

УНИВЕРЗИТЕТ "СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ" - СКОПЈЕ
Е Л Е К Т Р О Т Е Х Н И Ч К И Ф А К У Л Т Е Т
Институт за Преносни електроенергетски системи

Р. АЧКОВСКИ
М. ТОДОРОВСКИ

ЗБИРКА ЗАДАЧИ ПО ПРЕДМЕТОТ
"ПРЕНОСНИ И ДИСТРИБУТИВНИ СИСТЕМИ"



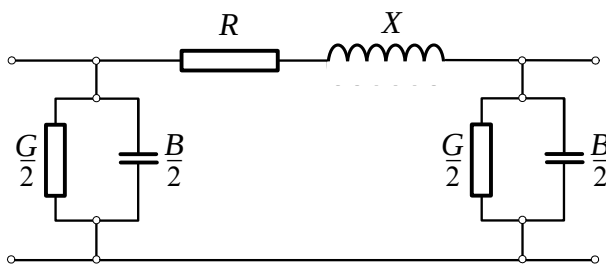
Скопје, март 2006 г.

1 ЗАМЕНСКИ ШЕМИ И ПАРАМЕТРИ НА ЕЛЕМЕНТИТЕ НА ЕЛЕКТРИЧНИТЕ МРЕЖИ

1.1 ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИ ВОДОВИ

Водовите се елементи со распределени параметри. Тие се напълно дефинирани со својата должина l (km) и со своите подолжни (единечни) параметри, а тоа се:

- r (Ω/km , фаза) подолжна активна отпорност;
- x (Ω/km , фаза) подолжна индуктивна отпорност;
- g (Ω/km , фаза) подолжна активна спроводност (подолжна кондуктанса);
- b (Ω/km , фаза) подолжна капацитивна спроводност (подолжна сусцептанса).



Слика 1.1. π - заменска шема на вод

Заменската шема на водот е најчесто еден π -четворокрајник, како што е тоа прикажано на сликата 1.1. Со оваа шема се претставуваат електроенергетските водови при анализите на стационарните и симетрични режими во електричните мрежи.

За надземни водови со должина до 250 km и за кабли со должина до 50 km, концентрираните параметри R , X , G и B во заменската шема се пресметуваат едноставно со помош на следните изрази:

$$R = r \cdot l; \quad X = x \cdot l; \quad G = g \cdot l; \quad B = b \cdot l \quad (1.1)$$

За водови, подолги од наведените, соодветните заменски шеми претставуваат низа од четворополи, или пак доколку сакаме да ги претставиме само со еден четворопол, неговите параметри ќе треба да бидат корегирани со помош на соодветните корекциони фактори k_r , k_x и k_b , како што следи:

$$\begin{aligned} k_r &= 1 - \frac{x \cdot b \cdot l^2}{3}; & R &= k_r \cdot r \cdot l \\ k_x &= 1 - \frac{x \cdot b \cdot l^2}{6} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{x^2}\right) \approx 1 - \frac{x \cdot b \cdot l^2}{6}; & X &= k_x \cdot x \cdot l \\ k_b &= 1 + \frac{x \cdot b \cdot l^2}{12}; & B &= k_b \cdot b \cdot l \\ G &= g \cdot l. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Корекционите фактори k_r , k_x и k_b се познати под името "кенелиеви (Kennelly) коефициенти".

1.1.1 Надземни водови

Подолжните параметри на надземните водови r , x , g и b се пресметуваат преку следните изрази:

$$r = \frac{1000}{\kappa \cdot A} \frac{\Omega}{\text{km}}. \quad (1.3)$$

Во изразот (1.3) со A е означен вистинскиот пресек на спроводникот (а не неговиот номинален пресек), изразен во mm^2 . Кај комбинираниот $\text{Al}/\check{\text{C}}$ јажиња под A се подразбира само пресекот на алуминиумовиот дел бидејќи практично сета струја тече низ него.

Величината $\kappa (\text{S}\cdot\text{m}/\text{mm}^2)$ која исто така фигурира во (1.3) е специфичната спроводност на материјалот од кој се направени спроводниците.

За спроводници изработени од чист алуминиум (Al) или бакар (Cu), специфичната спроводност за еднонасочна струја и при температура од 20°C ќе биде: $\kappa_{\text{Al}}=34,8 (\text{S}\cdot\text{m}/\text{mm}^2)$ и $\kappa_{\text{Cu}}=56 (\text{S}\cdot\text{m}/\text{mm}^2)$. Меѓутоа, активната отпорност на водот е секогаш поголема од отпорноста за еднонасочна струја заради скин-ефектот, ефектот на близина (особено кај каблите), ефектот на појажување, присуството на примесите на останати метали во спроводниците и др. Притоа поради појажувањето на спроводниците патот на струјата е за 1 до 2% подолг од физичката должина на јажето додека зголемената температура на спроводниците, која заради цуловите загуби е секогаш повисока за десетина па и повеќе степени во однос на амбиентната температура, доведува до зголемување на активната отпорност за околу 0,4% за секој степен над референтната температура од 20°C ($\alpha_{\text{Cu}} \approx \alpha_{\text{Al}} \approx 0,004 \text{ } 1/^\circ\text{C}$). Затоа при пресметувањето на подолжната активна отпорност r , најчесто усвојуваме $\kappa_{\text{Al}}=32 \text{ S}\cdot\text{m}/\text{mm}^2$ (за спроводници и јажиња од Al односно $\text{Al}/\check{\text{C}}$) и $\kappa_{\text{Cu}}=54 \text{ S}\cdot\text{m}/\text{mm}^2$ (за спроводници од бакар).

Според тоа, за приближна пресметка на подолжната активна отпорност на хомогени Al -јажиња или пак комбинирани $\text{Al}/\check{\text{C}}$ јажиња во работни услови, може да се користи следната формула:

$$r = \frac{1000}{32 \cdot A} = \frac{31,25}{A} \frac{\Omega}{\text{km, фаза}}, \quad (1.4a)$$

додека за спроводници од бакар (Cu) формулата:

$$r = \frac{1000}{54 \cdot A} = \frac{18,52}{A} \frac{\Omega}{\text{km, фаза}}. \quad (1.4b)$$

Погонската индуктивна отпорност x кај водовите се пресметува со изразот:

$$x = 0,1445 \cdot \log \frac{D_m}{D_s} \frac{\Omega}{\text{km, фаза}} \quad (1.5)$$

каде што D_m е т.н. *средно-геометриско растојание* помеѓу фазните спроводници. Ова растојание се пресметува со формулата:

$$D_m = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{AC} \cdot D_{BC}}, \quad (1.6)$$

Величината D_s што фигурира во релацијата (1.4) е т.н. *сопственено средно-геометриско растојание* (или еквивалентен полупречник) на спроводникот, Тоа зависи од неговиот вистински (геометриски) полупречник ($r_p = d_p/2$) и од неговата изведба. За масивни спроводници и за хомогени Al и Cu јажиња, имаме:

$$D_s = e^{-0,25} \cdot r_p = 0,7788 \cdot r_p, \quad (1.7)$$

додека за комбинирани $\text{Al}/\check{\text{C}}$ јажиња тоа е секогаш нешто поголемо. Така, на пример, за $\text{Al}/\check{\text{C}}$ јажиња со однос на пресеците $\varepsilon = 6:1$, којшто се среќава најчесто во нашите мрежи кај надземните водови, сопственото средно-геометриско растојание приближно изнесува:

$$D_s = r'_p = 0,81 \cdot r_p. \quad (1.8)$$

Кај водовите со спроводници во сноп (повеќе спроводници по фаза) сопственото средно-геометриско растојание на снопот се пресметува со формулата:

$$D_s = \sqrt[n]{r_p \cdot \prod_{i=2}^n a_{li}} = \sqrt[n]{r_p \cdot a_{12} \cdot a_{13} \cdot \dots \cdot a_{1n}} \quad (1.9)$$

Во неа со n е означен бројот на спроводниците во снопот, а со a_{li} растојанието помеѓу првиот и i -тиот спроводник во снопот. Во случајот кога соседните спроводници во снопот се

разместени во темињата на рамностран n -тоаголник така што секои два соседни спроводника се меѓусебе подеднакво оддалечени, на растојание a , од формулата (1.9) следува:

$$D_s = \sqrt[n]{r_p \cdot a} \text{ за } n = 2 \text{ спроводника по фаза;}$$

$$D_s = \sqrt[3]{r_p \cdot a^2} \text{ за } n = 3 \text{ спроводници по фаза;}$$

$$D_s = \sqrt[4]{\sqrt{2} \cdot r_p \cdot a^3} \text{ за } n = 4 \text{ спроводници по фаза.}$$

Во овој случај (надземен вод со спроводници во сноп), подолжната индуктивна отпорност на водот x ќе се пресметува по формулата:

$$x = 0,1445 \cdot \log \frac{D_m}{D_s} + \frac{0,0157}{n} \frac{\Omega}{\text{km, фаза}}. \quad (1.10)$$

Подолжната реактанција x на водовите е прилично константна и слабо зависи од пресекот на спроводниците. За надземни водови, таа најчесто се движи во границите:

$$x = 0,33 - 0,42 (\Omega / \text{km, фаза}),$$

а кај каблите:

$$x = 0,06 - 0,12 (\Omega / \text{km, фаза}).$$

Подолжната активна одводност g кај водовите не е константна величина и таа зависи на сложен начин од погонскиот напон U , од процентот на влага и нечистотии во воздухот, од рапавоста на површината од спроводниците и др. (ефект на корона). Кај нисконапонските (НН), среднонапонските (СН) и високонапонските (ВН) водови, со номинален напон до 110 kV вклучително, загубите поради короната се незначителни, се разбира доколку дијаметарот на спроводниците не е сосема мал. Затоа за нив, најчесто ги занемаруваме овие загуби, т.е. земаме $g = 0$.

Кај водовите со највисок напон (кај нас 380 kV) загубите поради корона се исто така занемарливи (само неколку kW/km) во услови на убаво време. Но при лошо време тие можат да бидат и поголеми од цуловите загуби во проводниците, па нив не смееме да ги занемаруваме. Во таквите случаи, кога станува збор за лошо и влажно време, пропратено со интензивна корона, при пресметките најчесто усвојуваме

$$g = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ S/km, фаза} = 0,1 \text{ } \mu\text{S/km, фаза.}$$

Подолжната капацитивна одводност b се пресметува со формулата:

$$b = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log(D_m / r_p)} \frac{\text{S}}{\text{km, фаза}}. \quad (1.11)$$

Формулата (1.11) важи за надземни водови со еден спроводник по фаза. Доколку се работи за вод со спроводници во сноп, во последниот израз наместо вистинскиот радиус на спроводниците r_p се става еквивалентниот радиус D_s , кој се пресметува на веќе познатиот начин, со помош на формулата (1.9).

Параметарот b , слично како и параметарот x , слабо зависи од пресекот на спроводниците и е прилично константен. Кај надземните водови со СН и ВН ($U_n \leq 220 \text{ kV}$) тој изнесува приближно:

$$b = 2,6 - 2,8 \text{ } \mu\text{S / km, фаза},$$

додека кај водовите со највисок напон (кај нас $U_n = 380 \text{ kV}$) тој изнесува приближно:

$$b = 3,3 \text{ } \mu\text{S / km, фаза.}$$

Меѓу параметрите x и b кај надземните водови постои секогаш следната релација:

$$b \cdot x = \frac{\omega^2}{c_0^2} = \frac{(2\pi f)^2}{c_0^2} = \frac{314,16^2}{300000^2} \approx 1,1 \cdot 10^{-6}. \quad (1.12)$$

Во неа $\omega = 2\pi f$ е кружната фреквенција, додека c_0 претставува брзина на простирање на светлината во воздух (вакуум).

Капацитивната одводност по единица должина b кај кабелските водови е секогаш за неколку десетици пати поголема од истата кај надземните водови. Таа зависи од димензиите и изведбата на кабелот а зависи и од диелектричната константа ϵ на изолацијата. Затоа, таа кај каблите потешко може да се пресмета, туку нејзината вредност се добива (наоѓа) во разни каталози како готов податок, или пак се добива со мерење.

Кај надземните водови со низок и среден напон ($U_n \leq 35 \text{ kV}$) и кај каблите со номинален напон до 20 kV ($U_n \leq 20 \text{ kV}$), капацитивните струи I_C , односно моќности Q_C , генерирани од погонскиот капацитет на водот се занемарливо мали во однос на реактивните струи/моќности на потрошувачите. Затоа кај овие водови капацитивната одводност, како малку влијателна, најчесто не се зема предвид при пресметките, па на тој начин овие водови во земенските шеми се претставуваат со упростената I – еквивалентна шема, без попречни гранки.

1.1.2 Електроенергетски кабли

Електроенергетските водови можат да бидат изведени како *надземни* и *кабелски*. Во претходниот дел беа третирали само надземните водови, а во натамошниот дел ќе стане збор и за електроенергетските кабли.

Она што важи за надземните водови во поглед на заменските шеми, ќе важи и за кабелските водови. Што се однесува до подолжните параметри на кабелските водови, тие не се пресметуваат туку се добиваат како готови (измерени или пресметани) од страна на самиот производител, или пак се отчитуваат од разни прирачници. Во прилогот се дадени некои од поважните параметри на најчесто употребуваните електроенергетски кабли.

