

За **масивни спроводници**, или пак за спроводници изведени во форма на **јажиња од еднороден материјал**, сопственото средно-геометриско растојание се пресметува со формулата:

$$D_s = r'_p = e^{-\frac{1}{4}} \cdot r_p = 0,7788 \cdot r_p , \quad (3.7)$$

За **алучел-јажињата** тоа се пресметува со помош на прилично сложени формули. Сепак, за алучел-јажињата со однос на пресеците $\varepsilon = S_{Al} / S_{Fe} = 6:1$, кој најчесто се среќава

кај надземните водови, сопственото средно-геометриско растојание приближно изнесува :

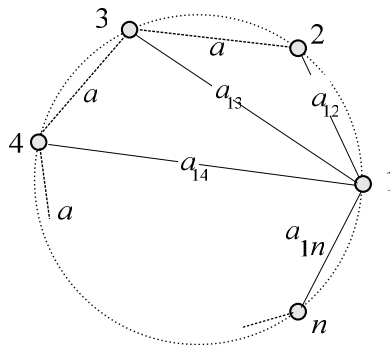
$$D_s \approx 0,81 \cdot r_p . \quad (3.8)$$

За пренесување на големи моќности со надземните водови се користат високи напони и големи пресеци на фазните спроводници. Зголемувањето на попречниот пресек кај високонапонските преносни водови се врши најчесто со поставување на повеќе спроводници по фаза, односно со поставување на повеќе **спроводници во сноп** (сл. 2.7).

На тој начин, секоја фаза ќе биде составена од поголем број спроводници, поставени најчесто во темињата на рамностран многуаголник, чија страна ***a*** обично изнесува од **30 до 50 cm**. Во ваквиот случај снопот составен од поголем број спроводници може да се еквивалентира со еден единствен еквивалентен спроводник, чиешто **сопствено средно-геометриско растојание** се пресметува со помош на формулата:

$$D_s = \sqrt[n]{r_p \cdot \prod_{i=2}^n a_{1i}} = \sqrt[n]{r_p \cdot a_{12} \cdot a_{13} \cdot \dots \cdot a_{1n}} . \quad (3.9)$$

Во последната формула со n е означен бројот на спроводниците во снопот, со a_{1i} е означено растојанието помеѓу првиот и i -тиот спроводник во снопот (сл. 3.3), додека r_p е радиусот (полупречникот) на спроводниците од снопот.



Слика 3.3. Спроводници во сноп

Така на пример, ако снопот е составен од $n = 2$ спроводника, поставени на меѓусебно растојание a , сопственото средно-геометриско растојание на спроводниците во снопот ќе изнесува:

$$n = 2: \quad D_s = \sqrt{r_p \cdot a} . \quad (3.10)$$

Во случајот $n = 3$, ќе имаме:

$$n = 3: D_S = \sqrt[3]{r_p \cdot a^2}, \quad (3.11)$$

додека кога е $n = 4$, со помош на формулата (3.9) добиваме:

$$n = 4: D_S = \sqrt[4]{\sqrt{2} \cdot r_p \cdot a^3}. \quad (3.12)$$

За водови со n спроводници во сноп подолжната реактанција на водот x се пресметува со изразот:

$$x = 0,1445 \cdot \log \frac{D_m}{D_S} + \frac{0,0157}{n}. \quad (3.6.a)$$

Со изведба на спроводниците во сноп се намалува редната погонска индуктивна отпорност по единица должина. Така, на пример, ако снопот е составен од **два** спроводника, индуктивната отпорност на водот ќе биде помала за **15 до 20%** во споредба со истата за случајот кога би имале само еден спроводник по фаза. Ако пак снопот е составен од **три** спроводници, тогаш индуктивната отпорност на водот се намалува за **25 до 30%**. Со натамошното зголемување на бројот на спроводниците во снопот индуктивната отпорност на водот и понатаму се намалува, но тоа намалување ќе биде многу помалку изразено.

Ако на едни исти столбови се поставени **две тројки** на спроводници (т.е. ако се работи за т.н. **двосистемски вод**), индуктивната отпорност на секоја тројка, т.е. на секој од водовите, ќе зависи и од нивниот заемен распоред. Присутството на вториот вод врши **намалување** на индуктивната отпорност кај првиот за **15 до 20%** – и обратно.

Табела 3.1. Просечни вредности на реактанциите по единица должина за некои видови надземни и кабелски водови

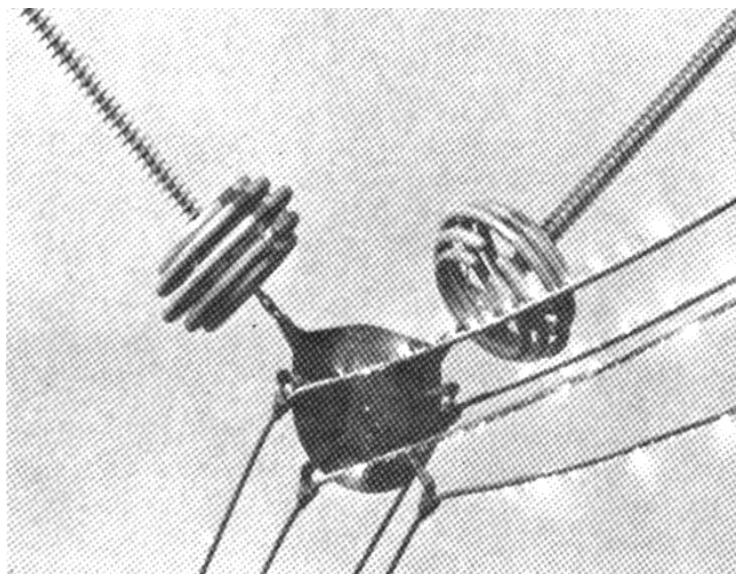
Вид на надземниот вод	x (Ω/km)
Надземен, до 1 kV	0,31
Надземен, 6 - 10 kV	0,38
Надземен, 20 kV, 35 kV, 110 kV	0,40
Надземен, 220 kV	0,41
Надземен, 380 kV	0,34
Кабелски, до 1 kV	0,06
Кабелски, 6 - 10 kV	0,08
Кабелски, 20 kV	0,11
Кабелски, 35 kV	0,13

Погонските реактанции на трифазните надземни водови се неколку пати поголеми отколку реактанциите на трифазните кабли. Тоа јасно се гледа од табелата 3.1. Во оваа табела се прикажани просечните вредности на погонските индуктивни отпорности (реактанции) по единица должина на некои надземни и кабелски водови.

Појречнајта активна одводнос g на водот се определува врз основа на загубите на активна моќност во изолацијата на водот.

Кај надземните водови од сите напони загубите на активна моќност во изолаторите се сосема мали, дури и во подрачјата со големо *аерозагадување*. Затоа овие загуби обично се занемаруваат. Меѓутоа, кај високонапонските водови со номинален напон *110 kV и повисок*, во определени услови се јавува специфично празнење околу спроводниците, наречено *корона*.

Ова празнење е последица на *интензивна јонизација* на воздухот околу спроводниците, условена од превисока *јачина* на електричното поле, или пак на *смалена диелектрична цврстина* на воздухот која се должи на присуството на влага и разни честички во него. Короната е проследена со виолетова светлина и карактеристичен сиктав шум.



Слика. Корона кај 500 kV надземен вод

Појавата на корона е особено интензивна при **влажно време**. Тогаш, **загубите** поради короната се за **10** па и повеќе пати поголеми од вообичаените. Најефикасен начин за смалување на загубите на моќност поради короната е примена на спроводници со поголем надворешен радиус, односно со примена на спроводници во сноп. Со ова се намалува интензитетот на електричното поле на површината на спроводниците и се ослабува процесот на јонизација на околниот воздух. Од тие причини се утврдени најмалите дозволени пресеци на спроводниците и јажињата кај надземните водови со разни номинални напони, со што се постига загубите поради короната да бидат прифатливи. Нивните вредности се дадени во табелата 3.2.

Табела 3.2. Најмали дозволени пресеци кај надземните водови заради намалување на ефектот на корона

Номинален напон на водот (kV)	Најмал дозволен пресек на Al/Č-јаже
110 kV	70/12
220 kV	240/40
380 kV	2 × 490/65

За пресеци на спроводниците наведени во табелата 3.2, како и за пресеци поголеми од нив, загубите на активна моќност кај надземните водови поради короната се мали и изнесуваат околу **1 kW/km** за **110 kV** надземни водови, односно неколку kW/km за надземни водови со повисок напон. Меѓутоа, кај надземните водови со највисок напон (**500 kV** и **750 kV**), при лошо време, загубите поради короната можат да достигнат и вредности преку **100 kW/km**, што при поголеми должини на водовите доведува до значителни загуби на моќност кои се мерливи со цуловите загуби.

Кај електроенергетските кабли со номинален напон до 35 kV загубите на активна моќност во изолацијата (диелектричните загуби) се сосема мали и обично не се земаат предвид во пресметките. Но, кај каблите со напон 110 kV и повеќе загубите во диелектрикот можат да изнесуваат неколку kW/km.

Од изложеното се гледа дека погонската попречна активна спроводност е менлив нелинеарен параметар. Неа можеме да ја определиме со помош на равенката:

$$g = \frac{\Delta P'_{iz}}{U^2}, \quad (3.13)$$

каде што $\Delta P'_{iz}$ се вкупните загуби на активна моќност по единица должина во изолацијата на водот, во случајот кога водот работи со погонски напон U .

Во практичните пресметки на стационарните режими на работа на трифазните електроенергетски мрежи има смисла попречната активна спроводност на водот да се зема предвид само кај водовите со номинален напон 380 kV и повеќе. Но и тогаш, од чисто практични причини, погодно е наместо да се работи со активната одводност B на водот, загубите во изолацијата ΔP_{iz} , односно загубите поради короната ΔP_{kor} , да се земаат како дополнително електрично оптоварување на краевите на водот (по половина на секој негов крај).

Погонската попречна капацитивна спроводност b на водот е последица на постоењето на заемната капацитивност помеѓу фазните спроводници како и на капацитивност помеѓу секој фазен спроводник и земјата. Овде ќе се задржиме само на водовите кај кои е извршено врстосување (транспозиција) на фазите (види сл. 2.9).

Погонската капацитивност по единица должина C'_p на трифазен вод може да се пресмета со помош на следната формула:

$$C'_p = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{2H_s \cdot D_m}{r_p \cdot H_m}}. \quad (3.14)$$

каде што е:

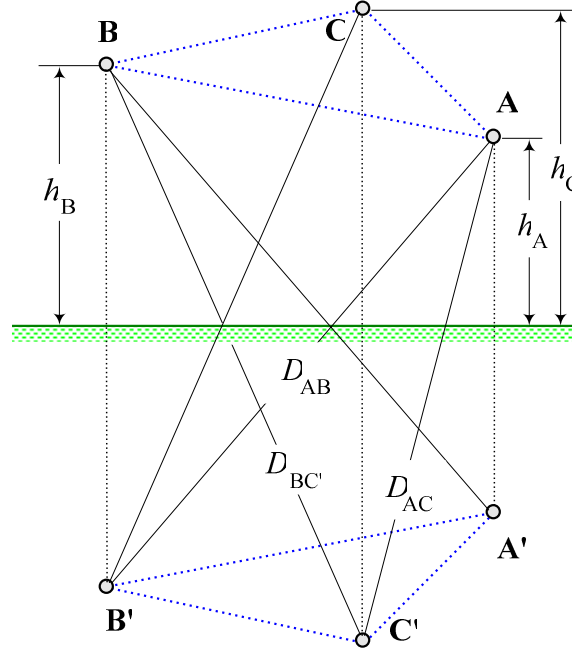
r_p - радиус на спроводниците;

$$H_s = \sqrt[3]{h_A \cdot h_B \cdot h_C};$$

$$D_m = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{AC} \cdot D_{BC}};$$

$$H_m = \sqrt[3]{D_{AB'} \cdot D_{AC'} \cdot D_{BC'}}.$$

Значењето на ознаките h_i , D_{ik} и $D_{ik'}$ се гледа од сликата 3.4, со следното дополнување. Поради тоа што спроводниците не се хоризонтални, туку во просторот заземаат облик на синџирница (верижник, ланчаница), нивната просечна висина над земјата h_i се пресметува со помош на следниот израз:



Слика 3.4. Скица за објаснение на формулата (3.14)

$$h_i = h_{i,\min} + (1/3) \cdot f_i ; (i = A, B, C) \quad (3.15)$$

Во формулата (3.15) со f_i е означен провесот на i -тиот спроводник, додека со $h_{i,\min}$ е означена височината на темето на синџирницата над тлото.