Специфичноста на кабелските водови (покрај специфичната конструкција и значително повисоката цена) е определувањето на нивната струјна оптоварливост, односно вредноста на нивното *и́рајно дозволено с́ирујно о́йтоварување* (ТДСО) I_d . Вредноста на ТДСО на еден кабел во голема мера зависи од условите и начинот на неговото полагање како и од температурата на амбиентот (почвата или воздухот). Во основа постојат два начина на нивното полагање: *во земја* и *во воздух*. На сликите 1.3 а1 и 1.3 а2 се прикажани начини на полагање на каблите во земја, додека на сликите 1.3 б1 . . . 1.3 д2 се прикажани најчесто употребуваните начини на каблите поставени во воздух.

За обата начина на полагање на кабелот се дефинираат т.н. "*номинални услови на полагање*". Кога се работи за кабли положени во земја, под номинални услови на полагање се подразбираат следните услови:

- 1) кабелот е сам (осамен) во ровот, закопан на длабочина $h = 70 \text{ cm}$,
- 2) температурата на амбиентот (земјата изнесува $\theta_a = 20^\circ\text{C}$;
- 3) специфичната топлинска отпорност на тлото изнесува $\rho = 100 \text{ oC}\cdot\text{cm}/\text{W}$;
- 4) кабелот е оптоварен со т.н. дистрибутивен товар, т.е. режимот на максимално оптоварување трае најдолго 10 часови дневно.

За каблите положени во воздух под номинални услови на полагање се подразбираат следните услови:

- 1) кабелот е сам (осамен) и не е изложен на директно сончево зрачење;
- 2) температурата на воздухот изнесува $\theta_a = 30^\circ\text{C}$.

За секој тип кабел е позната "табличната" вредност I_{dT} на ТДСО кога е тој поставен во номинални услови на полагање. Таа обично се добива по експериментален пат. Кога условите на полагање на кабелот (каблите) се разликуваат од номиналните услови, тогаш е потребно ТДСО на кабелот, отчитано од соодветната табела, да се корегира на следниот начин:

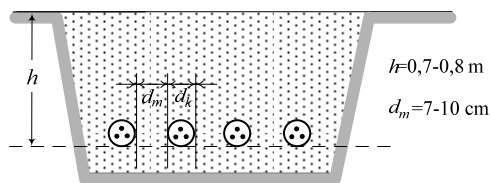
$$I_d = k_\theta \cdot k_p \cdot k_\rho \cdot I_{dT} = k_Z \cdot I_{dT} \text{ — за кабли положени во земја и}$$

$$I_d = k_\theta \cdot k_p \cdot I_{dT} = k_V \cdot I_{dT} \text{ — за кабли положени во воздух.}$$

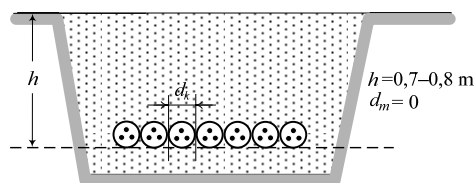
Во табелата I.1.1 се прикажни корекционите фактори k_θ со помош на кои се уважува потребната корекција на ТДСО на кабелот кога температурата на амбиентот се разликува од номиналната (20°C за кабли поставени во земја и 30°C за кабли поставени во воздух).

Во табелата I.1.2 се прикажни корекционите фактори k_p со помош на кои се уважува корекцијата на ТДСО заради начинот на полагање на каблите и нивниот број.

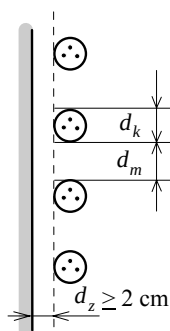
Во табелата I.1.3 се прикажни корекционите фактори k_ρ со помош на кои се уважува корекцијата на ТДСО на кабли положени во земја со специфична отпорност $\rho = 100 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$.



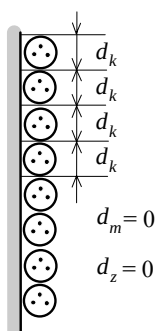
Сл. 1.3 а1. Полагање на енергетски кабли во земјен ров – каблите се размакнати



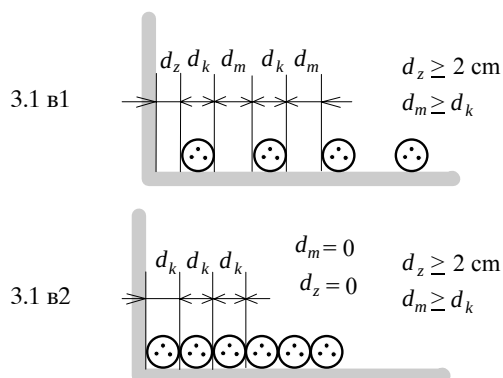
Сл. 1.3 а2. Полагање на енергетски кабли во земјен ров – каблите се допираат



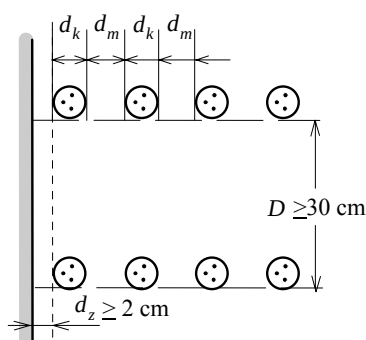
Слика 1.3 б1. Полагање на кабли на сид; каблите се размакнати



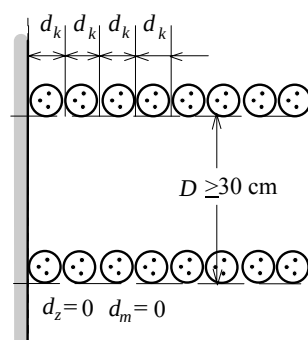
Слика 1.3 б2. Полагање на кабли на сид; каблите се допираат



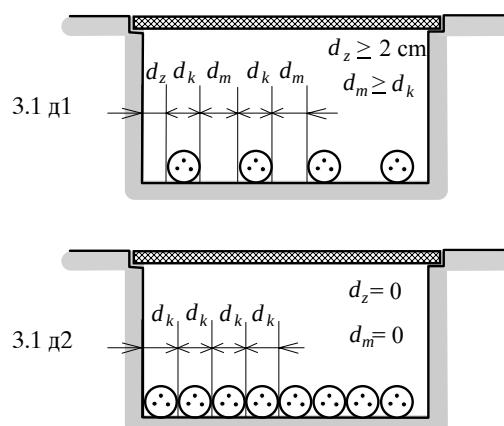
Слика 1.3 в1 и в2. Полагање на кабли на подот; (в1) каблите не се допираат; (в2) каблите се допираат



Слика 1.3 г1. Полагање на кабли на кабелски регали со слободна циркулација на воздухот – каблите се размакнати



Слика 1.3 г2. Полагање на кабли на кабелски регали со слободна циркулација на воздухот – каблите се допираат



Слика 1.3 д1 и д2. Кабли положени во кабелски канали; каблите не се допираат (д1) и се допираат (д2)

Табела I.1.1. Зависност на температурниот корекционен фактор k_θ од температурата на амбиентот за кабли положени во земја.

Температура на тлото (°C)		5	10	15	20	25	30	35
PVC и PE кабли, до 35 kV		1,15	1,10	1,05	1,00	0,94	0,88	0,82
XPE и EPDM кабли, до 35 kV		1,10	1,07	1,04	1,00	0,97	0,92	0,89
Изолација IP, NP	Појасни до 10 kV и Н-кабли, до 20 kV	1,00	1,00	1,00	1,00	0,94	0,88	0,82
	Н-кабли, 35 kV	1,00	1,00	1,00	1,00	0,93	0,87	0,79

Табела I.1.2. Зависност на температурниот корекционен фактор k_θ од температурата на амбиентот за кабли положени во воздух.

Температура на воздухот (°C)		15	20	25	30	35	40	45
PVC и PE кабли, до 35 kV		1,17	1,12	1,07	1,00	0,93	0,87	0,79
XPE и EPDM кабли, до 35 kV		1,13	1,09	1,05	1,00	0,94	0,89	0,84
Изолација IP, NP	Појасни до 10 kV	1,06	1,06	1,06	1,00	0,94	0,87	0,79
	Н-кабли, до 20 kV	1,06	1,06	1,06	1,00	0,94	0,87	0,79
	Н-кабли, 35 kV	1,00	1,00	1,00	1,00	0,91	0,82	0,71

Табела I.2.2*. Зависност на монтажниот корекционен фактор k_p од начинот на полагање на каблите и од бројот на паралелно положените кабли n – кабли положени во воздух.

Распоред на каблите (скица)	Меѓусебни растојанија	Број на каблите n , положени еден покрај друг				
		1	2	3	6	9
Сл. 1.3 б1. Кабли положени вертикално на сид; каблите се размакнати	$d_z \geq 2 \text{ cm}$ $d_m = d_k$	1,00	0,93	0,90	0,87	0,86
Сл. 1.3 б2. Кабли положени вертикално на сид; каблите се допираат	$d_z = 0$ $d_m = 0$	0,96	0,78	0,73	0,68	0,66
Сл. 1.3 в1. Кабли положени на тлото; каблите се размакнати	$d_z \geq 2 \text{ cm}$ $d_m = d_k$	0,95	0,90	0,88	0,85	0,84
Сл. 1.3 в2. Кабли положени на тлото; каблите се допираат	$d_z = 0$ $d_m = 0$	0,90	0,84	0,80	0,75	0,73
Сл. 1.3 г1. Кабли положени на кабелски решетки; каблите се размакнати	$d_z \geq 2 \text{ cm}$ $d_m = d_k$	1,00	0,98	0,96	0,93	0,92
Сл. 1.3 г2. Кабли положени на кабелски решетки; каблите се допираат	$d_z = 0$ $d_m = 0$	0,95	0,84	0,80	0,75	0,73
Сл. 1.3 д1. Кабли положени в кабелски канали; каблите се размакнати	$d_z \geq 2 \text{ cm}$ $d_m = d_k$	0,95	0,90	0,88	0,85	0,84
Сл. 1.3 д2. Кабли положени во кабелски канали; каблите се допираат	$d_z = 0$ $d_m = 0$	0,95	0,84	0,80	0,75	0,73

Табела I.2.1. Зависност на монтажниот корекционен фактор k_p од начинот на полагање на каблите и од бројот на паралелно положените кабли n – кабли положени во земја.

Број на кабли n во ист ров		2	3	4	5	6	8	10
Растојание d_m меѓу каблите односно кабелските снопови (кабелските системи)	допир	0,79	0,67	0,63	0,58	0,55	0,50	0,46
	7 cm	0,85	0,75	0,68	0,64	0,60	0,56	0,53
	15 cm	0,86	0,77	0,72	0,68	0,64	0,61	0,58
	25 cm	0,87	0,78	0,74	0,71	0,67	0,64	0,52

*) Забелешка: Во случајот кога каблите се поставени на кабелски регали (полицы), како на сликите 3.1 г1 и 3.1 г2, при што е спречена циркулацијата на воздухот, тогаш корекциониот фактор се определува исто како и за случајот од сликите 3.1 д1 и 3.1 д2 (кои се однесуваат на каблите положени во кабелски канали).

Кога специфичната топлинска отпорност на тлото се разликува од претпоставените $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$, тогаш корекциониот фактор k_p со кој се уважува таа разлика, се пресметува со помош на релацијата (1.13) при што вредностите на факторите k_A и k_B се добиваат со помош на табелите I.3.1 и I.3.2.

$$k_p = k_A \cdot k_B. \quad (1.13)$$

Табела I.3.1. Фактор k_A - зависност од пресекот на спроводниците

$[\text{mm}^2] \setminus [^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}]$	70	100	120	150	200	250	300
до 25 mm^2	1,11	1,00	0,94	0,87	0,78	0,72	0,67
35 - 95 mm^2	1,13	1,00	0,93	0,86	0,76	0,70	0,64
120 - 240 mm^2	1,14	1,00	0,93	0,85	0,76	0,69	0,63
300 - 500 mm^2	1,15	1,00	0,92	0,85	0,75	0,68	0,63

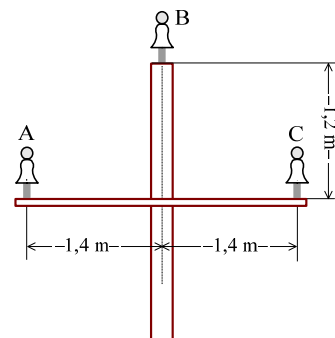
Табела I.3.2. Фактор k_B - зависност од U_n и типот на кабелот

Специфична топлинска отпорност $[^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}]$	70	100	120	150	200	250	300
3 и 4-жилни кабли, 1 kV	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2-жилни, 1 kV, појасни 6, 10 kV	0,98	1,00	1,01	1,01	1,02	1,02	1,03
3-жилен Н-кабел до 35 kV	0,97	1,00	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05
3 едножилни кабли до 35 kV	1,01	1,00	1,00	0,98	0,97	0,97	0,96

Задача 1.1. На сликата е прикажана главата од еден 10 kV армирано–бетонски столб. Како спроводници се користат комбинирани јажиња Al/Č 50/8 според стандардот MKS. N.C1.351, за кои е познато (видете ја табелата П.2 во прилогот):

- однос на пресеците $\varepsilon = A_{Al}/A_{Fe} = 48,3/8,0 \cong 6:1$;
- надворешен пречник на јажето $d_p = 2r_p = 9,6 \text{ mm}$;
- трајно дозволена струја $I_d = 170 \text{ A}$;
- активна отпорност по единица должина на температура $\theta = 20^\circ\text{C}$ $r_{20} = 0,595 \Omega/\text{km}$.