Погонската попречна капацитивна спроводност по единица должина на водот ќе биде:

$$b = \omega \cdot C'_p = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log \frac{2H_s \cdot D_m}{r_p \cdot H_m}}, \quad \frac{\text{S}}{\text{km}}. \quad (3.16)$$

Доколку водот е изведен со спроводници во сноп, тогаш повторно се користи равенката (3.16), со таа разлика што радиусот на спроводникот r_p се заменува со еквивалентниот радиус на снопот D_s , пресметан со помош на (3.9).

Кај реалните водови обично е $2H_s \approx H_m$, па равенката (3.15) може да се напише поедноставно:

$$b = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log \frac{D_m}{r_p}} \frac{\text{S}}{\text{km}}. \quad (3.17)$$

Кога не ни е позната геометријата на фазните спроводници, за приближната проценка на големината на погонската капацитивна спроводност по единица должина можат да се користат следните вредности:

- $b = 2,6 - 2,8 \mu\text{S}/\text{km}$ – за водови **110 kV** и **220 kV**, со еден спроводник по фаза;
- $b = 3,3 \mu\text{S}/\text{km}$ – за водови **380 kV**, со два спроводника по фаза.

Кај кабелските водови вредностите на погонската капацитивна спроводност по единица должина b се значително поголеми.

Постоењето на капацитивноста на водот е причина за течење на капацитивна струја низ водот (струја која му претходи на напонот за 90°) дури и тогаш кога е водот неоптоварен. Доколку, поради упростување, претпоставиме дека напонот вдолж водот е константен (иако тоа не е сосема така), тогаш вкупната капацитивна струја, генерирана од капацитивноста на водот, ќе биде:

$$I_c = U_f \cdot b \cdot l = B \cdot U_f, \quad (3.18)$$

каде што U_f е фазниот погонски напон.

На струјата I_c ѝ соодветствува капацитивната моќност на водот Q_c , која се нарекува и генерирана реактивна моќност на водот:

$$Q_c = 3 \cdot U_f \cdot I_c = 3 \cdot B \cdot U_f^2 = B \cdot U^2. \quad (3.19)$$

Во последната формула со U е означен **меѓуфазниот (линискиот) погонски напон** на водот.

Од изведените формули за пресметување на погонската капацитивна спроводност на водот произлегува дека таа малку зависи од големината на средно-геометриското растојание на фазните спроводници, а малку зависи и од големината на пречникот на спроводниците. Со нивната

измена во доста широки граници погонската капацитивна спроводност малку ќе се менува.

Генерираната реактивна моќност на водот Q_c зависи од квадратот на погонскиот напон. Во табелата 3.3 се прикажани просечните вредности на генерираната реактивна моќност за надземни водови со разни номинални напони и за должина $l = 100 \text{ km}$.

Табела 3.3. Просечни вредности на генерираната реактивна моќност од надземни водови со должина $l = 100 \text{ km}$

Номинален напон на водот $U_n \text{ (kV)}$	Генерирана реактивна моќност $Q_c \text{ (Mvar/100 km)}$
110	3,3
220	13,0
380	50,0

Капацитивните струи кај кабелските водови се значително поголеми во однос на истите кај надземните водови. Причина за тоа е големата капацитивна спроводност кај каблите, што е последица на малите меѓусебни растојанија меѓу спроводниците и поголемата диелектрична константа на диелектрикот ϵ .

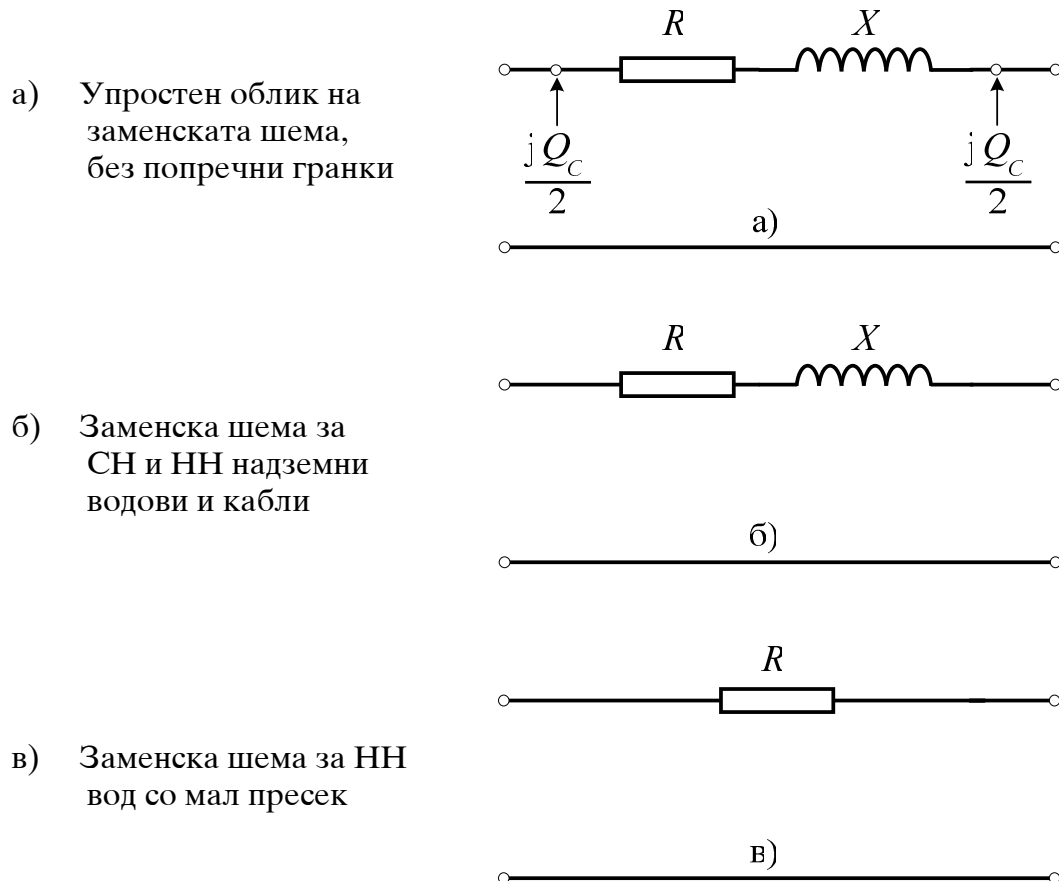
Поради тоа генерираните реактивни моќности од каблите ќе бидат исто така многу поголеми. Така, на пример, трижилен кабел за напон **20 kV**, со пресек на спроводниците 150 mm^2 и со должина **100 km**, при номинален напон би генерирал околу **5,6 Mvar**. Ако кабелскиот вод за напон 20 kV би го сочинувале три едножилни кабли со истиот пресек (150 mm^2), тогаш тој би генерирал околу **3,3 Mvar** на **100 km**.

Сепак, кога се работи за кабли со номинален напон под овој напон ($U_n \leq 10 \text{ kV}$) и со релативно мали должини, во практичните пресметки на состојбата во електроенергетските мрежи, нивните капацитивни струи не се земаат предвид.

Ако ни е позната генерираната реактивна моќност на еден вод Q_c , тогаш, наместо со заменската π -шема, него ќе можеме да го претставиме со шемата од сл. 3.5 а, со што решавањето на мрежата се упростува. Притоа, кај надземните водови со номинален напон 35 kV и понизок, капацитивната спроводност на водот може воопшто да не се зема

предвид. За нив задоволува и заменската шема од сликата 3.5 б.

Од друга страна, при решавањето на кабелските мрежи со номинален напон 10 kV и понизок, може да се изврши занемарување на погонските индуктивни отпорности доколку каблите се со релативно мал пресек. Во тој случај нив ги претставуваме со заменската шема од сликата 3.5 в.



Слика 3.5. Разни облици на заменска шема на вод

Кога низ водот тече одредена струја на оптоварувањето $I = I_f$, тогаш во редната индуктивна отпорност на водот се остваруваат загуби на реактивна моќност:

$$Q_x = 3 \cdot X \cdot I^2, \quad (3.20)$$

и истовремено, погонскиот капацитет на водот генерира определена реактивна моќност Q_c :

$$Q_c = 3 \cdot B \cdot U_f^2. \quad (3.21)$$

Ако водот струјно го оптовариме така што ќе се постигне овие две реактивни моќности **да бидат еднакви** меѓусебно, тогаш на водот ќе имаме баланс (**рамнотежа**) на реактивната моќност, т.е. водот не ќе биде ниту извор ниту потрошувач на реактивна моќност. Значи тргнувајќи од условот $Q_c = Q_x$, ќе ја добиеме следната релација помеѓу напонот и струјата која важи за овој карактеристичен режим:

$$\frac{U_f}{I_f} = \sqrt{\frac{X}{B}} = \sqrt{\frac{x}{b}} = \sqrt{\frac{L'_p}{C'_p}} = Z_V. \quad (3.22)$$

Со последната релација е дефинирана таканаречената *погонска бранова импеданција* на водот Z_V . Таа е, значи, реална величина.

Кога на крајот од водот е приклучен **чисто активен потрошувач** чијашто активна отпорност е точно еднаква на погонската бранова импеданција на водот Z_V , тогаш за водот велиме дека пренесува *природна моќност* P_N . Во таквиот режим, освен што постои баланс помеѓу "произведената" и "потрошената" реактивна моќност, напонот и струјата насекаде долж водот се константни по модул и се во фаза.

Големината на брановата импеданција Z_V лесно се определува врз основа на самата геометрија на водот. Со оглед на релациите со помош на кои се пресметуваат погонскиот индуктивитет и капацитет по единица должина кај трифазните надземни водови:

$$L'_p = \frac{\mu_o}{2\pi} \cdot \left(\ln \frac{D_m}{r_p} + \frac{\mu_r}{4} \right) \approx \frac{\mu_o}{2\pi} \cdot \ln \frac{D_m}{r_p} \quad \text{и} \quad C'_p = \frac{2\pi \varepsilon_o}{\ln(D_m/r_p)}, \quad (3.23)$$

и водејќи сметка за големините:

$$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m и}$$

$$\varepsilon_o = 10^{-9}/36\pi \text{ F/m,}$$

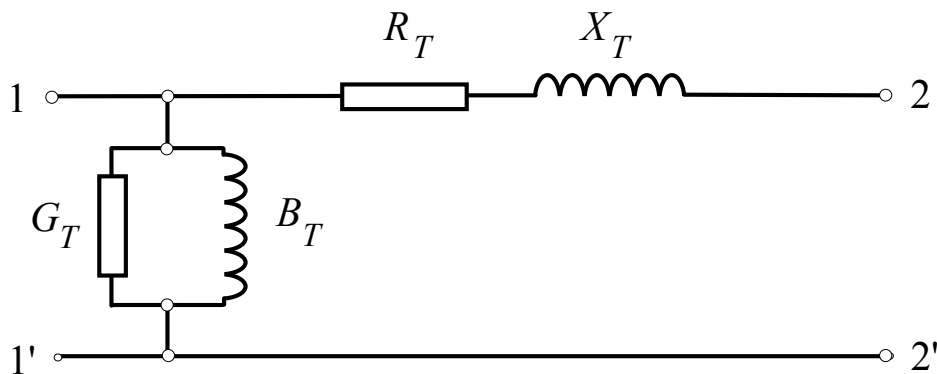
добиваме:

$$Z_V = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\mu_o}{\varepsilon_o}} \cdot \ln \frac{D_m}{r_p}.$$

или:

$$Z_V = 60 \cdot \ln \frac{D_m}{r_p} = 138 \cdot \log \frac{D_m}{r_p}. \quad (3.24)$$

3.2. ДВОНАМОТНИ ТРИФАЗНИ ТРАНСФОРМАТОРИ



Слика 3.6. Заменска Г-шема на двонамотен трансформатор

Независно од тоа како им се поврзани фазните намотки, двонамотните трансформатори најчесто ги претставуваме со заменската Г-шема (сл. 3.6).

Строго земајќи, и кај трансформаторите би била посоодветна примената на заменската Т-шема отколку заменската Г-шема, бидејќи и во обидот на празен од низ примарната намотка тече струја (струјата на празен од, т.е. струјата на магнетизирање), па во неа ќе има и тогаш загуби на моќност.

Споредени со загубите во железото, овие загуби се сосема мали а во практичните пресметки се прави незначителна грешка ако се земе дека вкупните загуби во обидот на празен од се еднакви на загубите во железото. Затоа, отсега натаму, наместо со поточната заменска Т или заменска π-шема на трансформаторот, ќе работиме со поедноставната заменска Г-шема.

Заменската Г-шема на еден двонамотен трифазен трансформатор се карактеризира со 4 параметри: **активна отпорност** R_T и **реактивна отпорност** X_T на намотките на трансформаторот и **активна спроводност** G_T и **реактивна спроводност** B_T на гранката на магнетизирање (попечната гранка) на трансформаторот.

Нив ги определуваме врз основа на податоците за струјата I_o и загубите на активна моќност ΔP_o во обидот на

празен од и напонот на куса врска U_k и загубите на активна моќност во обидот на куса врска ΔP_k .

При обидот на празен од струјата низ примарната намотка е мала, па може да се смета дека ќе бидат мали и загубите на активна моќност во примарната намотка, бидејќи тие се пропорционални на квадратот од струјата на празен од.

Затоа нема да се направи голема грешка ако се земе дека во обидот на празен од вкупните загуби на активна моќност ΔP_o се еднакви на загубите во железото ΔP_{Fe} , т.е. дека може да се пишува:

$$\Delta P_o \approx \Delta P_{Fe}. \quad (3.25)$$

Од друга страна, загубите во железото зависат од јачината на магнетската индукција B во магнетското коло на трансформаторот, односно зависат посредно од висината на напонот (т.е. погонскиот напон) на кој е приклучена примарната намотка на трансформаторот. Бидејќи напонот во погонот се менува во доста тесен интервал околу својата номинална вредност, може да се смета дека загубите во железото се практично константни, еднакви на оние кои се имаат при номинален напон. Затоа, ако ги знаеме загубите на активна моќност во режимот на празен од, од шемата на сликата 3.6 следува:

$$\Delta P_o = \Delta P_{Fe} = G_T \cdot U_n^2, \quad (3.26)$$

т.е:

$$G_T = \frac{\Delta P_o}{U_n^2}. \quad (3.27)$$

Кај енергетските трансформатори струјата на празен од I_o изнесува од 0,1% до 3% од номиналната струја на трансформаторот. Трансформаторите со поголеми номинални моќности по правило имаат помали процентуални вредности на струјата на празен од – и обратно.

Струјата на празен од има мала активна компонента која се должи на постоењето на активните загуби во магнетското коло на трансформаторот. Таа е за 4 до 6 пати помала од соодветната реактивна компонента. Затоа може да се земе дека вкупната струја на празен од и нејзината

реактивна компонента се приближно еднакви. Во тој случај можеме да пишуваме:

$$|B_T| \cdot U_n = \sqrt{3} \cdot \frac{i_o \%}{100} \cdot I_n = \frac{i_o \%}{100} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U_n I_n}{U_n} = \frac{i_o \%}{100} \cdot \frac{S_n}{U_n}, \quad (3.28)$$

каде што е:

I_n – номинална струја на трансформаторот;

S_n – номинална моќност на трансформаторот;

$i_o \%$ – струја на празен од на трансформаторот, изразена во % од номиналната струја I_n .

Од равенката (3.28) за реактивната спроводност B_T на гранката на магнетизирање на трансформаторот добиваме:

$$B_T = -\frac{i_o \%}{100} \cdot \frac{S_n}{U_n^2}. \quad (3.29)$$

Знакот минус во равенката (3.29) укажува на индуктивниот карактер на гранката.

При **обидот на куса врска** секундарната намотка од трансформаторот кусо се спојува, а на примарната намотка се донесува напонот U_k при кој низ намотките од трансформаторот ќе течат номинални струи. Притоа во намотките (бакарот) и во железото ќе се остваруваат загуби на активна моќност ΔP_k .

Бидејќи **напонот на кусата врска** е мал и најчесто се движи во границите од **4%** до **12%** од номиналниот напон, магнетскиот флукс, а со тоа и магнетската индукција во магнетското коло на трансформаторот, ќе бидат сосема мали (околу десет пати помали од своите номинални вредности).

Бидејќи загубите во железото се пропорционални на квадратот од магнетската индукција, произлегува дека во обидот на куса врска тие ќе бидат уште помали, практично безначајни во однос на загубите во бакарот. Затоа вкупните загуби на активна моќност во обидот на куса врска практично се должат само на загубите во бакарот ΔP_{Cun} , т.е. може да се пишува:

$$\Delta P_{Cun} \approx \Delta P_k = 3 \cdot R_T I_n^2 = 3 \cdot R_T \cdot I_n^2 \cdot \frac{U_n^2}{U_n^2} = R_T \cdot \frac{S_n^2}{U_n^2}, \quad (3.30)$$

од каде се добива:

$$R_T = \Delta P_{Cun} \cdot \frac{U_n^2}{S_n^2}. \quad (3.31)$$

Напонот на куса врска U_k обично се изразува во проценти од номиналниот напон на трансформаторот и тогаш се означува со $u_k\%$ или само со u_k . Користејќи се повторно со заменската шема од слика 3.6, за напонот на куса врска можеме да пишуваме:

$$U_k = \frac{u_k\%}{100} \cdot U_n = \sqrt{3} \cdot Z_T \cdot I_n, \quad (3.32)$$

од каде што за импеданцијата на двонамотниот трансформатор се добива:

$$Z_T = \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n}. \quad (3.33)$$

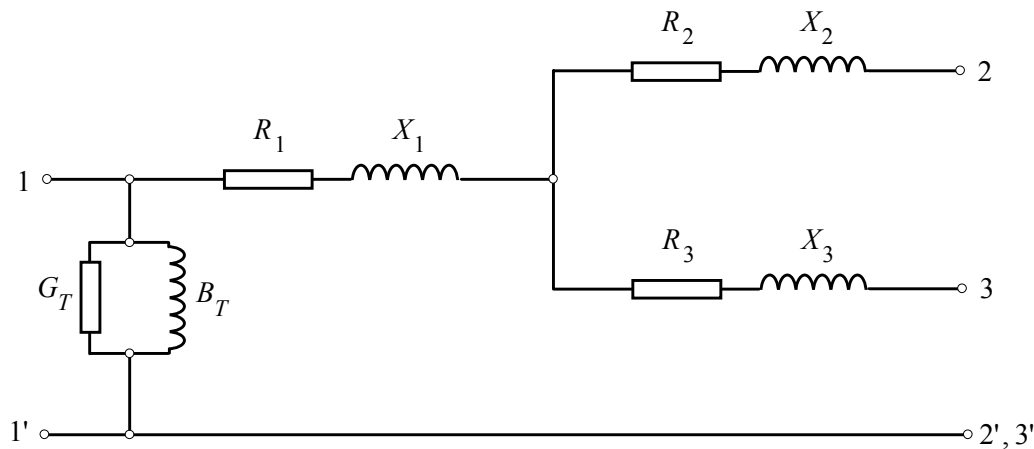
Конечно, реактанцијата на намотките на двонамотниот трифазен трансформатор се пресметува од равенката:

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}. \quad (3.34)$$

Во заменските шеми на трансформаторите со големи моќности, гранката на магнетизирање, во која фигурираат параметрите G_T и B_T , честопати **се испушта**.

Изведените формули за параметрите на трансформаторот R_T , X_T , G_T и B_T се општи и не зависат од спрегата и групата на соединување на намотките од трансформаторот. Во нив фигурира величината U_n , т.е. "**номиналниот напон**" на трансформаторот. Тоа може да биде или номиналниот напон на примарната намотка U_{1n} или номиналниот напон на секундарната намотка U_{2n} . Под U_n треба да се подразбира номиналниот напон на онаа намотка на чијашто страна се врши **сведувањето** на параметрите на трансформаторот.

3.3. ТРИНАМОТНИ ТРИФАЗНИ ТРАНСФОРМАТОРИ



Слика 3.7. Заменска шема на тринамотен трифазен трансформатор

На сликата 3.7 е прикажана заменска шема на **тринамотен трансформатор**. Параметрите што фигурираат на оваа шема се сведени на исто напонско ниво и притоа, секоја намотка е прикажана со својата сведена активна и реактивна отпорност.

Гранката на магнетизирање повторно, како и кај двонамотниот трифазен трансформатор, ќе ја приклучиме на почетокот од примарната намотка (заменска Г-шема) и со нејзе ги уважуваме приближно (но доволно точно) струјата и загубите на празен од. Нејзините параметри G_T и B_T повторно ги пресметуваме со формулите (3.27) и (3.29), врз основа на познатата струја на празен од $i_o\%$ и познатите загуби на активна моќност во режимот на празен од ΔP_o .

Активните и реактивните отпорности на поедините намотки се определуваат врз основа на податоците добиени од обидите на куса врска.

Нека посматраме обид на **куса врска** на релацијата **примар – секундар**. Во овој обид третата (терциерната) намотка е отворена, додека секундарната намотка е кусо врзана. Притоа на примарната намотка приклучуваме мал напон кој постепено го зголемуваме сѐ додека не се постигне вредноста U_{k12} при која струите во примарната и секундарната намотка достигнуваат вредности што одговараат на номиналната моќност на трансформацијата меѓу

примарната и секундарната намотка. Ако оваа моќност ја означиме со S_{n12} а збирните загуби на активна моќност во бакарот што притоа се остваруваат во примарната и секундарната намотка ги означиме со ΔP_{k12} , тогаш, врз основа на сликата 3.7, можеме да пишуваме:

$$\Delta P_{k12} = 3 \cdot (R_1 + R_2) \cdot I_{12}^2, \quad (3.35)$$

и

$$U_{k12} = \frac{u_{k12} \%}{100} \cdot U_n = \sqrt{3} \cdot (X_1 + X_2) \cdot I_{12}. \quad (3.36)$$

При пишувањето на последната равенка е претпоставено дека се работи за трансформатор со релативно голема моќност (какви што се прават тринамотните трансформатори), за кој е вообичаено за секоја од намотките да биде исполнет условот $X \gg R$, поради што следи $Z \cong X$.