Да се определат подолжните параметри на водот r , x , g и b .



Слика 1.1. Изглед на главата бетонски столб од еден 10 kV надземен вод

Решение:

Најнапред ќе го пресметаме сопственото средногеометриско растојание на фазните спроводници D_s :

$$r_p = d_p/2 = 4,8 \text{ mm}; \quad D_s = r'_p = 0,81 \cdot r_p = 3,89 \text{ mm}.$$

Средногеометриското растојание на фазните спроводници D_m , согласно сликата 1.1, ќе биде:

$$D_{AB} = \sqrt{1,4^2 + 1,2^2} = 1,84 \text{ m}; \quad D_{AC} = 1,4 + 1,4 = 2,80 \text{ m}; \quad D_{BC} = \sqrt{1,4^2 + 1,2^2} = 1,84 \text{ m}.$$

$$D_m = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{AC} \cdot D_{BC}} = \sqrt[3]{1,84 \cdot 2,8 \cdot 1,84} = 2,12 \text{ m}.$$

Погонската активна отпорност по единици должина на јажето r_{20} се однесува на случајот кога се работи за еднонасочна струја и кога температурата на спроводникот изнесува 20°C . Меѓутоа, нас обично не интересира вредноста на активната отпорност за наизменична струја ($f = 50 \text{ Hz}$) на работната температура која се разликува од споменатите 20°C . Во таквите случаи обично се користат приближни формули каков што е, на пример, изразот (1.4). Според тоа, за активната отпорност по единица должина r ќе имаме:

$$r = \frac{1000}{\kappa \cdot A_{Al}} = \frac{1000}{32 \cdot 48,3} = 0,647 \frac{\Omega}{\text{km}}.$$

Индуктивната отпорност (реактанцијата) x по единица должина на разгледуваниот вод ќе ја пресметаме со помош на формулата (1.5);

$$x = 0,1445 \cdot \log \frac{D_m}{D_s} = 0,1445 \cdot \log \frac{2,12}{3,89 \cdot 10^{-3}} = 0,395 \frac{\Omega}{\text{km}}.$$

Капацитивната спроводност (суспенданцијата) по единица должина на водот b ќе биде:

$$b = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log \frac{D_m}{r_p}} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log \frac{2,12}{4,9 \cdot 10^{-3}}} = 2,875 \cdot 10^{-6} \frac{\text{S}}{\text{km}}.$$

Загубите поради корона кај надземните водови со низок и среден напон ($U_n < 110 \text{ kV}$) се секогаш занемарливи, поради што може да се усвои:

$$g \approx 0.$$

□ □ □

Задача 1.2. На сликата 1.2 е прикажана главата на челично–решеткаст столб, наменет за водови со номинален напон 110 kV. Одделните величини од сликата ги имаат следните вредности: $a = 2,6$ m; $b = 3,0$ m; $c = 3,5$ m; $d = 3,2$ m; $e = 2,0$ m; $f = 2,0$ m; $g = 0,6$ m.

Да се определат подолжните параметри r , x и b на водот, неговата природна моќност P_N и неговата гранична термичка моќност S_d , за различни пресеци на спроводниците. Притоа, како спроводници се користат комбинирани алучел јажиња (т.е. комбинацијата алуминиум–челик), со номинален пресек од Al/Č 95/15 до Al/Č 360/60 mm².

Решение:

Подолжните параметри (по фаза) на водот r , x и b се пресметуваат со познатите формули:

$$r = \frac{1000}{\kappa \cdot A} = \frac{1000}{32 \cdot A} = \frac{31,25}{A} \frac{\Omega}{\text{km}};$$

$$x = 0,1445 \cdot \log \frac{D_m}{D_s} = 0,1445 \cdot \log \frac{D_m}{0,81 \cdot r_p} \frac{\Omega}{\text{km}};$$

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

каде што е:

$$D_m = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{AC} \cdot D_{BC}} \quad \text{и} \quad D_s = 0,81 \cdot r_p.$$

Од сликата добиваме:

$$D_{AB} = \sqrt{(3 + 2,6)^2 + 2^2} = 5,95 \text{ m}; \quad D_{AC} = \sqrt{(3,5 - 2,6)^2 + (2 + 2)^2} = 4,1 \text{ m}; \quad D_{BC} = \sqrt{(3 + 3,5)^2 + 2^2} = 6,8 \text{ m}.$$

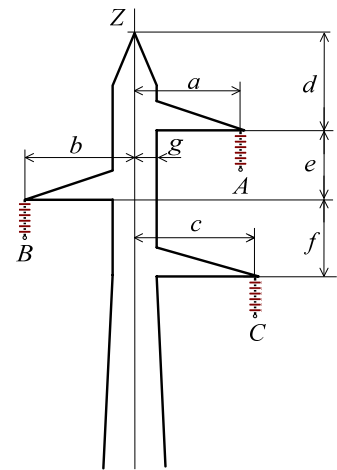
Според тоа, за средногеометриското растојание D_m ќе добиеме:

$$D_m = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{AC} \cdot D_{BC}} = \sqrt[3]{5,95 \cdot 4,1 \cdot 6,8} = 5,5 \text{ m}.$$

Граничната термичка привидна моќност на далекуводот S_d зависи од трајно дозволената струја I_d на спроводниците и се пресметува со формулата:

$$S_d = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_d.$$

Врз основа на податоците од табелата 2.5 од учебникот [1], односно табелата П.2 од прилогот, во која се дадени карактеристиките на комбинираниите Al/Č јажиња, со помош на горе прикажаните формули, добиени се подолжните параметри на водот, за разни номинални пресеци на спроводниците. Податоците за активната отпорност r не се преземени од споменатата табела 2.5 туку се пресметувани со помош на релацијата (1.4). Резултатите од пресметките се прикажани во табелата 1.2.



Слика 1.2. Глава на 110 kV челично-решеткаст столб

Табела 1.2. Карактеристики на водот во за разни пресеци на спроводниците

Номинален пресек на спроводниците mm ²	95/15	120/20	150/25	185/30	210/35	240/40	360/60
A (mm ²)	94,4	121,6	148,9	183,8	209,1	243,0	360,2
r_p (mm)	6,80	7,75	8,55	9,50	10,15	10,95	13,30
r (Ω/km)	0,331	0,257	0,210	0,170	0,149	0,129	0,087
x (Ω/km)	0,433	0,425	0,419	0,412	0,408	0,404	0,392
b (μS/km)	2,61	2,66	2,70	2,74	2,77	2,81	2,90
x / r	1,31	1,65	2,00	2,42	2,74	3,13	4,51
Z_V (Ω)	407	400	394	388	384	379	368
P_N (MW)	29,7	30,3	30,7	31,2	31,5	31,9	32,9
I_d (A)	290	345	400	455	490	530	675
S_d (MVA)	55,3	65,7	76,2	86,7	93,4	101,0	129,0

□ □ □

Задача 1.3. Да се пресмета погонската бранова импеданција и природната моќност на 110 kV надземен вод, чии спроводници се јажиња Al/Č 240/40 mm². Средногеометриското растојание меѓу фазните спроводници на главата на столбот изнесува $D_m = 5,5$ m (видете ја претходната задача).

Колкава реактивна моќност Q_C генерира овој вод во режимот на празен од при номинален напон ако неговата должина изнесува $l = 100$ km.

Решение:

Погонската бранова импеданција на водот ќе биде:

$$Z_V = \sqrt{\frac{x}{b}} = \sqrt{\frac{0,404}{2,806 \cdot 10^{-6}}} = 379,2 \, \Omega,$$

Кога на крајот од водот е приклучен чисто активен потрошувач со импеданција $Z_P = Z_V$, тогаш велиме дека низ водот се пренесува природна моќност. При напон $U_2 = U_n$, природната моќност P_N што му се испорачува на потрошувачот ќе биде:

$$P_N = \frac{U_n^2}{Z_V} = \frac{110^2}{379,2} = 31,911 \, \text{MW}.$$

На оваа моќност и соодветствува "природна струја" I_N . Нејзината вредност ќе биде:

$$I_2 = I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U_2} = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{31,911}{\sqrt{3} \cdot 110} = 0,1675 \, \text{kA} \approx 167,5 \, \text{A}.$$

Подоцна ќе видиме дека и струјата I_1 на почетокот од водот ќе биде приближно иста, а исто така и напонот U_1 на почетокот од водот многу малку ќе се разликува од напонот U_2 . Забележуваме дека во режимот на пренос на природна моќност водот ќе биде струјно оптоварен само со 32% од својата "термичка струја" $I_d = 530$ A.

Во режимот на празен од и при работа со номинален напон, реактивната моќност што ја генерира разгледуваниот вод ќе изнесува:

$$Q_C = b \cdot l \cdot U^2 = B \cdot U^2, \text{ или}$$

$$Q_C = 2,81 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 110^2 = 3,395 \, \text{Mvar}.$$

Капацитивната струја I_C што ќе тече на почетокот од водот ќе биде:

$$I_C = B \cdot U_f = \frac{Q_C}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{2,806}{\sqrt{3} \cdot 110} = 0,01782 \text{ kA} \approx 17,82 \text{ A}.$$

Значи дури и во режимот на празен од, кога на крајот од водот нема приклучено потрошувач, на почетокот од водот ќе тече чисто капацитивна струја од околу 18 А. Таа струја се должи на постоењето на погонскиот капацитет на водот.

□ □ □

Задача 1.4. На сликата 1.4 е прикажан носечки столб тип "Y2" (наречен уште и тип "делта" или тип "мачка") од еден 380 kV далекувод. Познати се следните димензии на главата од столбот:

$$a = 20,4 \text{ m}; b = 12,3 \text{ m}; c = 3,4 \text{ m};$$

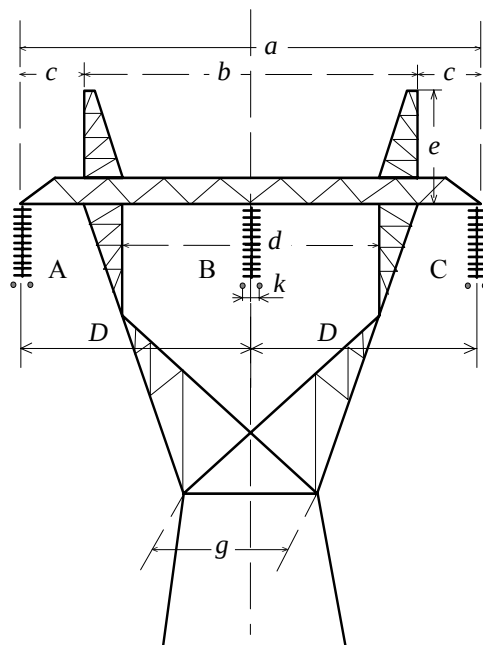
$$d = 7,24 \text{ m}; e = 3,5 \text{ m}; g = 2,45 \text{ m}.$$

Во секоја фаза од водот има по два спроводника од типот Al/C 490/65 mm² (спроводници во сноп), поставени на меѓусебно растојание $k = 40 \text{ cm}$. Спроводниците (според табелата Р.2 од Прилогот) ги имаат следните карактеристики:

– вистински пресек 490,3/63,6 mm²,

– пречник $d_p = 2 \cdot r_p = 30,6 \text{ mm}$.

Да се одредат подолжните параметри z и y на дадениот вод и да се нацрта неговата π -заменска шема. Должината на далекуводот изнесува $l = 400 \text{ km}$.



Слика 1.4. Изглед и димензии на главата од еден 380 kV столб

Решение:

Врз основа на прикажана диспозиција на проводниците на главата од столбот можеме да го одредиме средно-геометриското растојание D_m на фазните спроводници.

$$D_m = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{AC} \cdot D_{BC}} = \sqrt[3]{D \cdot 2D \cdot D} = 1,26 \cdot D = 1,2 \cdot 10,2 = 12,852 \text{ m}.$$

Во дадениот случај сопственото средногеометриско растојание D_s на спроводниците во снопот ќе биде:

$$D_s = \sqrt{r_p \cdot k} = \sqrt{(d_p / 2) \cdot k} = \sqrt{(30,6 / 2) \cdot 400} = 78,23 \text{ mm}.$$

Сега можеме да ги одредиме подолжните параметри на водот.