Од равенката (3.31) се добива:

$$R_1 + R_2 = R_{12} = \Delta P_{k12} \cdot \frac{U_n^2}{S_{n12}^2}, \quad (3.37)$$

а од равенката (3.36) се добива:

$$X_{12} = X_1 + X_2 = \frac{u_{k12} \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{n12}}. \quad (3.38)$$

Аналогно, правејќи обид на куса врска на релацијата **примар – терциер** (при отворена секундарна намотка), добиваме:

$$R_1 + R_3 = R_{13} = \Delta P_{k13} \cdot \frac{U_n^2}{S_{n13}^2}, \quad (3.39)$$

$$X_{13} = X_1 + X_3 = \frac{u_{k13} \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{n13}}. \quad (3.40)$$

Конечно, од обидот на куса врска на релацијата **секундар – терциер**, при отворен примар, ги добиваме загубите ΔP_{k23} и напонот на куса врска $u_{k23} \%$, од каде што следува:

$$R_2 + R_3 = R_{23} = \Delta P_{k23} \cdot \frac{U_n^2}{S_{n23}^2}, \quad (3.41)$$

$$X_{23} = X_2 + X_3 = \frac{u_{k23} \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{n23}} . \quad (3.42)$$

Равенките (3.37) , (3.39) и (3.41) претставуваат симултан систем од три линеарни равенки со три непознати, при што непознатите се активните отпорности R_1 , R_2 и R_3 (или, поточно кажано, нивните сведени вредности) на секоја од намотките на трансформаторот. Со неговото решавање се добива:

$$R_1 = (R_{12} + R_{13} - R_{23})/2 , \quad (3.43)$$

$$R_2 = (R_{12} + R_{23} - R_{13})/2 , \quad (3.44)$$

$$R_3 = (R_{13} + R_{23} - R_{12})/2 . \quad (3.45)$$

Аналогно, од системот равенки составен од релациите (3.38), (3.40) и (3.42), се добиваат реактивните отпорности на трите намотки од трансформаторот (сведени вредности):

$$X_1 = (X_{12} + X_{13} - X_{23})/2 , \quad (3.46)$$

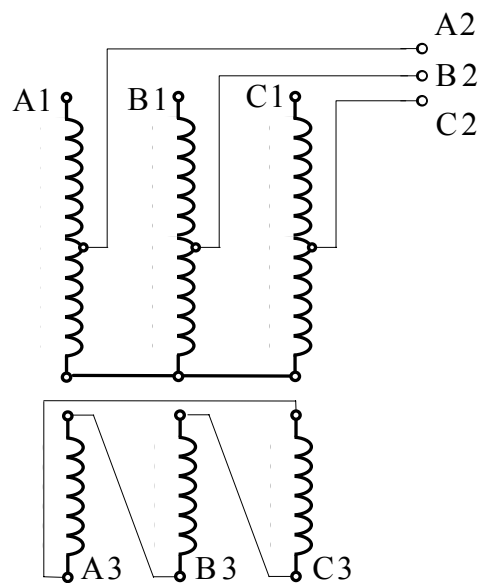
$$X_2 = (X_{12} + X_{23} - X_{13})/2 , \quad (3.47)$$

$$X_3 = (X_{13} + X_{23} - X_{12})/2 . \quad (3.48)$$

На тој начин се определени сите параметри во заменската шема на тринамотниот трансформатор. Повторно ќе нагласиме дека тоа се сведени вредности на параметрите и дека во претходните формули под U_n треба да се подразбира номиналниот напон на онаа намотка на чијашто страна вршиме **сведување на параметрите** од шемата на трансформаторот.

3.4. ТРИФАЗНИ АВТОТРАНСФОРМАТОРИ

За поврзување на мрежи со различни напонски нивоа, кои се притоа блиски по големина, често пати се користат автотрансформаторите. Во нашата земја **автотрансформаторите** се користат за поврзување на мрежите со номинални напони **110 kV** и **220 kV**, мрежите со номинални напони **220 kV** и **380 kV**, но и мрежите со номинални напони **110 kV** и **380 kV**.



Слика 3.8. Тринамотен автотрансформатор

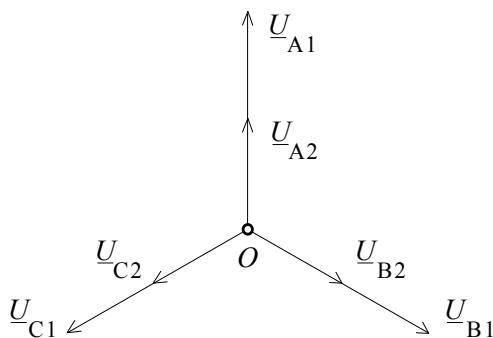
Кај автотрансформаторите делот од примарната намотка кој истовремено му припаѓа и на секундарот се нарекува **заедничка намотка**. Останатиот дел од примарната намотка се нарекува **редна намотка**. Низ заедничката намотка (слика 3.8) тече струја еднаква на разликата на секундарната и примарната струја на автотрансформаторот. Поради тоа заедничката намотка може да има и помал напречен пресек во споредба со секундарот кај двонамотните трансформатори со иста номинална моќност.

Освен тоа, при еднакви електрични параметри на еден двонамотен трансформатор и еден автотрансформатор, последниот ќе има помал попречен пресек на магнетното коло. Затоа, кога коефициентот на трансформација е близок до 1, за изработка на еден автотрансформатор ќе биде потребна осетно помала количина на бакар и железо, па

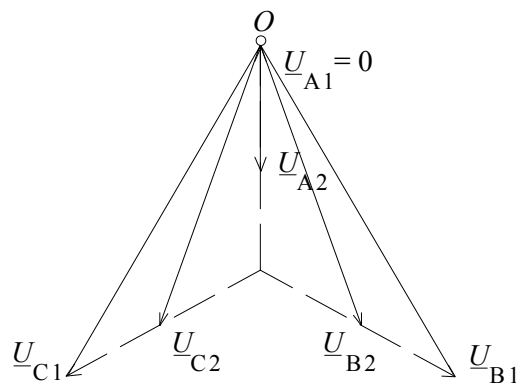
според тоа и **помал габарит и цена**, во споредба со истите параметри кај обичните двонамотни трансформатори.

Автотрансформаторите по правило имаат и трета, т.н. **"терциерна" намотка**. Оваа намотка е обично врзана во **триаголник** и е галвански одвоена од примарната односно секундарната намотка. Терциерната намотка служи за задоволување на сопствените потреби од електрична енергија во трансформаторската станица каде што е приклучен автотрансформаторот, а исто така на него може да биде приклучен синхрон компензатор, кондензаторска батерија или придушница. Меѓутоа, терциерната намотка во основа има и друга улога. Таа врши поништување на **третиот хармоник** во кривата на меѓуфазните напони, а покрај тоа овозможува **намалување на несиметријата** на фазните струи и напони и го спречува нејзиното пренесување од секундарната мрежа во примарната.

Поради постоењето на галванска врска меѓу примарната и секундарната намотка, автотрансформаторите можат да се користат само во мрежите со **заземјена неутрална точка** (кај нас тоа се мрежите со напон 110 kV и повеќе). Доколку неутралната точка не би била заземјена и ако една од фазите во мрежата со повисок номинален напон добие спој со земјата, тогаш напоните во преостанатите две фази во мрежата со понискиот номинален напон ќе добијат преголеми вредности, како што е тоа прикажано на сл. 3.9 б.



Слика 3.9 а. Фазни напони на примарот и секундарот пред земниот спој на фазата "A1"

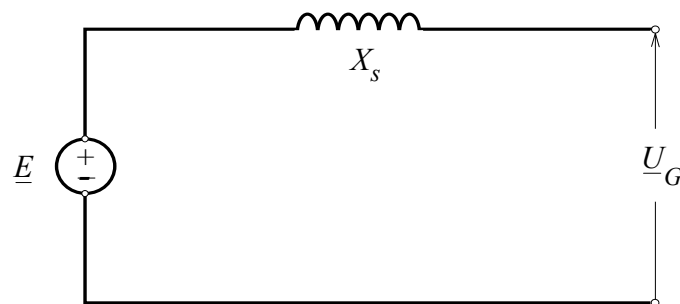


Слика 3.9 б. Фазни напони на примарот и секундарот по настаниот земјоспој на фазата "A1"

Параметрите на гранката на магнетизирање на авто-трансформаторот се определуваат врз основа на познатите податоци за струјата и загубите во обидот на празен од, на ист начин како и кај двомотните и тримотните трансформатори.

Начинот на пресметување на отпорностите R_1 , X_1 , R_2 , X_2 и R_3 , X_3 на одделните намотки е сосема ист како и кај тримотните трансформатори.

3.5. СИНХРОНИ ГЕНЕРАТОРИ



Слика 3.10. Заменска шема на синхрон генератор

Во пресметката на симетричните режими на трифазните мрежи синхроните генератори ги претставуваме со нивната синхрона реактанција X_s и со внатрешната ЕМС зад неа (сл. 3.10)¹. **Активната отпорност** на статорските намотки е, по правило, значително помала од реактивната, па затоа таа редовно **се занемарува**.

Реактанциите на генераторите најчесто се изразуваат во проценти (%) од соодветната номинална импеданција $Z_n = U_n^2 / S_n$ на генераторот. Ако со X_s ја означиме природната вредност на реактанцијата на генераторот, а со $x_s\%$ ја означиме нејзината процентуална вредност, тогаш меѓу нив ќе постои следната релација:

¹ За пресметка на **нестационарните (преодните) режими**, како и за пресметка на режимите на **куса врска** во ЕЕС, синхроните генератори ги претставуваме на поинаков, посложен начин, и за тоа подетално ќе стане збор во VIII-та глава.

$$X_s = \frac{x_s \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} . \quad (3.49)$$

Во последната формула со U_n е означен номиналниот напон на генераторот, додека со S_n е означена неговата номинална моќност.

Синхроните генератори најчесто се прават со следните номинални напони: 6,3 kV; 10,5 kV; 13,8 kV; 15,75 kV; 21 kV. Нивните номинални моќности се движат од неколку стотини kVA до неколку стотини MVA. Меѓутоа, постојат генератори со моќност од 1000 MVA и повеќе.

Покрај споменатите параметри, секој синхрон генератор се карактеризира и со својот номинален фактор на моќност $\cos \varphi_n$. При номинален напон, номинална возбуда и номинална активна моќност P_n синхронизираниот генератор оддава и номинална реактивна моќност Q_n .

Ако се намали возбудната струја на генераторот, ќе се намали и оддаваната реактивна моќност Q . За моќности $P < P_n$ генераторот може да оддава и поголеми реактивни моќности $Q > Q_n$. Колкава реактивна моќност може да дава генераторот при дадена активна моќност и дадени услови на работа, може да се определи врз основа на погонскиот дијаграм на генераторот.

Кога генераторот работи со **смадена возбуда**, тој станува **потрошувач** на реактивна моќност. Во тој случај велиме дека генераторот е подвозбуден, т.е. работи во **капацитивен режим**. Големината на реактивната моќност што генераторот ја зема од мрежата во режимот на подвозбуда исто така е ограничена со погонскиот дијаграм на генераторот.