Активната отпорност по фаза r ќе биде:

$$r = \frac{1000}{n \cdot \kappa \cdot S} = \frac{1000}{2 \cdot 32 \cdot 490,3} = 0,0318 \approx 0,032 \frac{\Omega}{\text{km}}.$$

Реактивната отпорност x ќе биде:

$$x = 0,1445 \cdot \log \frac{D_m}{D_s} + \frac{0,0157}{n};$$

$$x = 0,1445 \cdot \log \frac{1285}{7,823} + \frac{0,0157}{2} = 0,328 \frac{\Omega}{\text{km}}.$$

За активната одводност g ќе усвоиме вредност што одговара на екстремно неповолни временски услови:

$$g = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ S/km},$$

додека реактивната одводност b ќе изнесува:

$$b = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log(D_m / r_p)};$$

$$b = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log(12,852 \cdot 10^3 / 78,23)} = 3,421 \frac{\mu\text{S}}{\text{km}}.$$

Според тоа, подолжните параметри на водот ќе бидат:

$$\underline{z} = (r + jx) = (0,032 + j0,328) \Omega/\text{km};$$

$$\underline{y} = (g + jb) = (0,1 + j3,421) \mu\text{S/km}.$$

Бидејќи се работи за релативно долг вод ($l > 250 \text{ km}$), неговата заменска шема ќе биде составена од повеќе каскадно споени четворополи (на пример два четворопола, од кои секој репрезентира половина од водот). Доколку, пак, сакаме водот да го претставиме само со еден четворопол, тогаш неговите параметри ќе бидат пресметани на следниот начин:

$$b \cdot x \cdot l^2 = 3,421 \cdot 10^{-6} \cdot 0,328 \cdot 400^2 = 0,1795341;$$

$$k_r = 1 - \frac{b \cdot x \cdot l^2}{3} = 0,940; \quad R_p = k_r \cdot r \cdot l = 0,94 \cdot 0,032 \cdot 400 = 12,034 \Omega,$$

$$k_x \approx 1 - \frac{b \cdot x \cdot l^2}{6} = 0,970; \quad X_p = k_x \cdot x \cdot l = 0,97 \cdot 0,328 \cdot 400 = 127,274 \Omega,$$

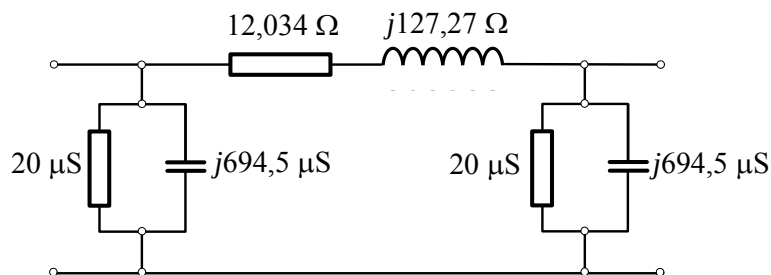
$$k_b = 1 + \frac{b \cdot x \cdot l^2}{12} = 1,015; \quad B_p = k_b \cdot b \cdot l = 1,015 \cdot 3,421 \cdot 10^{-6} \cdot 400 = 1389 \mu\text{S},$$

$$G_p = g \cdot l = 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 400 = 40 \cdot 10^{-6} \text{ S} = 40 \mu\text{S}.$$

Значи, за параметрите $\underline{Z}_p$ и $\underline{Y}_p$ на уточнетата π -заменска шема ќе добиеме:

$$\underline{Z}_p = (R_p + jX_p) = (12,034 + j127,27) \Omega; \quad \underline{Y}_p = (G_p + jB_p) = (20 + j694,5) \mu\text{S}.$$

Заменската π - шема на водот е прикажана на сликата 1.4.



Слика 1.4. π - заменска шема на водот од задачата 1.4

□ □ □

Задача 1.5[‡]. За водот чии столбови се изведени според скицата од задачата бр. 1.4 да се пресметаат подолжните параметри $\underline{z}$ и $\underline{y}$ за следните два случаја:

- а) во секоја фаза од водот има по три спроводници во сноп од типот Al/Č 490/65 mm², разместени во темињата од рамностран триаголник со страна $k = 40 \text{ cm}$;

б) во секоја фаза од водот има по четири спроводници во сноп од типот Al/Č 490/65 mm², разместени во темињата од еден квадрат со страна $k = 40$ cm.

Решение:

$$\text{a) } n = 3: \quad \underline{z} = (r + jx) = (0,021 + j0,291) \, \Omega/\text{km}; \quad \underline{y} = (g + jb) = (0,1 + j3,83) \, \mu\text{S}/\text{km}.$$

$$\text{b) } n = 4: \quad \underline{z} = (r + jx) = (0,016 + j0,267) \, \Omega/\text{km}; \quad \underline{y} = (g + jb) = (0,1 + j4,16) \, \mu\text{S}/\text{km}.$$

□ □ □

Задача 1.6. Да се пресмета трајното дозволено струјно оптоварување (ТДСО) на трижилен појасен кабел тип IPO 13 A 3×150 6/10 kV. Кабелот е положен во земјен ров во номинални услови ($h=70$ cm; $\theta=20^\circ\text{C}$; $\rho=100$ °C·cm/W). Колкава е термичката пропусна моќ на кабелот S_d . Колкави се цуловите загуби по метар должина $\Delta P'_j$ во услови кога е кабелот оптоварен со струјно оптоварување еднакво на ТДСО $I_p = I_d$.

Решение:

а) Пресметка на ТДСО и на термичката пропусна моќ

Од табелата П.10 од Прилогот, за специфицираниот кабел (трижилен кабел со изолација импрегнирана хартија IP; спроводници Al 150 mm²; номинален напон 10 kV) ја отчитуваме табличната вредност I_{dT} за дозволеното струјно оптоварување на кабелот:

$$I_{dT} = 255 \text{ A}.$$

Бидејќи е кабелот поставен во номинални услови на полагање ТДСО на кабелот I_d ќе биде еднакво на соодветната таблична вредност I_{dT} , отчитана од таа табела, т.е. ќе биде:

$$I_d = I_{dT} = 255 \text{ A}.$$

Термичката пропусна моќ на кабелот е онаа привидна моќност која соодветствува на термичката трајно дозволена струја. Според тоа при $U = U_n$ ќе имаме:

$$S_d = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_d = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,255 = 4,417 \text{ MVA}.$$

б) Пресметка на цуловите загуби во кабелот при пренесување на ТДСО.

Најнапред ќе ги утврдиме/пресметаме подолжните параметри на кабелот r , x и b .

Од табелата П.14 од Прилогот за специфицираниот кабел отчитуваме:

$$r_{20} = 0,206 \, \Omega/\text{km}; \quad x = 0,08 \, \Omega/\text{km}; \quad c = 0,5 \, \mu\text{F}/\text{km}.$$

Според тоа, за подолжната капацитивна спроводност (сусцептанса) b ќе добиеме:

$$b = \omega \cdot c = 157 \, \mu\text{S}/\text{km}.$$

Кога кабелот е оптоварен со своето ДТСО, неговата температура е еднаква на својата максимално дозволена вредност. За 10 kV кабли со изолација IP, оваа температура изнесува $\theta_d = 65^\circ\text{C}$. На оваа температура погонската активната отпорност по единица должина r на кабелот ќе биде:

$$r_\theta = r_{20} \cdot [1 + a_{Al} \cdot (\theta - 20)] = 0,206 \cdot [1 + 0,004 \cdot (65 - 20)] = 0,243 \, \Omega/\text{km}; \quad r = r_\theta = 0,243 \, \Omega/\text{km}.$$

Сега можеме да ги пресметаме цуловите загуби по километар (метар) должина при пренесување на ТДСО I_d :

$$\Delta P'_j = 3 \cdot r \cdot I_d^2 = 3 \cdot 0,243 \cdot 255^2 = 47.400 \text{ W}/\text{km} \equiv 47,4 \text{ W}/\text{m}.$$

□ □ □

Задача 1.7. Се посматра 10 kV кабелски вод, разгледуван во задачата 1.6 (тип IPO 13 A 3x150, 6/10 kV). Кабелот е положен во земјен ров на длабочина $h = 0,7$ m во номинални услови на полагање. За кабелот се познати следните податоци:

- подолжни параметри: $r_{20} = 0,206 \Omega/\text{km}$; $x = 0,08 \Omega/\text{km}$; $c = 0,5 \mu\text{F}/\text{km}$; $b = \omega c = 157 \mu\text{S}/\text{km}$;
- надворешен пречник на кабелот: $d_k = 56$ mm;
- единечна маса: $M = 10,2$ kg/m (единечна тежина $G = 10$ daN/m);
- трајно дозволена струја кога е кабелот положен во земја $I_d = 255$ A;
- трајно дозволена струја кога е кабелот положен во воздух $I_d = 240$ A.

Напонот на почетокот од водот изнесува $U_1 = U_n = 10$ kV. Да се пресмета:

- а) колкава е капацитивната струја I'_C и капацитивната моќност Q'_C по km должина;
- б) при која должина на кабелот l_C , кога тој работи во режим на празен од, капацитивната струја на почетокот од кабелот ќе ја има вредноста на трајно дозволената струја $I_C = I_d$;
- в) при која должина на кабелот $l_U = ?$, оптоварен со својата термичка струја при фактор на моќност $\cos \varphi = 1$, загубата на напон во кабелот ќе изнесува 5%.

Решение:

а) Пресметка на капацитивната струја и капацитивната моќност на кабелот.

Капацитивната струја I_C и капацитивната моќност Q_C на кабел со должина l и со подолжна susceptance b се пресметува со формулата:

$$I_C = b \cdot l \cdot U_f = B \cdot U / \sqrt{3}.$$

Кога е $U = U_n = 10$ kV и $l = 1$ km, се добива капацитивната струја I'_C по единица должина:

$$I'_C = b \cdot U / \sqrt{3} = 157 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^3 / \sqrt{3} = 0,906 \text{ A/km}.$$

Соодветно на тоа, капацитивната моќност Q'_C по km должина на кабелот ќе биде:

$$Q'_C = \sqrt{3} \cdot U \cdot I'_C = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 0,906 = 15.700 \text{ var/km} \equiv 15,7 \text{ kvar/km}.$$

б) Пресметка на граничната должина l_C .

Капацитивната моќност Q_C што ја генерира погонскиот капацитет на кабелот со должина $l = l_C$ ќе биде (приближно):

$$Q_C = b \cdot l_C \cdot U^2 = Q'_C \cdot l_C.$$

Сега тргнувајќи од условот $Q_C = S_d = 4,417$ MVA (видете ја задачата 1.6) добиваме:

$$l_C = \frac{Q_C}{Q'_C} = \frac{S_d}{Q'_C} = \frac{4,417 \cdot 10^6}{15,7 \cdot 10^3} = 281 \text{ km}.$$

в) Пресметка на граничната должина l_U .

Загубата на напон во 10 kV кабли може приближно, но сепак доволно точно, да се пресмета со следната формула:

$$\Delta U \approx \Delta U_d = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U} \approx \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_n}, \text{ или}$$

$$\Delta U \approx \frac{P \cdot l \cdot r \cdot (1 + x/r \cdot \tan \varphi)}{U_n}$$

Во последната формула со P , Q и U се означени активната и реактивната моќност и напонот при потрошувачот, приклучен на крајот од кабелот.

Според тоа, за $l = l_U$, загубата на напон ΔU ќе биде:

$$\Delta U = 0,05 \cdot U_n \text{ (т.е. 5\% од } U_n),$$

или:

$$0,05 \cdot U_n = \frac{P \cdot l_u \cdot r \cdot (1 + x/r \cdot \operatorname{tg} \varphi)}{U_n} \Rightarrow l_u = \frac{0,05 \cdot U_n^2}{P \cdot r \cdot (1 + x/r \cdot \operatorname{tg} \varphi)}.$$

Гледаме дека граничната должина l_u зависи, меѓу другото, и од факторот на моќност $\cos \varphi$. За илустрација на таа зависност, во следната табела се прикажани пресметаните вредности за граничната должина l_u во зависност од факторот на моќност $\cos \varphi$.

Ќе усвоиме дека температурата на кабелот изнесува $\theta = \theta_d = 65^\circ\text{C}$ (видете ја претходната задача 1.6) и $r = 0,243 \text{ } \Omega/\text{km}$. Во тој случај, со помош на последниот израз ќе ја добиеме следната табела:

Табела 1.7.1. Гранични должини за кабелот тип IPO 13 A 3x150, 6/10 kV, оптоварен со ТДСО (термичка струја) $I_P=I_d=255 \text{ A}$, за кои се постига $\Delta U=5\%$.

$\cos \varphi$	1,00	0,95	0,90	0,80	0,70
P, MW	4,417	4,196	3,975	3,534	3,092
Q, Mvar	0	1,379	1,925	2,650	3,154
l_u , km	4,658	4,425	4,465	4,669	4,982

Значи граничната должина на кабелот тип IPO 13 A 3x150 6/10 kV, за која се постигнува пад на напон од 5% кога е тој оптоварен со своето ТДСО ($I_d = 255 \text{ A}$) се движи во границите од 4,5 до 5 km.