3.6. ОПТОВАРУВАЊЕ НА ПОТРОШУВАЧИТЕ

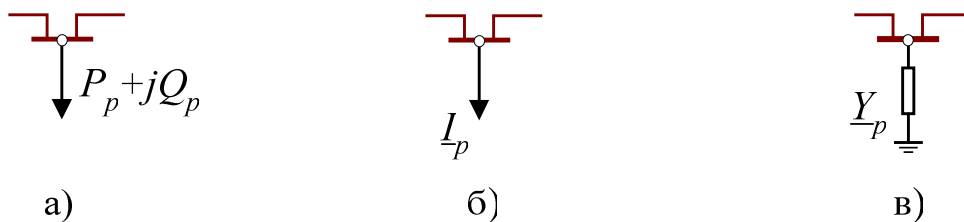
При пресметките на работните режими на електроенергетските мрежи оптоварувањата на потрошувачите се претставуваат со зададени вредности на активната P_p и реактивната Q_p моќност (сл. 3.11 а). Доколку се познати активната и реактивната моќност на еден потрошувач, при познат напон U_p , потрошувачот можеме да го претставиме во вид на **зададена струја** I_p , (сл. 3.11 б).

$$\underline{I}_p = \frac{\underline{S}_p^*}{\sqrt{3} \cdot \underline{U}_p^*} = \frac{P_p - jQ_p}{\sqrt{3} \cdot \underline{U}_p^*}. \quad (3.50a)$$

Напоните во одделните точки од мрежата обично однапред не се познати, па последниот начин на претставување на потрошувачите не е можен. Меѓутоа, во дистрибутивните мрежи напоните во поедините јазли од мрежата малку се разликуваат од својата номинална вредност, па во тој случај може приближно да се земе дека $U_p \approx U_n$, со што се надминува последниот проблем.

Во некои случаи оптоварувањата се претставуваат во вид на пасивна гранка со **константна адмитанција**, поперечно поставена на местото каде што е приклучен самиот потрошувач (сл. 3.11 в). Во тој случај адмитанцијата на гранката со која се претставува самиот потрошувач се пресметува со изразот:

$$\underline{Y}_p = \underline{S}_p^* / U_p^2. \quad (3.50б)$$



Слика 3.11. Разни начини на прикажување на потрошувачите

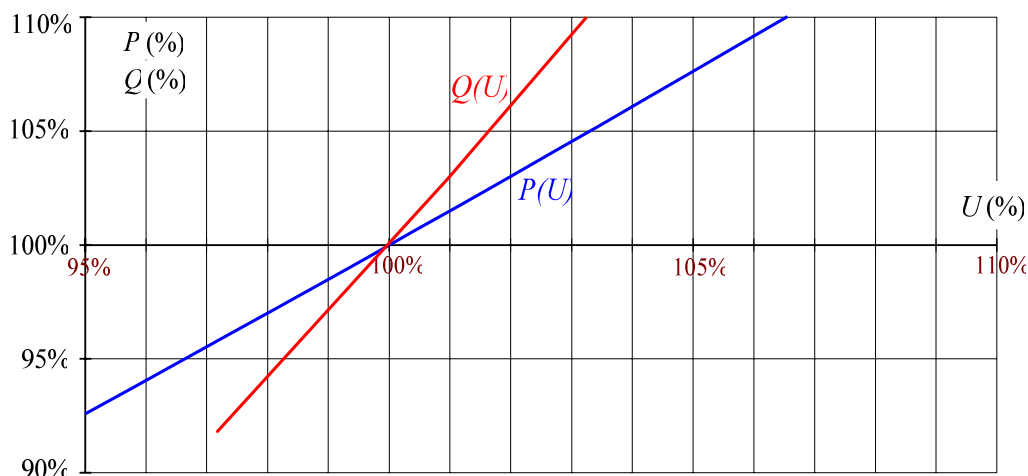
- а) со константна моќност;
- б) со константна струја и
- в) со константна импеданција

Всушност, активната и реактивната моќност на еден потрошувач не зависат исклучиво од барањата на самиот

потрошувач и не се константни, туку со промена на напонот тие исто така се менуваат. Зависностите $P(U)$ и $Q(U)$ се нарекуваат *статички карактеристики* на потрошувачите по напонот.

Статичките карактеристики на разните видови приемници имаат различен облик. Затоа статичките карактеристики на еден потрошувач, кој претставува група од разнородни приемници, тешко се определуваат по пресметковен пат. Нив ги добиваме најчесто по експериментален пат.

Како илустрација, на сл. 3.12 се прикажани статичките карактеристики на еден потрошувач, приклучен на 10 kV собирници во една дистрибутивна мрежа. Потрошувачот го сочинуваат поголем број сијалици со вжарено влакно и поголем број асинхрони мотори.



Слика 3.12. Статички карактеристики на еден потрошувач

3.7. КОМПЕНЗАЦИОНИ УРЕДИ

Синхроните компензатори и кондензаторските батерии, вклучени попречно, во заменските шеми на мрежите обично се претставуваат како извори со дадена вредност на генерираната реактивна моќност. Ова е повеќе оправдано за синхроните компензатори отколку за кондензаторските батерии. Реактивната моќност на кондензаторските батерии Q_{KB} зависи од напонот U на кој тие се приклучени, а зависи и од големината на нивната капацитивност, која е константна или се менува само степенесто. Меѓутоа, имајќи го предвид фактот дека напонот во една мрежа во нормални услови на работа треба малку да се разликува од својата номинална вредност и да варира во текот на денот во еден тесен интервал, претставата на кондензаторските батерии со еден извор на дадена реактивна моќност (исто како и синхроните компензатори) сепак може да се смета за прифатлива.

Покрај генерираната реактивна моќност, компензационите уреди при својата работа земаат од мрежата и извесна активна моќност. Таа е релативно мала и изнесува **0,3 – 0,4%** од генерираната реактивна моќност кога се работи за кондензаторски батерии, односно **2–3%** од генерираната реактивна моќност кога се работи за синхрони компензатори. Со оглед на нејзината мала вредност, во пресметките на работните режими на мрежите во кои постојат и компензациони уреди, споменатите активни загуби можат да се занемарат. Затоа во заменските шеми за компензационите уреди не се води сметка за постоењето на активните загуби. Тие се уважуваат само при оценката на економичноста на работата на мрежата во разгледуваниот режим.

Обично се зема дека реактивната моќност што ја произведува кондензаторската батерија во даден режим на работа е еднаква на нејзината номинална моќност.

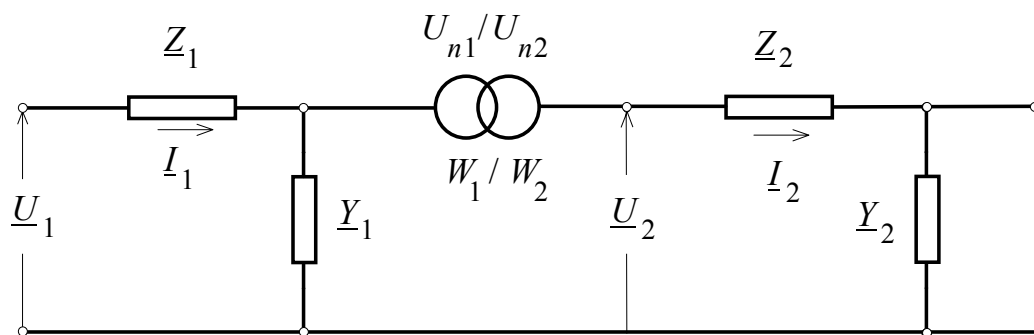
Уредите за **компензација на реактивните параметри** на водовите (редно вклучените кондензаторски батерии и попречно вклучените реактори) обично се претставуваат во заменските шеми на мрежата со своите реактивни параметри: капацитивната отпорност $X_c = 1/\omega \cdot C = U_n^2/Q_n$, односно индуктивната спроводност $B = -1/\omega \cdot L = -Q_n/U_n^2$. Во последните формули со U_n и Q_n се означени номиналниот напон,

односно номиналната реактивна моќност на батеријата односно реакторот.

3.8. СВЕДУВАЊЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ ВО МРЕЖИ СО ТРАНСФОРМАТОРИ

Доколку во разгледуваната мрежа постојат енергетски **трансформатори**, т.е. доколку во мрежата постојат елементи со различни напонски нивоа, тогаш, пред да се пристапи кон решавањето на мрежата, ќе треба да се изврши **сведување** на сите електрични величини на едно исто напонско ниво. Значи, најнапред сите елементи од мрежата се сведуваат на едно исто (произволно избрано) напонско ниво, т.е. се составува заменска шема на мрежата, во која ќе фигурираат само сведени параметри. Потоа се врши сведување и на параметрите на режимот (напони, струи) на истото напонско ниво на кое се сведени параметрите на елементите на мрежата. Постапката на сведување е илустрирана на примерот што следи.

Нека мрежата со номинален напон U_{n1} е поврзана со мрежа со номинален напон U_{n2} со помош на трансформатор со познат преносен однос (сл. 3.13).



Слика 3.13. Пример на мрежа со трансформатори

Постапката на сведување на параметрите на елементите од мрежата и параметрите на режимот на работа на мрежата се изведува според следните општи формули:

$$\underline{U}_{sv} = k \cdot \underline{U} ; \quad (3.51a)$$

$$\underline{I}_{sv} = \frac{1}{k} \cdot \underline{I} ; \quad (3.51b)$$

$$\underline{Z}_{sv} = k^2 \cdot \underline{Z}; \quad (3.51\text{в})$$

$$\underline{Y}_{sv} = \frac{1}{k^2} \cdot \underline{Y}, \quad (3.51\text{г})$$

каде што со k е означен **преносниот однос на трансформаторот**, дефиниран како однос на бројот на навивки на намотката од онаа страна на трансформаторот на која вршме сведување и бројот на навивки на намотката на трансформаторот која се наоѓа на страната чии параметри ги сведуваме.

Така, **на пример**, ако сакаме да вршме сведување на параметрите $\underline{U}_1$, $\underline{I}_1$, $\underline{Z}_1$ и $\underline{Y}_1$ на страната со номинален напон U_{n2} и ако нивните сведени вредности ги означиме со индексот (""), тогаш ќе имаме:

$$k = \frac{W_2}{W_1}; \quad \underline{U}''_1 = k \cdot \underline{U}_1; \quad \underline{I}''_1 = \frac{\underline{I}_1}{k}; \quad \underline{Z}''_1 = k^2 \cdot \underline{Z}_1; \quad \underline{Y}''_1 = \frac{\underline{Y}_1}{k^2}. \quad (3.52)$$

Од друга страна, ако сакаме параметрите $\underline{U}_2$, $\underline{I}_2$, $\underline{Z}_2$ и $\underline{Y}_2$ да ги сведеме на напонско ниво U_{n1} , тогаш соодветните сведени вредности ќе бидат:

$$k = \frac{W_1}{W_2}; \quad \underline{U}'_2 = k \cdot \underline{U}_2; \quad \underline{I}'_2 = \frac{\underline{I}_2}{k}; \quad \underline{Z}'_2 = k^2 \cdot \underline{Z}_2; \quad \underline{Y}'_2 = \frac{\underline{Y}_2}{k^2} \quad (3.53)$$

3.9. ЕДИНИЧНИ (PU) ВРЕДНОСТИ

Проблемот на сведувањето на електричните мрежи во кои имаме две или повеќе напонски нивоа можеме да го решиме и на друг начин, со примената на **единичните** (*pu*, т.е. *per unit*) величини.

Единичната вредност на една комплексна величина се дефинира како количник од посматраната величина и една произволно избрана вредност, која има иста димензија како и посматраната величина и која се нарекува **базна величина**. Базните величини обично се означуваат со индексот "*b*", додека единичните величини се означуваат со индексот "*pu*". Самото сведување во единични величини се одвива на следниот начин.