□ □ □

Задача 1.8. 110 kV кабелски вод е изведен од три едножилни кабли од типот ХНЕ 49 А 1x300 64/110 kV*). Трите жили се поставени во земја со специфична топлина отпорност $\rho = 120 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W} = 1,2 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$ во триаголен распоред на длабочина $h = 1 \text{ m}$. Температурата на тлото изнесува $\theta = 15^\circ\text{C}$. Во споменатите услови трајното дозволено струјно оптоварување на кабелот (ТДСО) изнесува $I_d = 435 \text{ A}$. Познати се и следните податоци за кабелот: $x=0,12 \text{ } \Omega/\text{km}$; $c = 0,31 \text{ } \mu\text{F}/\text{km}$; $b = \omega c = 98 \text{ } \mu\text{S}/\text{km}$. Да се пресмета:

- термичката пропусна моќ на кабелот S_d ;
- погонската бранова импеданција Z_V и природната моќност P_N на кабелот;
- граничната должина на кабелот l_C за која капацитивната струја $I_C = I_d$.

Решение:

Решавањето на оваа задача се врши на наполно ист начин како и во случајот обработен во задачите 1.6 и 1.7. Затоа деталите во пресметките овде ќе бидат испуштени а ќе бидат прикажани само конечните формули за пресметка, заедно со соодветните резултати.

а) Пресметка на термичката пропусна моќност на кабелот

$$S_d = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_d = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 0,435 = 82,9 \text{ MVA}.$$

б) Пресметка на погонската бранова импеданција Z_V и природна моќност P_N

$$Z_V = \sqrt{x/b} = \sqrt{0,12/98 \cdot 10^{-6}} = 35 \text{ } \Omega; \quad P_N = U_n^2 / Z_V = 345,8 \text{ MW}.$$

в) Пресметка на капацитивната струја I_C , моќност Q_C и граничната должина l_C

$$I'_C = b \cdot U_{nf} = b \cdot U_n / \sqrt{3} = 98 \cdot 10^{-6} \cdot 110 \cdot 10^3 / \sqrt{3} = 6,224 \text{ A}; \quad Q'_C = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I'_C = 1,86 \text{ Mvar/km.}$$

$$l_C = S_d / Q'_C = I_d / I'_C = 435 / 6,224 = 70 \text{ km.}$$

Забележуваме дека, за разлика од случаите што се јавуваат кај надземните водови, кај кои природната моќност P_N е за 2 до 3 пати помала од нивната термичка пропусна моќност, овде, кај енергетските кабли имаме обратна ситуација, т.е. природната нивната моќност е за неколку пати поголема од соодветната термичка пропусна моќност. Исто така се забележува дека капацитивната струја (моќност) по единица должина е кај каблите за висок напон прилично голема така што веќе и кај должини од редот на 70 km па и помалку, колку што е граничната должина l_C кај овие кабли, капацитивната струја I_C (која се нарекува уште и "струја на полнење") ја достигнува термичката дозволена струја I_d . Од тие причини пренос на моќност на поголеми растојанија со високонапонските кабли не можат.

*) Овој тип кабли е предвиден да се примени за изведба на идните 110 kV кабелски врски во скопската ВН мрежа на потегот ТС "Војна Болница" – ТС "Централна" и ТС "Централна" – ТС "Југ". Должините на секоја од овие кабелски врски ќе бидат од редот на неколку километри.

□ □ □

Задача 1.9. Се посматра 10 kV кабелски вод од типот IPO 13 A 3x150 6/10 kV (видете ги задачите 1.6 и 1.7) е поставен во кабелски ров ($h=0,7 \text{ m}$; $\theta=20^\circ\text{C}$). Кабелскиот вод се состои од:

- еден кабел од типот IPO 13 A 3x150, 6/10 kV, положен во номинални услови на полагање;
- два паралелно положени кабла од типот IPO 13 A 3x150, 6/10 kV, положени во земја на длабочина $h = 0,7 \text{ m}$ и на меѓусебно растојание $d_m = 15 \text{ cm}$;
- три паралелно положени кабли од типот IPO 13 A 3x150, 6/10 kV, положени во земја на длабочина $h = 0,7 \text{ m}$ и на меѓусебно растојание $d_m = 15 \text{ cm}$;
- четири паралелно положени кабли од типот IPO 13 A 3x150, 6/10 kV, положени во земја на длабочина $h = 0,7 \text{ m}$ и на меѓусебно растојание $d_m = 15 \text{ cm}$.

За секој од наведените случаи да се пресметаат еквивалентните подолжни параметри на водот r , x и b како и неговата термичка пропусна моќност S_d .

Решение:

$$a) r = 0,243 \text{ } \Omega/\text{km}; \quad x = 0,08 \text{ } \Omega/\text{km}; \quad b = 144,5 \text{ } \mu\text{S}/\text{km}; \quad I_d = 255 \text{ A}; \quad S_d = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_d = 4,417 \text{ MVA}.$$

$$b) r = 0,122 \text{ } \Omega/\text{km}; \quad x = 0,04 \text{ } \Omega/\text{km}; \quad b = 289 \text{ } \mu\text{S}/\text{km}; \quad I'_d = 2 \cdot k_p \cdot I_d = 2 \cdot 0,86 \cdot 255 = 439 \text{ A}; \quad S_d = 7,60 \text{ MVA}.$$

$$в) r = 0,801 \text{ } \Omega/\text{km}; \quad x = 0,027 \text{ } \Omega/\text{km}; \quad b = 433,5 \text{ } \mu\text{S}/\text{km}; \quad I'_d = 3 \cdot k_p \cdot I_d = 3 \cdot 0,77 \cdot 255 = 589 \text{ A}; \quad S_d = 10,2 \text{ MVA}$$

$$г) r = 0,601 \text{ } \Omega/\text{km}; \quad x = 0,02 \text{ } \Omega/\text{km}; \quad b = 578 \text{ } \mu\text{S}/\text{km}; \quad I'_d = 4 \cdot k_p \cdot I_d = 4 \cdot 0,72 \cdot 255 = 510 \text{ A}; \quad S_d = 12,72 \text{ MVA}.$$

□ □ □

Задача 1.10: Да се реши примерот од задачата 1.9 за случајот кога каблите се поставени во кабелски канали на меѓусебно растојание $d_m = d_k = 5,6 \text{ cm}$.

Решение:

$$a) r = 0,206 \text{ } \Omega/\text{km}; \quad x = 0,08 \text{ } \Omega/\text{km}; \quad b = 157 \text{ } \mu\text{S}/\text{km}; \quad I_d = k_p \cdot 240 \text{ A} = 0,95 \cdot 240 = 228 \text{ A}; \quad S_d = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_d = 3,95 \text{ MVA}.$$

$$б) r = 0,103 \text{ } \Omega/\text{km}; \quad x = 0,04 \text{ } \Omega/\text{km}; \quad b = 314 \text{ } \mu\text{S}/\text{km}; \quad I'_d = 2 \cdot k_p \cdot 240 \text{ A} = 2 \cdot 0,90 \cdot 240 = 432 \text{ A}; \quad S_d = 7,48 \text{ MVA}.$$

$$в) r = 0,693 \text{ } \Omega/\text{km}; \quad x = 0,027 \text{ } \Omega/\text{km}; \quad b = 471 \text{ } \mu\text{S}/\text{km}; \quad I'_d = 3 \cdot k_p \cdot 240 \text{ A} = 3 \cdot 0,88 \cdot 240 = 634 \text{ A}; \quad S_d = 10,97 \text{ MVA}.$$

$$г) r = 0,052 \text{ } \Omega/\text{km}; \quad x = 0,02 \text{ } \Omega/\text{km}; \quad b = 628 \text{ } \mu\text{S}/\text{km}; \quad I'_d = 4 \cdot k_p \cdot 240 \text{ A} = 4 \cdot 0,85 \cdot 240 = 816 \text{ A}; \quad S_d = 14,13 \text{ MVA}.$$

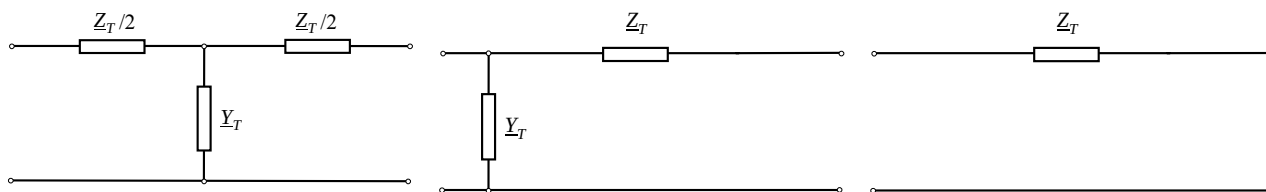
□ □ □

1.2. ТРАНСФОРМАТОРИ

1.2.1 Двонамотни трансформатори

Трансформаторот е еден од основните елементи во електроенергетските системи. Служи за трансформација на електричната енергија од едно на друго напонско ниво, за поврзување на два система со различни напонски нивоа, за регулација на напонот во одделни делови од мрежата и друго.

Како што е познато од теоријата на енергетските трансформатори, еквивалентната заменска шема на трансформаторот претставува еден симетричен четворокрајник (Т-еквивалентна шема). Често пати, заради упростување, енергетскиот трансформатор се претставува и поедноставно, со помош на т.н. Г-заменска шема. Понекогаш тој се прикажува уште поупростено, со помош на I-заменска шема во која нема попречна гранка (сл. 1.4).



Слика 1.4. Т-заменска шема, Г-заменска шема и I-заменска шема на енергетските трансформатори

Големините Z_T и Y_T можат да се пресметаат доколку ги познаваме основните параметри на трансформаторот. Основни или номинални параметри на трансформаторот се следните:

U_{1n}/U_{2n} – номинален преносен однос на трансформаторот,

S_n – номинална привидна моќност на трансформаторот,

$u_k\%$ – напон на куса врска, изразен во проценти од номиналниот напон,

$i_0\%$ – струја на празен од (струја на магнетизирање), изразена во проценти од номиналната струја на трансформаторот,

ΔP_{Cun} – загуби во бакар, кога низ трансформаторот тече номинална струја,

ΔP_{Fe} – загуби во железо (загуби во магнетното коло на трансформаторот) во режим на празен од,

ΔQ_{Fe} (ΔQ_μ) – моќност на магнетизирање (реактивна моќност што трансформаторот ја прима во режим на празен од при номинален напон).

Покрај номиналните параметри, постојат и други големини кои што го карактеризираат еден трансформатор. Меѓу најважните од нив се шемата на врзување и групата на трансформаторот. Последните имаат посебна улога во анализите на преодните процеси во електроенергетските системи, во анализите на несиметричните режими на работа како и при анализите на режимите со куса врска во ЕЕС. Во анализата на стационарниот режим (нормален режим на работа), трансформаторот се претставува со неговата еквивалентна шема, чиишто параметри не зависат од шемата на врзување или од групата на соединување на трансформаторот, така што овде тие немаат никаква улога.

Да се задржиме малку повеќе на номиналните параметри на еден трансформатор.

Номиналниот преносен однос на трансформаторот U_{1n}/U_{2n} претставува однос на номиналните линиски напони на примарот и секундарот од трансформаторот. Овој однос зависи од односот на навивките на соодветните намотки. Со промена на бројот на навивките на една од намотките, се менува и овој однос. Тоа е истовремено и еден од начините за регулација на напонот во електричните мрежи.

Номиналната привидна моќност на трансформаторот S_n се дефинира со релацијата:

$$S_n = \sqrt{3} \cdot U_{1n} \cdot I_{1n} = \sqrt{3} \cdot U_{2n} \cdot I_{2n} \quad (1.13)$$

и таа е иста и за двете намотки. Одовде следува и односот:

$$I_{1n} / I_{2n} = U_{2n} / U_{1n} \quad (1.14)$$

Големината $u_k\%$ е една од најважните параметри на трансформаторот. Се добива од обидот на куса врска. Таа го дава напонот на куса врска (напон кој што треба да се приложи на една од намотките за струјата низ обете намотки, од кои што втората е кусо врзана, да биде еднаква на номиналната) изразен во проценти од номиналниот напон. Оваа големина се движи во доста широки граници во зависност од големината на трансформаторот. Во следната табела дадени се ориентациони вредности за големината на овој параметар, во зависност од номиналниот напон (на високонапонската страна) на трансформаторот:

$U_n, \text{ kV}$	$u_k, \%$
до 20	3 - 8
20 - 110	9 - 11
над 110	10 - 17

Големината $i_0\%$ претставува струја на празен од изразена во проценти од номиналната струја на трансформаторот. Таа се движи во релативно тесни граници (1 – 3 %) и е помала кај поголемите трансформатори, додека кај современите трансформатори, особено кај оние со големи номинални моќности, таа е најчесто помала и од 1%.

Врз база на номиналните параметри на трансформаторот, може да се одредат и параметрите на неговата еквивалентна шема.

$$Z_T = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \frac{\Omega}{\text{фаза}}, \quad (1.15)$$

$$R_T = \frac{\Delta P_{Cun}}{S_n^2} \cdot \frac{U_n^2}{\Omega} \frac{\Omega}{\text{фаза}}, \quad (1.16)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \frac{\Omega}{\text{фаза}}, \quad (1.17)$$

$$\underline{Z}_T = R_T + jX_T, \quad (1.18)$$

$$Y_T = \frac{i_0 \%}{100} \cdot \frac{S_n}{U_n^2} \frac{\Omega}{\text{фаза}}, \quad (1.19)$$

$$G_T = \frac{\Delta P_{Fe}}{U_n^2} \frac{S}{\text{фаза}}, \quad (1.20)$$

$$B_T = -\sqrt{Y_T^2 - G_T^2} \frac{S}{\text{фаза}} \quad (\text{или } B_T \approx -\frac{\Delta Q_\mu}{U_n^2}), \quad (1.21)$$

$$\underline{Y}_T = G_T + jB_T. \quad (1.22)$$

1.2.2. Тринамотни трансформатори

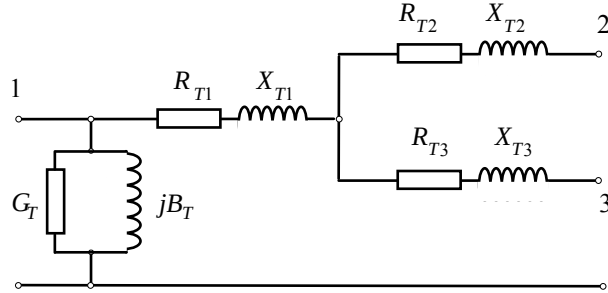
За разлика од претходно разгледуваните, двонамотни, трансформатори, тринамотните трансформатори имаат три намотки, условно наречени примарна (се означува со П или 1), секундарна (С или 2) и терциерна (Т или 3). Тринамотните трансформатори се, за нашите потреби, целосно дефинирани со следните номинални податоци:

$$\begin{aligned} &U_{1n} / U_{2n} / U_{3n} \\ &S_{1n} / S_{2n} / S_{3n} \\ &u_{k12} \% / u_{k13} \% / u_{k23} \% \end{aligned}$$

$$\Delta P_{Cu12} / \Delta P_{Cu13} / \Delta P_{Cu23}$$

$$\Delta P_{Fe}, \Delta Q_{\mu} \text{ и (или) } i_o \text{ \%}.$$

Тринамотниот трансформатор може да се претстави со еквивалентната шема од сликата 1.5.



Слика 1.5. Заменска шема на тринамотен енергетски трансформатор

Компонентите на попречната гранка во шемата G_T и B_T се пресметуваат како и кај двонамотните трансформатори, според релациите (1.19) – (1.22).

Ако ги воведеме следните означувања:

$$S_{12} = \min\{S_{1n}, S_{2n}\}; S_{13} = \min\{S_{1n}, S_{3n}\} \text{ и } S_{23} = \min\{S_{2n}, S_{3n}\},$$

тогаш реактанциите X_{T1} , X_{T2} и X_{T3} на одделните намотки од трансформаторот ги пресметуваме со формулите:

$$\begin{aligned} X_{T1} &= (X_{12} + X_{13} - X_{23})/2; \\ X_{T2} &= (X_{12} + X_{23} - X_{13})/2; \\ X_{T3} &= (X_{13} + X_{23} - X_{12})/2, \end{aligned} \quad (1.23)$$

каде што е:

$$X_{12} = \frac{u_{k12} \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{12}}; X_{13} = \frac{u_{k13} \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{13}} \text{ и } X_{23} = \frac{u_{k23} \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{23}}. \quad (1.24)$$

На сличен начин се пресметуваат и активните отпорности на поедините намотки R_{T1} , R_{T2} и R_{T3} :

$$\begin{aligned} R_{T1} &= (R_{12} + R_{13} - R_{23})/2 \\ R_{T2} &= (R_{12} + R_{23} - R_{13})/2 \\ R_{T3} &= (R_{13} + R_{23} - R_{12})/2. \end{aligned} \quad (1.25)$$

каде што:

$$R_{12} = \Delta P_{Cu12} \cdot \frac{U_n^2}{S_{12}^2}; R_{13} = \Delta P_{Cu13} \cdot \frac{U_n^2}{S_{13}^2} \text{ и } R_{23} = \Delta P_{Cu23} \cdot \frac{U_n^2}{S_{23}^2}. \quad (1.26)$$

Во сите равенки за пресметување на параметрите на еквивалентната шема на трансформаторот, фигурира големината U_n . Големината U_n претставува номинален напон на онаа намотка од трансформаторот, на чија што страна ги сведуваме параметрите на трансформаторот.

Задача 1.11. За трансформаторот СН/НН од 630 kVA, производ на "ЕМО" – Охрид, познати се следните технички податоци:

- номинален преносен однос $U_{1n}/U_{2n} = 10/0,4$ kV,
- номинална моќност $S_n = 630$ kVA,
- загуби во обидот на празен од $\Delta P_0 = \Delta P_{Fe} = 1300$ W,
- загуби во обидот на куса врска $\Delta P_k = 6500$ W,
- струја на празен од $i_0\% = 1,8\%$,
- напон на куса врска $u_k\% = 4\%$.

Трансформаторот работи со својот номинален преносен однос:

$$k_T = k_{Tn} = \frac{W_{1n}}{W_{2n}} = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} = \frac{10,0}{0,4} = 25$$

Потребно е да се пресметаат:

- а) Параметрите на Г–заменската шема на трансформаторот, сведени на примарна (10 kV) страна.
- б) Параметрите на Г–заменската шема на трансформаторот, сведени на секундарна (0,4 kV) страна.
- в) Загубите на активна и реактивна моќност и колкав е напонот на секундарот, во режим на празен од на трансформаторот, ако напонот на примарната страна изнесува $U_1 = 10$ kV.
- г) Загубите на активна и реактивна моќност и колкав е напонот на секундарот во режим на празен од на трансформаторот, ако напонот на примарната страна изнесува $U_1 = 10,5$ kV.

Решение:

а) *Параметри на трансформаторот, сведени на примарна страна:*

Параметрите од заменската шема на трифазниот трансформатор се однесуваат на една од фазите. Тие имаат димензија $\Omega/\text{фаза}$ или $S/\text{фаза}$. Бидејќи сите елементи од електроенергетскиот систем (ЕЕС) се трифазни, а пресметките на параметрите на нивните заменски шеми се однесуваат на една од фазите, од сега па натаму, од разбирливи причини, ќе ја испуштаме ознаката "/фаза".

$$U_n = 10 \text{ kV} = 10 \cdot 10^3 \text{ V},$$

$$G_T = \frac{\Delta P_{Fe}}{U_n^2} \approx \frac{\Delta P_0}{U_n^2} = \frac{1300}{(10000)^2} = 13 \mu S,$$

$$B_T \approx -Y_T = -\frac{i_0\%}{100} \cdot \frac{S_n}{U_n^2} = -\frac{1,8}{100} \cdot \frac{630 \cdot 10^3}{(10000)^2} = -113,4 \mu S,$$

$$R_T = \Delta P_{Cun} \cdot \frac{U_n^2}{S_n^2} \approx \Delta P_k \cdot \frac{U_n^2}{S_n^2} = 6500 \cdot \frac{(10 \cdot 10^3)^2}{(630 \cdot 10^3)^2} = 1,638 \Omega,$$

$$Z_T = \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{4}{100} \cdot \frac{(10 \cdot 10^3)^2}{630 \cdot 10^3} = 6,349 \Omega,$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{6,349^2 - 1,637^2} = 6,134 \Omega,$$

$$\underline{Z}_T = R_T + jX_T = (1,338 + j6,134) \Omega.$$

б) *Параметри на трансформаторот, сведени на секундарна страна*

На сосема идентичен начин се добиваат вредностите на параметрите R_T , X_T , G_T и B_T , сведени на нисконапонската ($U_n = 0,4$ kV) страна. Разликата е во тоа што сега, во изразите

(1.15) . . . (1.20) за вредноста на номиналниот напон U_n се заменува вредноста $U_n = 400 \text{ V}$. На тој начин се добива:

$$U_n = 0,4 \text{ kV}; \quad G_T = 8,125 \mu\text{S}; \quad B_T = -70,875 \mu\text{S}; \quad R_T = 2,62 \text{ m}\Omega; \quad X_T = 9,814 \text{ m}\Omega.$$

в) Загуби во празен од, при $U_1 = 10 \text{ kV}$:

$$\Delta P = G_T \cdot U_1^2 = 13 \cdot 10^{-6} \cdot (10 \cdot 10^3)^2 = 1300 \text{ W} = 1,3 \text{ kW}$$

$$\Delta Q = B_T \cdot U_1^2 = 113,4 \cdot 10^{-6} \cdot (10 \cdot 10^3)^2 = 11340 \text{ var} = 11,34 \text{ kvar}$$

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{W_2}{W_1} = U_1 \cdot \frac{U_{2n}}{U_{1n}} = 10 \cdot \frac{0,4}{10} = 0,4 \text{ kV}$$

в) Загуби во празен од, при $U_1 = 10,5 \text{ kV}$:

$$\Delta P = G_T \cdot U_1^2 = 13 \cdot 10^{-6} \cdot (10,5 \cdot 10^3)^2 = 1433 \text{ W} = 1,433 \text{ kW}$$

$$\Delta Q = B_T \cdot U_1^2 = 113,4 \cdot 10^{-6} \cdot (10,5 \cdot 10^3)^2 = 12502 \text{ var} = 12,5 \text{ kvar}.$$

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{W_2}{W_1} = U_1 \cdot \frac{U_{2n}}{U_{1n}} = 10,5 \cdot \frac{0,4}{10} = 0,42 \text{ kV}.$$

□ □ □

Задача 1.12: Да се определат параметрите на Г-еквивалентната шема на трансформаторот, за кој се познати следните номинални податоци:

$$S_n = 31,5 \text{ MVA}; \quad U_{1n}/U_{2n} = 38,5/121 \text{ kV/kV}; \quad u_k\% = 10,5\%; \quad \Delta P_{Fe} = 73 \text{ kW}; \quad \Delta P_{Cun} = 180 \text{ kW}; \quad i_0\% = 2,7\%$$

Решение:

Ќе вршиме сведување на параметрите на високонапонска (ВН) страна, т.е. $U_n = 121 \text{ kV}$. Доколку напоните и моќностите во формулите (1.15) . . . (1.20) ги заменуваме во единиците kV и MVA, како што е тоа направено во овој пример, тогаш вредностите на параметрите на елементите ќе ги добиваме директно во Ω односно S. Според тоа ќе имаме:

$$R_T = \Delta P_{Cun} \cdot \frac{U_n^2}{S_n^2} = 0,18 \cdot \frac{121^2}{31,5^2} = 2,656 \Omega;$$

$$Z_T = \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{121^2}{31,5^2} = 48,803 \Omega;$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{49^2 - 2,66^2} = 48,731 \Omega$$

Параметрите на попречната гранка (наречена гранката на магнетизирање) ќе бидат:

$$G_T = \frac{\Delta P_{Fe}}{U_n^2} \approx \frac{\Delta P_o}{U_n^2} = \frac{0,073}{121^2} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ S} = 5 \mu\text{S},$$

$$Y_T = \frac{i_0\%}{100} \cdot \frac{S_n}{U_n^2} = \frac{2,7}{100} \cdot \frac{31,5}{121^2} = 58 \cdot 10^{-6} \text{ S} = 58 \mu\text{S},$$

$$B_T = -\sqrt{Y_T^2 - G_T^2} = -\sqrt{58^2 - 5^2} \approx -57,875 \cdot 10^{-6} \text{ S} = -57,875 \mu\text{S}.$$

Според тоа, параметрите на Г-заменската шема на трансформаторот, сведени на високонапонската страна, ќе бидат:

$$\underline{Z}_T = R_T + jX_T = (2,656 + j48,803) \Omega;$$

$$\underline{Y}_T = G_T + jB_T = (5 - j57,875) \mu\text{S}.$$

□ □ □

Задача 1.13. Да се одредат параметрите на еквивалентната шема на тринамотниот трансформатор за којшто се познати следните податоци:

$$220/110/35 \text{ kV/kV/kV};$$

$$75/60/25 \text{ MVA/MVA/MVA};$$

$$\Delta P_{Fe} = 190 \text{ kW}; \quad \Delta Q_{\mu} = 2250 \text{ kvar}.$$

$$u_{k12} = 10\%; \quad u_{k13} = 5\%; \quad u_{k23} = 6\%;$$

$$\Delta P_{Cu12} = 620 \text{ kW}; \quad \Delta P_{Cu13} = 90 \text{ kW}; \quad \Delta P_{Cu23} = 106 \text{ kW}.$$

Решение:

Бидејќи се работи за трансформатор, потребно ќе биде да вршиме сведување на неговите параметри. Нека вршиме сведување на 220 kV страна, односно $U_n = 220 \text{ kV}$. Тогаш, ќе имаме:

$$G_T = \frac{\Delta P_{Fe}}{U_n^2} = \frac{0,190}{220^2} = 3,926 \mu\text{S};$$

$$B_T = -\frac{\Delta Q_{\mu}}{U_n^2} = -\frac{2,250}{220^2} = -46,488 \mu\text{S}$$

$$\underline{Y}_T = G_T + jB_T = (3,926 - j46,49) \mu\text{S}.$$

Номиналните моќности на поедините намотки изнесуваат:

$$S_{1n} = 75 \text{ MVA}; \quad S_{2n} = 60 \text{ MVA}; \quad S_{3n} = 25 \text{ MVA}$$