За секоја електрична величина (напон $\underline{U}$, струја $\underline{I}$, моќност $\underline{S}$, импеданција $\underline{Z}$ или адмитанција $\underline{Y}$) се избира по една базна величина: $\underline{U}_B$, $\underline{I}_B$, $\underline{S}_B$, $\underline{Z}_B$ и $\underline{Y}_B$. Притоа, наместо да

се одберат сите **5 базни величини** независно една од друга, можно е да се изберат **само две** од нив – **произволно**, додека останатите три базни величини ќе можат да се изразат преку усвоените две. Во трифазните електроенергетски мрежи како погодно се покажало да се врши избор на базната моќност S_B и базниот напон U_B , додека преостанатите три базни величини да се пресметуваат со помош на следните изрази:

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot U_B}; \quad Z_B = \frac{U_B}{\sqrt{3} \cdot I_B} = \frac{U_B^2}{S_B}; \quad Y_B = \frac{1}{Z_B} = \frac{S_B}{U_B^2}. \quad (3.54)$$

Кога се работи за мрежи со **две или повеќе напонски нивоа**, тогаш ќе биде потребно за секое напонско ниво да имаме по еден систем од 5 базни величини. Притоа односот на базните напони задолжително мора да биде усогласен со преносниот однос (т.е. со односот на бројот на навивките) на трансформаторот со кој се поврзани деловите од мрежата со разни напонски нивоа. Исто така се практикува **базната моќност S_B** да биде насекаде во мрежата **иста**.

Да се вратиме повторно на примерот од сликата 3.13. Ако за делот од мрежата со номинален напон U_{n1} за базниот напон и базната моќност усвоиме одредени вредности U_{B1} и S_{B1} , тогаш останатите базни величини кои се однесуваат на тој дел на мрежата ќе бидат:

$$I_{B1} = \frac{S_{B1}}{\sqrt{3} \cdot U_{B1}}; \quad Z_{B1} = \frac{U_{B1}}{\sqrt{3} \cdot I_{B1}} = \frac{U_{B1}^2}{S_{B1}}; \quad Y_{B1} = \frac{1}{Z_{B1}} = \frac{S_{B1}}{U_{B1}^2}. \quad (3.55)$$

За делот од мрежата со номинален напон U_{n2} базните величини ќе бидат еднозначно дефинирани:

$$S_{B2} = S_{B1}; \quad U_{B2} = U_{B1} \cdot \frac{W_2}{W_1}; \quad I_{B2} = \frac{S_{B2}}{\sqrt{3} \cdot U_{B2}} \equiv I_{B1} \cdot \frac{W_1}{W_2}; \quad (3.56)$$

$$Z_{B2} = \frac{U_{B2}^2}{S_{B2}} = Z_{B1} \cdot \left(\frac{W_2}{W_1} \right)^2; \quad Y_{B2} = \frac{S_{B2}}{U_{B2}^2} = Y_{B1} \cdot \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2. \quad (3.57)$$

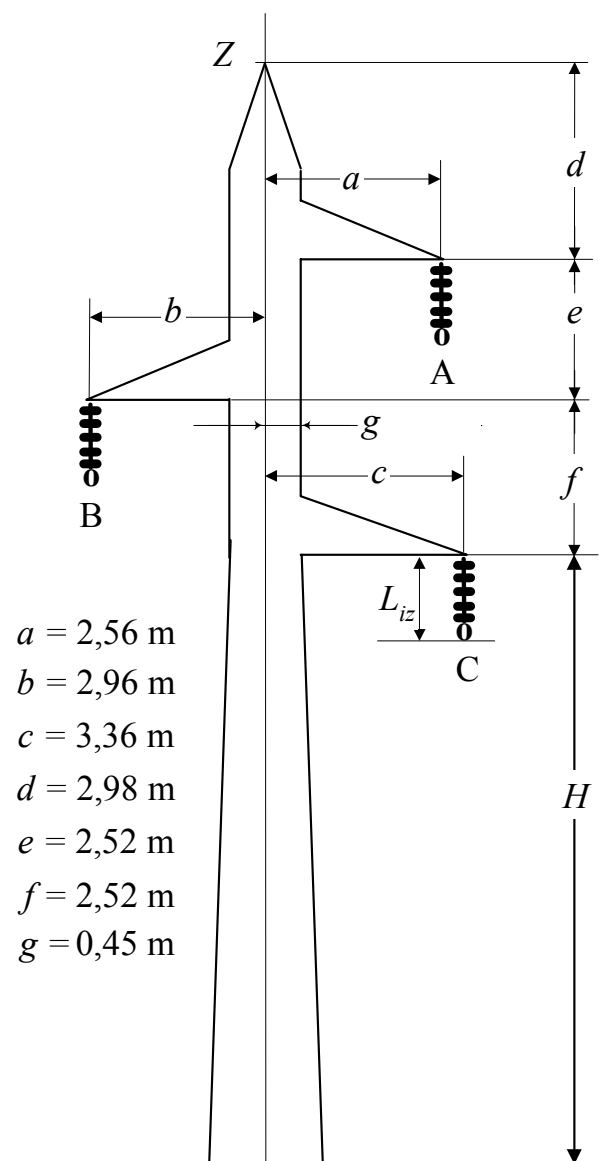
По определувањето на базните величини вршиме изразување на сите електрични величини во единични вредности:

$$\underline{U}_{1pu} = \frac{U_1}{U_{B1}}; \quad \underline{I}_{1pu} = \frac{I_1}{I_{B1}}; \quad \underline{Z}_{1pu} = \frac{Z_1}{Z_{B1}}; \quad \underline{Y}_{1pu} = \frac{Y_1}{Y_{B1}}; \quad (3.58)$$

$$\underline{U}_{2pu} = \frac{U_2}{U_{B2}}; \quad \underline{I}_{2pu} = \frac{I_2}{I_{B2}}; \quad \underline{Z}_{2pu} = \frac{Z_2}{Z_{B2}}; \quad \underline{Y}_{2pu} = \frac{Y_2}{Y_{B2}}. \quad (3.59)$$

3.10. ПРИМЕРИ

Пример 3.1. На сликата е прикажана главата од носечкиот столб тип М4, производ на "Енергоинвест" – Сараево, наменет за изведба на 110 kV надземни водови. Со помош на овие столбови е изведен надземен вод долг $l = 50$ km, при што се употребени спроводници од типот Al/Ѓ 240/40 mm², затегнати со максимално работно напрегање $\sigma_M = 8$ daN/mm². Да се пресметаат подолжните параметри на водот r , x и b . Колкава е природната моќност на водот P_N , изразена во MW и во % од граничната, термичка, моќност на водот S_T .



Решение:

Ќе го пресметаме најнапред средно-геометриското растојание помеѓу фазните спроводници D_m . Според релацијата (3.5) имаме:

$$D_m = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{AC} \cdot D_{BC}} \quad (1)$$

што значи дека за таа цел најнапред ќе треба да ги пресметаме меѓусебните растојанија помеѓу секој пар спроводници. На тој начин добиваме:

$$D_{AB} = \sqrt{(a+b)^2 + e^2} = \sqrt{(2,56 + 2,96)^2 + 2,52^2} = 6,068 \text{ m},$$

$$D_{AC} = \sqrt{(c-a)^2 + (e+f)^2} = \sqrt{(3,36 - 2,56)^2 + (2,52 + 2,52)^2} = 5,1 \text{ m}$$

$$D_{BC} = \sqrt{(b+c)^2 + f^2} = \sqrt{(2,96 + 3,36)^2 + 2,52^2} = 6,804 \text{ m}.$$

Понатаму имаме:

$$D_m = \sqrt[3]{6,068 \cdot 5,1 \cdot 6,804} = 5,95 \text{ m}.$$

За изведба на разгледуваниот надземен вод (далновод) се применети стандардни алучел јажиња од типот Al/Ѓ 240/40 mm², според стандардот MKS.N.C1.351. За овие јажиња од табелата П.2, дадена во прилогот на збирката задачи (или **табела 2.5 на стр. 30 од учебникот**) отчитуваме:

- вистински пресек на јажето $A_{Al}/A_{Fe} = 243,0/39,5 \text{ mm}^2$,
- надворешен пречник на јажето: $d_p = 2r_p = 21,9 \text{ mm}$;
- активна отпорност при 20°C $r_{20} = 0,119 \text{ } \Omega/\text{km}$,
- трајна дозволена струја $I_d = 530 \text{ A}$.

Сопственото средно-геометриско растојание D_s на спроводниците од далекуводот, според (3.8), ќе биде:

$$D_s = 0,81 \cdot r_p = 0,81 \cdot (21,9/2) = 8,87 \text{ mm} \equiv 8,87 \cdot 10^{-3} \text{ m}.$$

Подолжната индуктивна опторност x на водот, според (3.6) ќе биде:

$$x = 0,1445 \cdot \log \frac{D_m}{D_s} = 0,1445 \cdot \log \frac{5950}{8,87} = 0,408 \frac{\Omega}{\text{km}}.$$

Слично, со помош на релацијата (3.17), ја пресметуваме и **подолжната капацитивна спроводност** (подолжна сусцептанса) на водот b :

$$b = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log(D_m/r_p)} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log(5950/10,95)} = 2,771 \cdot 10^{-6} \text{ S/km}.$$

Подолжната активна отпорност на водот за наизменична струја r на работна температура се разликува од вредноста r_{20} , отчитана од табелата 2.5, која се однесува на еднонасочна струја и на температурата од 20°C. Нејзината вредност ќе ја добиеме приближно користејќи го следниот израз:

$$r = \frac{1000}{\kappa \cdot A} = \frac{1000}{32 \cdot A} = \frac{31,25}{A} = \frac{31,25}{243,0} = 0,129 \frac{\Omega}{\text{km}}.$$

Граничната термичка моќност (привидна) на водот S_t се добива кога низ водот тече **трајната дозволена струја** I_d . Под претпоставката дека е $U = U_n$, за моќноста S_t ќе добиеме:

$$S_t = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_d = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_d = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 0,530 = 101 \text{ MVA}.$$

За да ја пресметаме **природната моќност** P_N на водот најпрво, со помош на релацијата (3.22), ќе ја пресметаме неговата **погонска бранова импеданција** Z_V :

$$Z_V = \sqrt{\frac{x}{b}} = \sqrt{\frac{0,408}{2,771 \cdot 10^{-6}}} = 383,72 \Omega.$$

Природната моќност на водот P_N се дефинира како моќност што му се предава на чисто активен потрошувач, приклучен на крајот од водот, чија што отпорност (импеданција) е еднаква на погонската бранова импеданција на водот Z_V . Под претпоставката дека напонот на крајот од водот е $U_2 = U_n$, за природната моќност P_N ќе добиеме:

$$P_N = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_N = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_V} = \frac{U_n^2}{Z_V} = \frac{110^2}{383,72} = 31,533 \text{ MW}.$$

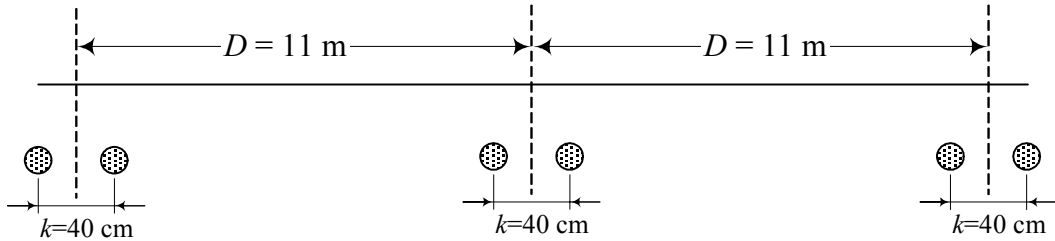
Изразена во % од термичката моќност на водот, за природната моќност на водот добиваме:

$$P_N \% = \frac{P_N}{S_t} \cdot 100 = \frac{31,533}{101} \cdot 100 = 31,22 \ \%.$$

Значи ако сакаме водот да работи во **режим на природна моќност** (а подоцна ќе видиме дека таквиот режим е најповолен од аспект на загубите на напон и загубите на моќност во преносот), тогаш водот треба да го оптовариме со моќност која е **приближно за три пати помала** од неговата термична пропусна моќ.