од каде што следува:

$$S_{12} = \min \{ 75, 60 \} = 60 \text{ MVA},$$

$$S_{13} = \min \{ 75, 25 \} = 25 \text{ MVA},$$

$$S_{23} = \min \{ 60, 25 \} = 25 \text{ MVA}.$$

Сега, реактанциите X_{12} , X_{13} и X_{23} и резистанциите R_{12} , R_{13} и R_{23} на одделните намотки од трансформаторот ќе ги пресметаме на следниот начин:

$$X_{13} = \frac{u_{k12} \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{12}} = \frac{10}{100} \cdot \frac{220^2}{60} = 80,67 \Omega;$$

$$X_{13} = \frac{u_{k13} \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{13}} = \frac{5}{100} \cdot \frac{220^2}{25} = 96,80 \Omega;$$

$$X_{23} = \frac{u_{k23} \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{23}} = \frac{6}{100} \cdot \frac{220^2}{25} = 116,16 \Omega.$$

$$X_{T1} = (X_{12} + X_{13} - X_{23})/2 = (80,67 + 96,80 - 116,60) = 30,654 \Omega;$$

$$X_{T2} = (X_{12} + X_{23} - X_{13})/2 = (80,67 + 116,16 - 96,80) = 50,014 \Omega;$$

$$X_{T3} = (X_{13} + X_{23} - X_{12})/2 = (96,80 + 116,16 - 80,67) = 66,147 \Omega.$$

Понатаму имаме:

$$R_{12} = \Delta P_{Cu12} \cdot \frac{U_n^2}{S_{12}^2} = 0,62 \cdot \frac{220^2}{60^2} = 8,336 \Omega;$$

$$R_{13} = \Delta P_{Cu13} \cdot \frac{U_n^2}{S_{13}^2} = 0,09 \cdot \frac{220^2}{25^2} = 6,970 \Omega;$$

$$R_{23} = \Delta P_{Cu23} \cdot \frac{U_n^2}{S_{23}^2} = 0,106 \cdot \frac{220^2}{25^2} = 8,209 \Omega.$$

На сличен начин се пресметуваат и активните отпорности на поедините намотки R_{T1} , R_{T2} и R_{T3} :

$$R_{T1} = (R_{12} + R_{13} - R_{23})/2 = (8,336 + 6,970 - 8,209) = 3,55 \text{ } \Omega;$$

$$R_{T2} = (R_{12} + R_{23} - R_{13})/2 = (8,336 + 8,209 - 6,970) = 4,79 \text{ } \Omega;$$

$$R_{T3} = (R_{13} + R_{23} - R_{12})/2 = (6,970 + 8,209 - 8,336) = 3,42 \text{ } \Omega.$$

Параметрите на еквивалентната шема на тронамотајниот трансформатор, сведена на 220 kV страна, значи, ќе бидат:

$$\underline{Z}_{T1} = (3,55 + j30,654) \text{ } \Omega;$$

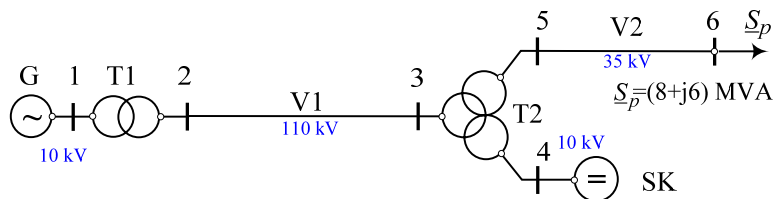
$$\underline{Z}_{T2} = (4,79 + j50,014) \text{ } \Omega;$$

$$\underline{Z}_{T3} = (3,42 + j66,147) \text{ } \Omega;$$

$$\underline{Y}_T = (3,93 - j46,49) \text{ } \mu\text{S}$$

□ □ □

Задача 1.14: 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: $l = 20 \text{ km}$; $\underline{z} = (0,1 + j0,4) \text{ } \Omega/\text{km}$; $\underline{y} = (0,1 + j2,7) \text{ } \mu\text{S}/\text{km}$

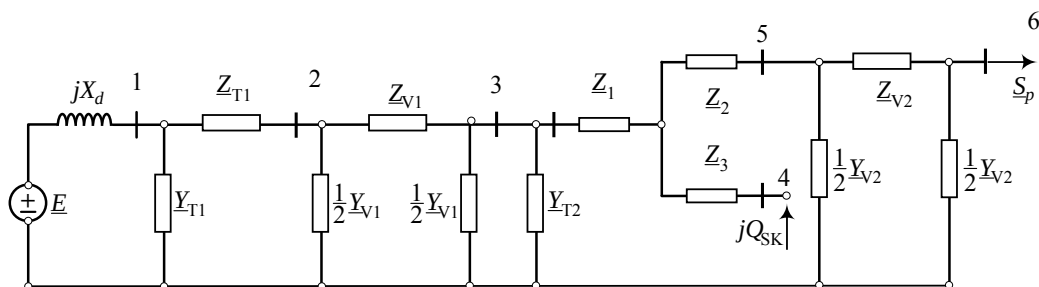
Надземен 35 kV вод V2: $l = 15 \text{ km}$; $\underline{z} = (0,25 + j0,35) \text{ } \Omega/\text{km}$; $\underline{y} = j3,13 \text{ } \mu\text{S}/\text{km}$

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 нй 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:

$$\underline{Z}_{T1} = R_{T1} + jX_{T1} = (2,666 + j41,90) \, \Omega; \quad \underline{Y}_{T1} = G_{T1} + jB_{T1} = (3,4 - j13,88) \, \mu S$$

Вод V1:

$$\underline{Z}_{V1} = \underline{z}_{V1} \cdot l_1 = (0,1 + j0,4) \cdot 20 = (2 + j8) \, \Omega; \quad \underline{Y}_{V1} = \underline{y}_{V1} \cdot l_1 = (0,1 + j2,7) \cdot 20 = (2 + j54) \, \mu S$$

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 нй 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 нй 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 $\underline{Z}_{T1}$ и $\underline{Y}_{T1}$ на трансформаторот ги пресметавме со $U_n = 115 \, \text{kV}$, со тоа ние автоматски ги сведовме на високонапонската страна, така што сега сведувањето 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 $\underline{Z}_{V2}$ и $\underline{Y}_{V2}$ од водот V2 ќе добиеме:

$$\underline{Z}_{V2,sv} = \underline{Z}_{V2} \cdot (110/36,75)^2 = (3,75 + j5,25) \cdot 2,9932^2 = (33,597 + j47,036) \, \Omega,$$

$$\underline{Y}_{V2,sv} = \underline{Y}_{V2} \cdot (36,75/110)^2 = j46,95 \cdot 10^{-6} / 2,9932^2 = j5,24 \cdot 10^{-6} \, \text{S} = j5,24 \, \mu\text{S}.$$

□ □ □

Задача 1.15. 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

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

$$I_{B1} = \frac{S_{B1}}{\sqrt{3} \cdot U_{B1}} = 0,262 \, \text{kA}; \quad Z_{B1} = \frac{U_{B1}^2}{S_{B1}} = 242 \, \Omega; \quad Y_{B1} = \frac{1}{Z_{B1}} = 4,13 \, \text{mS}.$$

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 големина. Новите базни големина 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:

$$I_{B2} = \frac{I_{B1}}{k_2} = \frac{0,262}{0,33409} = 0,7855 \text{ kA} .$$

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:

$$k_4 = k_{T2} = (W_{3n}/W_{1n})_{T2} = 10,5/110 = 0,09545; S_{B4} = S_B = 50 \text{ MVA} ;$$

$$U_{B4} = U_{B1} \cdot k_4 = 110 \cdot 0,09545 = 10,5 \text{ kV} ; I_{B4} = I_{B1} / k_4 = 0,262/0,09545 = 2,775 \text{ kA} ;$$

$$Z_{B4} = Z_{B1} \cdot k_4^2 = 242 \cdot 0,09545^2 = 2,205 \Omega ; Y_{B4} = 1/Z_{B4} = 1/2,205 = 0,45352 \text{ S} .$$

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:

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

Единичната 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 pu параметрите (односно единичните параметри) во заменска та шема на прикажаната мрежа:

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

Понатаму, за трансформаторот T1, чии што параметри $\underline{Z}_{T1}$ и $\underline{Y}_{T1}$ се сведени на 110 kV ниво, ќе имаме:

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

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

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

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

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

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

$$\underline{Z}_{V2 pu} = (0,153 + j0,2143) pu ; \quad \underline{Y}_{V2 pu} = j1,1503 \cdot 10^{-3} pu ;$$

$$\underline{Y}_{T1 pu} = (1,602 - j17,199) \cdot 10^{-3} pu ; \quad \underline{Z}_1 pu = (0,017 + j0,337) pu$$

$$\underline{Z}_2 pu = (0,010 - j0,212) pu ; \quad \underline{Z}_3 pu = (0,031 + j0,041) pu$$

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

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

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

□ □ □

Задача 1.16. За мрежата прикажана на сликата да се нацрта заменската шема и да се изврши сведување на нејзините параметри на 10 kV напонско ниво.

Податоци за елементите на мрежата:

T1 и T2: 25 MVA; 110/10,5 kV /kV; $u_k\% = 11\%$; $\Delta P_{Cun} = 130$ kW; $\Delta P_{Fe} = 30$ kW; $i_0\% = 1\%$.

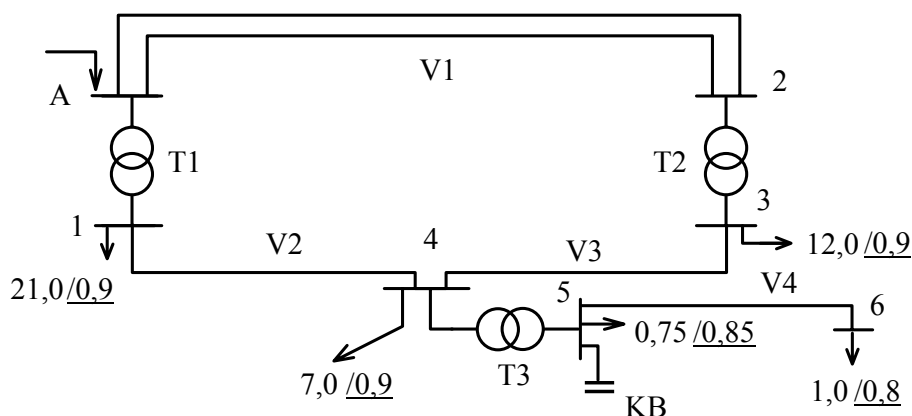
T3: 2x1 MVA; 10/0,4 kV/kV; $u_k\% = 6\%$; $\Delta P_{Cun} = 24$ kW; $\Delta P_{Fe} = 5,5$; $i_0\% = 0,7\%$.

V1: Al/Č 240/40 mm²; $D_m = 5$ m; $l_1 = 25$ km.

V2 и V3: Al/Č 95/15 mm²; $D_m = 1$ m; $l_2 = 10$ km; $l_3 = 5$ km.

V4: НН кабелски вод $\underline{z} = (0,124 + j0,06) \Omega/\text{km}$; $l_4 = 0,3$ km.

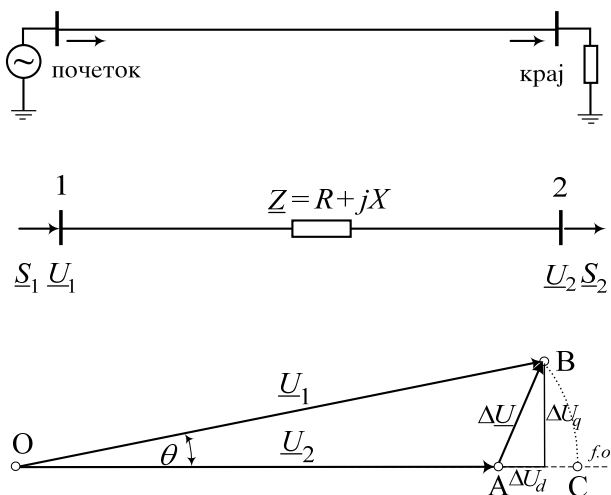
KB: $Q_{KB} = 0,5$ Mvar.



□ □ □

2 ПРЕСМЕТКА НА ОТВОРЕНИ (РАДИЈАЛНИ) МРЕЖИ

2.1. ЗАГУБА НА НАПОН И ЗАГУБА НА МОЌНОСТ ВО ТРИФАЗЕН ВОД



Слика 2.1. Шематски приказ на трифазен вод и негов фазорски дијаграм

Водот претставува четворопол со два пристапа. Оној пристап каде што се наоѓа изворот на моќност се нарекува *почеток на водот* (sending end), додека другиот, на којшто е приклучен потрошувачот се нарекува *крај на водот* (receiving end).