□ □ □

Пример 3.2. Да се пресметаат погонските параметри r , x и b на 380 kV далновод изведен со спроводници во сноп 2хAl/Ѓ 490/65 mm² според MKS.N.C1.351. Распоредот на фазните снопови спроводници на главата од столбот е прикажан на сл. 1.



Слика 1. Распоред на спроводниците на главата од столбот.

Решение:

Од табелата 2.5 за наведените алучел-јажиња отчитуваме:

- вистински пресек на јагето $A_{Al}/A_{Fe} = 490,3/63,6 \text{ mm}^2$,
- надворешен пречник на јагето: $d_p = 2r_p = 30,6 \text{ mm}$;
- активна отпорност при 20°C $r_{20} = 0,059 \Omega/\text{km}$,
- трајна дозволена струја $I_d = 840 \text{ A}$.

Средно-геометриското растојание на фазните спроводници во овој случај ќе биде:

$$D_m = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{AC} \cdot D_{BC}} = \sqrt[3]{D \cdot (2D) \cdot D} = D \cdot \sqrt[3]{2} = 1,26 \cdot D = 13,86 \text{ m}.$$

За случајов со $n = 2$ спроводника во сноп, сопственото средно-геометриското растојание на спроводниците во снопот, според (3.10), ќе биде:

$$D_s = \sqrt{r_p \cdot k} = \sqrt{15,3 \cdot 10^{-3} \cdot 40 \cdot 10^{-2}} = 78,23 \cdot 10^{-3} \text{ m}.$$

Понатаму имаме (приближно):

$$x = 0,1445 \cdot \log \frac{D_m}{D_s} + \frac{0,0157}{n} = 0,333 \frac{\Omega}{\text{km}},$$

$$b = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log \frac{D_m}{D_s}} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log(13,86 \cdot 10^3 / 78,23)} = 3,371 \cdot 10^{-6} \frac{\text{S}}{\text{km}}.$$

$$r = \frac{31,25}{n \cdot A} = \frac{31,25}{2 \cdot 490,3} = 0,032 \frac{\Omega}{\text{km}},$$

$$Z_V = \sqrt{\frac{x}{b}} = \sqrt{\frac{0,333}{3,371 \cdot 10^{-6}}} = 313,34 \Omega; \quad P_N = \frac{380^2}{313,34} = 460,84 \text{ MW}.$$

□ □ □

Пример 3.3. Три едножилни кабли од типот ХНР 48 А 1×150/25 12/20 kV формираат трифазен кабелски вод. Жилите се положени во триаголен распоред на длабочина $h = 70$ cm во земја со специфична топлинска отпорност $\rho = 100$ °C cm/W и амбиентна температура $\theta_a = 20$ °C.

Кабелот треба да напојува дистрибутивен конзум чија врвна моќност изнесува $P_M = 8$ MW при $U = U_n = 20$ kV и $\cos \varphi = 0,9$. Да се утврди:

- а) дали ќе биде кабелот термички преоптоварен;
- б) дали би бил кабелот термички преоптоварен доколку на дел од кабелската траса земјиштето има специфичен топлински отпор $\rho = 300$ °C cm/W;
- в) дали би бил кабелот термички преоптоварен за случајот опишан под б) но во зимски услови, кога амбиентната температура е $\theta_a = 10$ °C.

Решение:

Погонската (работна) струја на потрошувачот I_P ќе биде:

$$I_P = \frac{S_P}{\sqrt{3} \cdot U_P} = \frac{P_P}{\sqrt{3} \cdot U_P \cdot \cos \varphi_P} = \frac{8000}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 0,9} = 256,7 \text{ A.}$$

Од табелата П.8. (во прилогот на збирката задачи) (20 kV кабли, едножилни, со триаголен распоред, со изолација вмрежен полиетилен, закопани во земја, спроводници од алуминиум) за овој кабел ја отчитуваме табличната (номиналната) вредност на трајното дозволено струјно оптоварување на кабелот (ТДСО) за номинални услови на полагање I_{dT} : $I_{dT} = 345$ A.

Бидејќи кабелот е положен токму во такви услови, неговото ТДСО I_d ќе биде:

$$I_{dT} = 345 \text{ A}; \quad I_d = I_{dT} = 345 \text{ A.}$$

$$S_t = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_d = \sqrt{3} \cdot 20 \cdot 0,345 = 11,951 \text{ MVA.}$$

- а) Бидејќи е $I_d > I_P$ следува дека кабелот нема да биде термички преоптоварен.
- б) Кога е $\rho = 300$ °C·cm/W условите за ладење ќе бидат влошени, па вредноста на ТДСО ќе се добие со корекција на табличната вредност I_{dT} , на следниот начин:

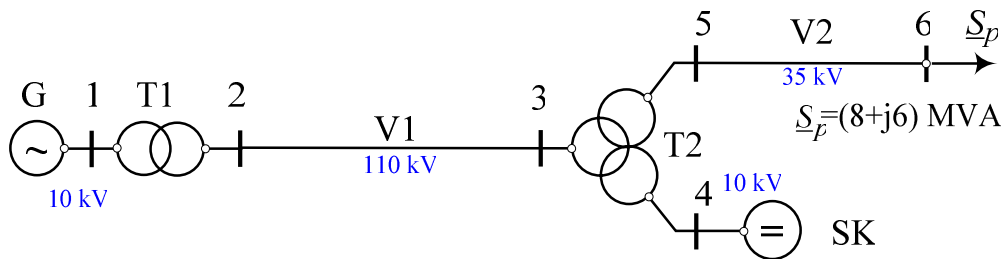
$$I_d = k_p \cdot I_{dT} = 0,6048 \cdot 345 = 208,7 \text{ A. Но сега е } I_p > I_d.$$

в) Кога е $\rho = 300 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$ и амбиентната температура $\theta_a = 10^\circ\text{C}$, условите за ладење ќе бидат различни од номиналните. Сега ТДСО на кабелот ќе биде:

$$I_d = k_p \cdot k_\theta \cdot I_{dT} = 0,6048 \cdot 1,07 \cdot 345 = 223,2 \text{ A. Повторно е } I_p > I_d.$$

□ □ □

Задача 3.4: Да се нацрта еднофазната заменска шема на прикажаниот електроенергетски систем (ЕЕС) и да се пресметаат нејзините параметри, сведени на 110 kV напонско ниво.



Податоци за елементите од системот:

Генератор G: $S_n = 31,5 \text{ MVA}$; $U_n = 10,5 \text{ kV}$; $x_d = 150 \%$

Трансформатор T1: 10,5/115 kV; $S_n = 31,5 \text{ MVA}$; $u_k\% = 10\%$;
 $\Delta P_{Cun} = 200 \text{ kW}$; $\Delta P_{Fe} = 45 \text{ kW}$; $i_0\% = 0,6\%$

Трансформатор T2: 110/36,75/10,5 kV 40/40/10 MVA;

$u_{k12} = 10\%$; $u_{k13} = 17\%$; $u_{k23} = 6\%$;
 $\Delta P_{Cu12} = 858 \text{ kW}$; $\Delta P_{Cu13} = 96 \text{ kW}$; $\Delta P_{Cu23} = 82,7 \text{ kW}$;

$\Delta P_{Fe} = 80 \text{ kW}$; $\Delta Q_\mu = 860 \text{ kvar}$.

Надземен 110 kV вод V1: $l = 20 \text{ km}$; $\underline{z} = (0,1 + j0,4) \Omega/\text{km}$;

$\underline{y} = (0,1 + j2,7) \mu\text{S}/\text{km}$

Надземен 35 kV вод V2: $l = 15 \text{ km}$; $\underline{z} = (0,25 + j0,35) \Omega/\text{km}$;

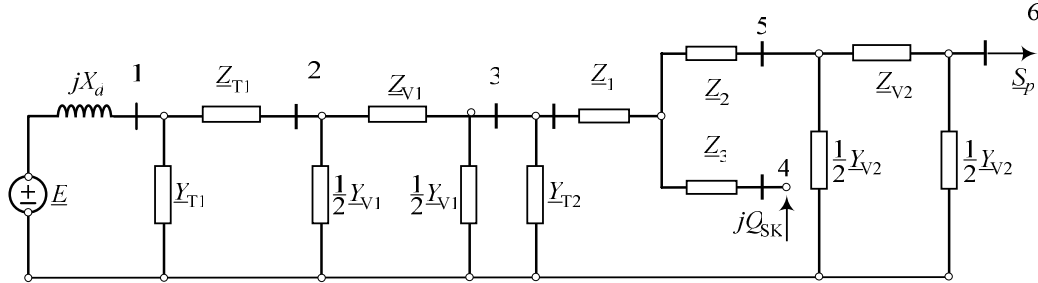
$\underline{y} = j3,13 \mu\text{S}/\text{km}$

Синхрон компензатор SK: $Q_{SK} = 10 \text{ Mvar}$; $U_n = 10,5 \text{ kV}$.

Трансформаторот T1 работи со актуелен преносен однос $k_{T1} = 10,5/110 \text{ kV/kV}$, додека трансформаторот T2 работи со својот номинален преносен однос: 110/36,75/10,5 kV/kV/kV.

Решение:

На сликата е прикажана еквивалентната монофазна (еднополна) заменска шема на дадениот ЕЕС. Во неа секој елемент е претставен со соодветната заменска шема.



Параметарот X_d од заменската шема на генераторот G го добиваме слично како реактанциите кај енергетските трансформатори:

$$X_d = \frac{x_d \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{150}{100} \cdot \frac{10,5^2}{31,5} = 5,25 \, \Omega.$$

Внатрешната емс E на генераторот не можеме да ја пресметаме бидејќи не ни се познати параметрите на режимот во кој работи прикажаниот систем.

Параметрите на останатите елементи од ЕЕС ги пресметуваме според познатите релации, на начин како во претходите примери. Параметрите на трансформаторите T1 и T2 ќе ги сведуваме на високонапонската, 110 kV, страна. На тој начин добиваме:

Трансформатор T1:

$$\underline{Z}_{T1} = R_{T1} + jX_{T1} = (2,666 + j41,90) \, \Omega;$$

$$\underline{Y}_{T1} = G_{T1} + jB_{T1} = (3,4 - j13,88) \, \mu S$$

Вод V1:

$$\underline{Z}_{V1} = z_{V1} \cdot l_1 = (0,1 + j0,4) \cdot 20 = (2 + j8) \, \Omega;$$

$$\underline{Y}_{V1} = y_{V1} \cdot l_1 = (0,1 + j2,7) \cdot 20 = (2 + j54) \, \mu S$$

Трансформатор T2:

$$\underline{Y}_{T2} = G_{T2} + jB_{T2} = (6,61 - j71,07) \, \mu S;$$

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1 = (4,05 + j81,67) \, \Omega;$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2 = (2,43 - j51,42) \, \Omega;$$

$$\underline{Z}_3 = R_3 + jX_3 = (7,57 + j24,02) \, \Omega.$$

Вод V2:

$$\underline{Z}_{V2} = \underline{z}_{V2} \cdot l_2 = (0,25 + j0,35) \cdot 15 = (3,75 + j5,25) \, \Omega;$$

$$\underline{Y}_{V2} = \underline{y}_{V2} \cdot l_2 = j3,13 \cdot 15 = j46,95 \, \mu S$$

На тој начин ние ги пресметавме вистинските, т.е. **природните, параметри** на одделните елементи. Бидејќи се работи за мрежа со еден или повеќе трансформатори, потребно ќе биде да извршиме сведување на овие параметри на едно исто напонско ниво. Во нашиов случај ние ќе сведуваме на 110 kV ниво. Инаку, **во принцип, сведување се врши на она напонско ниво кое опфаќа најмногу елементи од системот** бидејќи на тој начин се минимизира потребниот број пресметковни операции сврзани со сведувањето.

Во мрежите што содржат трансформатори, покрај сведувањето на импеданциите од елементите на шемата, потребно е да се врши сведување и на сите напони и струи. Сведувањето на одделните напони, струи, импеданции и адмитанции ($\underline{U}$, $\underline{I}$, $\underline{Z}$ и $\underline{Y}$) ќе го објасниме на прикажаниот пример.

Нека со $k_T = W_2/W_1$ го означиме односот на актуелниот број на навивките на трансформаторот преку кој преминуваме при сведувањето, при што со "2" е означена онаа намотка на чија што страна сведуваме. Доколку актуелната вредност k_T на трансформаторот не ни е позната, ќе претпоставиме дека трансформаторот работи со својот номинален преносен однос, т.е. $k_T = k_{Tn}$. Понатаму, сведувањето се врши на следниот начин:

1. Сведување на импеданција $\underline{Z}$: $\underline{Z}_{sv} = \underline{Z} \cdot k^2 = \underline{Z} \cdot (W_2/W_1)^2$
2. Сведување на адмитанција $\underline{Y}$: $\underline{Y}_{sv} = \underline{Y} / k^2 = \underline{Y} \cdot (W_1/W_2)^2$
3. Сведување на напон $\underline{U}$: $\underline{U}_{sv} = \underline{U} \cdot k = \underline{U} \cdot (W_2/W_1)$
4. Сведување на струја $\underline{I}$: $\underline{I}_{sv} = \underline{I} / k = \underline{I} \cdot (W_1/W_2)$
5. Сведување на моќност $\underline{S}$:

$$\underline{S}_{sv} = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_{sv} \cdot \underline{I}_{sv}^* = \sqrt{3} \cdot \underline{U} \cdot k \cdot (\underline{I} / k)^* = \sqrt{3} \cdot \underline{U} \cdot \underline{I}^* = \underline{S}.$$

Сега, знаејќи ги правилата на сведување, можеме да извршиме сведување на параметрите од елементите во нашиот случај. Притоа ќе водиме сметка за вредностите на актуелните преносни односи на енергетските трансформатори во системот. Доколку нивните актуелни вредности k_T не ни се

познати, ќе претпоставиме дека тие трансформатори работат со својот номинален преносен однос, т.е. $k_T = k_{Tn}$.

Сведувањето ќе го започнеме со првиот елемент на мрежата – генераторот G. Бидејќи во задачата е специфициран актуелниот преносен однос на трансформаторот T1, односно дека е $k_{T1} = 110/10,5 = 0,957 \cdot k_{T1n} = 10,4762$, ќе добиеме:

Генератор G:

$$X_{d.sv} = X_d \cdot k_{T1}^2 = 5,25 \cdot 10,4762^2 = 576,19 \, \Omega.$$

Трансформатор T1:

Бидејќи параметрите Z_{T1} и Y_{T1} на трансформаторот ги пресметавме со $U_n = 115 \, \text{kV}$, со тоа ние автоматски ги сведовме на високонапонската страна, така што сегаведувањето не е потребно.

Вод V1:

Бидејќи водот V1 се наоѓа на страната на која што сведуваме и неговите параметри не треба да се сведуваат.

Трансформатор T2:

Слично како и со трансформаторот T1, параметрите на овој трансформатор се веќе сведени на високонапонската страна ($U_n = 110 \, \text{kV}$).

Вод V2:

Сведувањето на водот V2 ќе го вршиме со коефициентот на трансформација на трансформаторот T2 на релација примар – секундар $k_T = W_{1n}/W_{2n} = 110/36,75 = 2,9932$. На тој начин за сведените вредности на параметрите Z_{V2} и Y_{V2} од водот V2 ќе добиеме:

$$\begin{aligned} Z_{V2.sv} &= Z_{V2} \cdot (110/36,75)^2 = (3,75 + j5,25) \cdot 2,9932^2 = \\ &= (33,597 + j47,036) \, \Omega; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_{V2.sv} &= Y_{V2} \cdot (36,75/110)^2 = j46,95 \cdot 10^{-6} / 2,9932^2 = \\ &= j5,24 \cdot 10^{-6} \, \text{S} = j5,24 \, \mu\text{S}. \end{aligned}$$

□ □ □

Пример 3.5: Да се одредат параметрите на елементите од мрежата прикажани во претходната задача, изразени во единични (pu) вредности. За базни големини да се усвојат:

$$S_B = 50 \text{ MVA}; \quad U_B = 110 \text{ kV}.$$

Решение:

Прикажаната мрежа има четири различни напонски нивоа, што ќе ги означиме со броевите 1, 2, 3 и 4. Со ниво бр. 1 ќе го означиме 110 kV напонско ниво а со ниво бр. 2 ќе го означиме 35 kV напонско ниво во мрежата. Понатаму со ниво бр. 3 ќе го означиме 10 kV напонско ниво при синхрониот генератор G и конечно, со ниво бр. 4 ќе го означиме 10 kV напонско ниво при синхрониот компензатор SK.

Притоа, за 110 kV напонско ниво ќе имаме:

1. 110 kV напонско ниво

$$S_{B1} = S_B = 50 \text{ MVA}; \quad U_{B1} = U_B = 110 \text{ kV};$$

$$I_{B1} = \frac{S_{B1}}{\sqrt{3} \cdot U_{B1}} = 0,262 \text{ kA};$$

$$Z_{B1} = \frac{U_{B1}^2}{S_{B1}} = 242 \, \Omega; \quad Y_{B1} = \frac{1}{Z_{B1}} = 4,13 \text{ mS}.$$

2. 35 kV напонско ниво

За 35 kV ниво (ниво бр. 2), каде што се наоѓа водот V2, поради трансформацијата $k_2 = k_{T2} = 110/36,75 \text{ kV/kV} = 2,9932$ при трансформаторот T2, ќе имаме нови базни големини. Новите базни големини ги пресметуваме на следниот начин:

$$k_2 = 36,75/110 = 0,33409;$$

$$S_{B2} = S_{B1} = 50 \text{ MVA};$$

$$U_{B2} = U_{B1} \cdot k_2 = 110 \cdot 0,33409 = 36,75 \text{ kV};$$

$$I_{B2} = \frac{S_{B2}}{\sqrt{3} \cdot U_{B2}} = \frac{50}{\sqrt{3} \cdot 36,75} = 0,7855 \text{ kA}.$$

Но базната струја I_{B2} може да се пресмета и вака:

$$I_{B2} = \frac{I_{B1}}{k_2} = \frac{0,262}{0,33409} = 0,784 \text{ kA}.$$

Понатаму имаме:

$$Z_{B2} = \frac{U_{B2}^2}{S_{B2}} = 27,011 \, \Omega. \text{ Но исто така е:}$$

$$Z_{B2} = Z_{B1} \cdot k_2^2 = 242 \cdot 0,33409^2 = 27,011 \, \Omega.$$

$$Y_{B2} = \frac{1}{Z_{B2}} = 37,022 \, \text{mS}.$$

3. 10 kV напонско ниво кај генераторот G

Базните големина за 10 kV напонско ниво, при генераторот G, сега ќе бидат:

$$k_3 = k_{T1} = (W_1 / W_2)_{T1} = 10,5 / 110 = 0,09545; S_{B3} = S_B = 50 \, \text{MVA};$$

$$U_{B3} = U_{B1} \cdot k_3 = 110 \cdot 0,09545 = 10,5 \, \text{kV};$$

$$I_{B3} = I_{B1} / k = 0,262 / 0,09545 = 2,775 \, \text{kA};$$

$$Z_{B3} = Z_{B1} \cdot k_3^2 = 242 \cdot 0,09545^2 = 2,205 \, \Omega;$$

$$Y_{B3} = 1 / Z_{B3} = 1 / 2,205 = 0,45352 \, \text{S}.$$

4. 10 kV напонско ниво кај синхронниот компензатор SK

За 10 kV напонско ниво при синхронниот компензатор, базните големина ќе бидат:

$$k_4 = k_{T2} = (W_{3n} / W_{1n})_{T2} = 10,5 / 110 = 0,09545; S_{B3} = S_B = 50 \, \text{MVA};$$

$$U_{B3} = U_{B1} \cdot k_4 = 110 \cdot 0,09545 = 10,5 \, \text{kV};$$

$$I_{B3} = I_{B1} / k_4 = 0,262 / 0,09545 = 2,775 \, \text{kA};$$

$$Z_{B3} = Z_{B1} \cdot k_4^2 = 242 \cdot 0,09545^2 = 2,205 \, \Omega;$$

$$Y_{B3} = 1 / Z_{B3} = 1 / 2,205 = 0,45352 \, \text{S}.$$

Откога ги пресметавме соодветните базни величини за секое напонско ниво, преминуваме кон втората фаза од задачата а тоа е пресметување на единичните (pu) величини.

Ако со $\underline{X}$ ја означиме физичката, во општ случај комплексна, големина (напон, струја, моќност, импеданција или адмитанција), а со X_B нејзината базна вредност (која што секогаш е реална вредност), тогаш единичната (pu) големина на X ќе ја бележиме со X_{pu} и таа ќе биде:

$$X_{pu} = \frac{X}{X_B}.$$

Единиичната големина X_{pu} , во општ случај претставува комплексен број и има димензија (pu) (*per unit*), односно се изразува во релативни единици.

Сега, на ваков начин лесно ќе ги пресметаме ги параметрите (односно единиичните параметри) во заменската шема на прикажаната мрежа:

$$X_{Gpu} = X_G / Z_{B3} = 5,25 / 2,205 = 2,38095 \text{ pu}.$$

Понатаму, за трансформаторот T1, чии што параметри Z_{T1} и Y_{T1} се сведени на 110 kV ниво, ќе имаме:

$$Z_{T1pu} = Z_{T1} / Z_{B1} = (2,66 + j41,98) / 242 = (10,992 + j173,471) \cdot 10^{-3} \text{ pu};$$

$$Y_{T1pu} = Y_{T1} / Y_{B1} = \frac{Y_{T1}}{Y_{B1}} = \frac{4,91 - j47,64) \cdot 10^{-6}}{4,130^{-3}} = (1,189 - j11,535) \cdot 10^{-3} \text{ pu}.$$

За водот V1, чии што параметри се, исто така, на 110 kV ниво, ќе имаме:

$$Z_{V1pu} = Z_{V1} / Z_{B1} = (2 + j8) / 242 = (8,264 + j33,05) \cdot 10^{-3} \text{ pu};$$

$$Y_{V1pu} = Y_{V1} / Y_{B1} = (2 + j54) \cdot 10^{-6} \cdot 242 = (0,484 + j13,075) \cdot 10^{-3} \text{ pu}$$

На сличен начин ги добиваме вредностите на параметрите од останатите елементи на мрежата:

$$Z_{V2pu} = (0,153 + j0,2143) \text{ pu}; \quad Y_{V2pu} = j1,1503 \cdot 10^{-3} \text{ pu};$$

$$Y_{T1pu} = (1,602 - j17,199) \cdot 10^{-3} \text{ pu}; \quad Z_{1pu} = (0,017 + j0,337) \text{ pu}$$

$$Z_{2pu} = (0,010 - j0,212) \text{ pu}; \quad Z_{3pu} = (0,031 + j0,041) \text{ pu}$$

Моќноста на потрошувачот $\underline{S}$ и моќноста Q_{SK} што синхронизираниот компензатор ја произведува, изразени во релативни единици, ќе бидат:

$$\underline{S}_{pu} = \frac{\underline{S}}{S_B} = \frac{8 + j6}{50} = (0,16 + j0,12) \text{ pu};$$

$$Q_{SKpu} = \frac{Q_{Sk}}{S_B} = \frac{10}{50} = 0,2 \text{ pu}.$$

□ □ □