На сликата 2.1 (горе) е прикажан вод упросто, само со неговата редната импеданција $Z = (R + jX)$. Водот е оптоварен на крајот со потрошувач кој зема моќност $S_2 = (P_2 + jQ_2)$ при напон U_2 . Напонот U_1 и моќноста S_1 на почетокот на водот, во општ случај, се разликуваат од напонот U_2 и моќноста S_2 на неговиот крај, т.е.

$$U_1 = U_2 + \Delta U \quad (2.1)$$

$$S_1 = S_2 + \Delta S \quad (2.2)$$

Величината ΔU што фигурира во релацијата (2.1) и која претставува разлика на комплексните претставници на напоните U_1 и U_2 се нарекува *пад на напон во водот*. Величината ΔS што фигурира во релацијата (2.2) претставува разлика помеѓу моќноста што се испраќа на почетокот S_1 и моќноста S_2 што пристигува на крајот од водот. Таа се нарекува *загуба на моќност во водот*. Кога се зема предвид и капацитивноста на водот, тогаш загубата на моќност во водот ΔS ќе биде еднаква на загубата ΔS_Z во редната гранка, намалена за реактивната моќност Q_C произведена од погонскиот капацитет на водот.

Овие две величини можат да се изразат и преку приликите S_1 и U_1 на почетокот од водот:

$$\Delta U = \Delta U_d + j\Delta U_q = \frac{P_1 \cdot R + Q_1 \cdot X}{U_1^*} + j \frac{P_1 \cdot X - Q_1 \cdot R}{U_1^*}, \quad (2.3)$$

$$\Delta S_Z = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} \cdot (R + jX), \quad (2.4)$$

$$\Delta S = \Delta S_Z - jQ_C = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} \cdot (R + jX) - j \frac{B}{2} \cdot (U_1^2 + U_2^2). \quad (2.4a)$$

Но исто така тие две величини можат да се изразат и преку приликите S_2 и U_2 на крајот од водот:

$$\Delta \underline{U} = \Delta U_d + j\Delta U_q = \frac{P_2 \cdot R + Q_2 \cdot X}{\underline{U}_2^*} + j \frac{P_2 \cdot X - Q_2 \cdot R}{\underline{U}_2^*} \quad (2.5)$$

$$\Delta \underline{S}_Z = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} \cdot (R + jX) \cdot \quad (2.6)$$

$$\Delta \underline{S} = \Delta \underline{S}_Z - jQ_C = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} \cdot (R + jX) - j \frac{B}{2} \cdot (U_1^2 + U_2^2) \cdot \quad (2.6a)$$

Како што гледаме, загубата на моќност во редната гранка $\Delta \underline{S} = (\Delta P + j\Delta Q)$ зависи од моќноста на потрошувачот. Таа, значи, може да се изрази или преку приликите на почетокот (P_1 , Q_1 и U_1) или преку приликите на крајот од водот (P_2 , Q_2 и U_2).

Слично, падот на напон $\Delta \underline{U}$ исто така зависи од оптоварувањето и може да се изрази било преку приликите на почетокот (P_1 , Q_1 и U_1), било преку приликите на крајот (P_2 , Q_2 и U_2) на водот.

Разликата на ефективните вредности (модулите) на напоните $\underline{U}_1$ и $\underline{U}_2$ се вика *загуба на напон* во водот:

$$\Delta U = |\underline{U}_1| - |\underline{U}_2| = U_1 - U_2 \quad (2.7)$$

Во согласност со фазорскиот дијаграм на напони од сликата 2.1 се добива релацијата:

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U_d)^2 + \Delta U_q^2} = (U_2 + \Delta U_d) \cdot \sqrt{1 + \frac{\Delta U_q^2}{(U_2 + \Delta U_d)^2}} \quad (2.8)$$

или приближно:

$$U_1 \approx U_2 + \Delta U_d + \frac{\Delta U_q^2}{2 \cdot (U_2 + \Delta U_d)} \approx U_2 + \Delta U_d + \frac{\Delta U_q^2}{2 \cdot U_n} \quad (2.9)$$

Кај нисконапонските и среднонапонските водови ($U_n \leq 35$ kV), вклучувајќи ги тука и 110 kV надземни водови, односот $\Delta U_q / U_2 \ll 1$ и членот $(\Delta U_q / U_2)^2$ слободно може да се занемари. На тој начин, за загубата на напон (со голема точност) можеме да напишеме:

$$\Delta U = U_1 - U_2 \approx \Delta U_d = \frac{P_1 \cdot R + Q_1 \cdot X}{U_1} = \frac{P_2 \cdot R + Q_2 \cdot X}{U_2} \cdot \quad (2.10)$$

Бидејќи во нормалните режими на работа напоните во јазлите на електричните мрежи малку се разликуваат од својата номинална вредност, често пати, кога точноста на пресметките не е особено важна, се служиме и со следните упростени формули за пресметување на загубите на напон и моќност во електричен вод:

$$\Delta U \approx \frac{P_1 \cdot R + Q_1 \cdot X}{U_n} \quad \text{или} \quad \Delta U \approx \frac{P_2 \cdot R + Q_2 \cdot X}{U_n} \quad (2.11)$$

$$\Delta \underline{S} = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_n^2} \cdot (R + jX) \quad \text{или} \quad \Delta \underline{S} = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_n^2} \cdot (R + jX) \quad (2.12)$$

Вкупните загуби на моќност во водот $\Delta \underline{S}_V$ ќе се добијат кога од загубите $\Delta \underline{S}_Z$ во импеданцијата на водот $\underline{Z}$ се одземе генерираната капацитивна моќност на водот $Q_C \approx B \cdot U_n^2$:

$$\Delta \underline{S}_V \approx \Delta \underline{S}_Z - jB \cdot U_n^2 \approx \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_n^2} \cdot (R + jX) - jB \cdot U_n^2 \quad \text{или:} \quad (2.13)$$

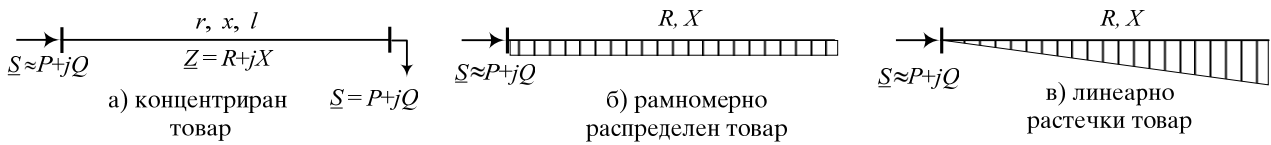
$$\Delta \underline{S}_V \approx \Delta \underline{S}_Z - jB \cdot U_n^2 \approx \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_n^2} \cdot (R + jX) - jB \cdot U_n^2.$$

2.2. ЗАГУБА НА НАПОН И ЗАГУБА НА МОЌНОСТ ВО СН И НН ВОДОВИ

При пресметувањето на СН и НН ($U_n \leq 35$ kV) водови се дозволени следните упростувања:

- бидејќи реактивната моќност генерираната од капацитноста на водовите е мала и изнесува само неколку проценти од реактивната моќност на товарот, се занемарува влијанието на капацитивноста на водовите;
- при пресметките на напонските прилики во мрежата се занемарува влијанието на попречната компонента на падот на напон, т.е. се зема дека е $\Delta U_q \approx 0$. Тоа дозволува загубата на напон и падот на напон во водот да се изедначат а фазорите на напоните во мрежата да се третираат како колинеарни вектори;
- Напонските прилики кај СН мрежи, а особено кај НН мрежи, заради построгите критериуми за квалитет на испорачаната електрична енергија на потрошувачите, треба да бидат контролирани така што напоните во било која точка од мрежата се движат во тесен интервал околу неговата номинална вредност (нпр. $U_n \pm 5\% \cdot U_n$), Тргувајќи од тој факт пресметките можат да се вршат упростено, со претпоставката $U \approx U_n$.

Се посматра вод со должина l и со параметри на редната гранка $R = r \cdot l$ и $X = x \cdot l$, со вкупно (сумарно оптоварување) $\underline{S} = (P+jQ)$. Врз основа на општите изрази (2.1) ... (2.13), уважувајќи ги притоа упростувањата изложени во оваа точка, се добиваат следните приближни изрази за пресметување на загубата на напон ΔU и загубата на моќност ΔP во НН и СН водови за неколку специфични случаи што се јавуваат во практиката, означени на долната слика со а) б) и в):



Слика. Три случаи на оптоварување на еден магистрален НН вод

а) Товарот $\underline{S} = (P+jQ)$ е концентриран на крајот од водот.

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_n} = \frac{P \cdot r + Q \cdot x}{U_n} \cdot l = P \cdot l \cdot \frac{r + x \cdot \operatorname{tg} \varphi}{U_n}, \quad (2.14)$$

$$\Delta U \% = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100 = P \cdot l \cdot \frac{100 \cdot (r + x \cdot \operatorname{tg} \varphi)}{U_n} = \frac{P \cdot l}{M}, \quad (2.15)$$

$$\text{каде што е: } M = \frac{U_n^2}{100 \cdot (r + x \cdot \operatorname{tg} \varphi)}. \quad (2.16a)$$

Кога моќноста P се изразува во kW, должината l во km и напонот U_n во kV, тогаш константата M се пресметува со изразот (2.26б):

$$M = \frac{10 \cdot U_n^2}{r + x \cdot \operatorname{tg} \varphi}. \quad (2.16б)$$

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U_n^2} \cdot R = \frac{P^2 \cdot R}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi} = \frac{P^2 \cdot R}{U_n^2} \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi), \quad (2.17)$$

$$\Delta P \% = \frac{\Delta P}{P} \cdot 100 = \frac{100 \cdot P \cdot R}{U_n^2} \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi); \quad (2.18)$$

$$\frac{\Delta P \%}{\Delta U \%} = \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}{1 + (x/r) \cdot \operatorname{tg} \varphi}. \quad (2.19)$$

б) Товаро̄ $\underline{S} = (P+jQ)$ е рамномерно рас̄ределен њо должина̄та на водо̄т.

$$\Delta U = \frac{1}{2} \cdot \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_n} = \frac{P \cdot l}{2} \cdot \frac{r + x \cdot \operatorname{tg} \varphi}{U_n}, \quad (2.20)$$

$$\Delta U \% = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100 = \frac{P \cdot l}{2} \cdot \frac{100 \cdot (r + x \cdot \operatorname{tg} \varphi)}{U_n} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P \cdot l}{M}, \quad (2.21)$$

$$\Delta P = \frac{1}{3} \cdot \frac{P^2 + Q^2}{U_n^2} \cdot R = \frac{1}{3} \cdot \frac{P^2 \cdot R}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi} = \frac{P^2 \cdot R}{3 \cdot U_n^2} \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi), \quad (2.22)$$

$$\Delta P \% = \frac{\Delta P}{P} \cdot 100 = \frac{100 \cdot P \cdot R}{3 \cdot U_n^2} \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi); \quad (2.23)$$

$$\frac{\Delta P \%}{\Delta U \%} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}{1 + (x/r) \cdot \operatorname{tg} \varphi}. \quad (2.24)$$

в) Товаро̄ $\underline{S} = (P+jQ)$ е со линеарно рас̄тешка рас̄ределба њо должина̄та на водо̄т.

$$\Delta U = \frac{2}{3} \cdot \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_n} = \frac{2}{3} \cdot \frac{r + x \cdot \operatorname{tg} \varphi}{U_n} \cdot P \cdot l, \quad (2.25)$$

$$\Delta U \% = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100 = \frac{2}{3} \cdot \frac{100 \cdot (r + x \cdot \operatorname{tg} \varphi)}{U_n} \cdot P \cdot l = \frac{2}{3} \cdot \frac{P \cdot l}{M}, \quad (2.26)$$

$$\Delta P = \frac{8}{15} \cdot \frac{P^2 + Q^2}{U_n^2} \cdot R = \frac{8}{15} \cdot \frac{P^2 \cdot R}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi} = \frac{8}{15} \cdot \frac{P^2 \cdot R}{U_n^2} \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi), \quad (2.27)$$

$$\Delta P \% = \frac{\Delta P}{P} \cdot 100 = \frac{800 \cdot P \cdot R}{15 \cdot U_n^2} \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi); \quad (2.28)$$

$$\frac{\Delta P \%}{\Delta U \%} = \frac{4}{5} \cdot \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}{1 + (x/r) \cdot \operatorname{tg} \varphi}. \quad (2.29)$$

2.3. ЗАГУБА НА НАПОН И ЗАГУБА НА МОЌНОСТ ВО РАЗГРАНАТИ ОТВОРЕНИ СН И НН МРЕЖИ

Пресметката на режимот на работа на една мрежа се врши, во принцип, заради исполнување на една од следните две задачи:

1) Задача: утврдување на прифатливоста на режимот на работа на една мрежа. Во овој случај станува збор за зададена конкретна мрежа со точно дефинирани параметри (должини и пресеци на водовите, номинални моќности на трансформаторите и сл.) и за прецизно дефиниран конзум, т.е. потрошувачи со точно дефинирани локации и моќности. Кај ваквата задача најчесто се бара да се утврди:

- дали струите во гранките од мрежата се под своите максимални вредности (задоволување на термичкиот критериум);
- дали напоните во одделните потрошувачки јазли се наоѓаат во однапред специфицираните граници со што се обезбедува определен квалитет на напонот при испораката на електричната енергија (задоволување на напонскиот критериум, т.е. критериумот за квалитет);
- колкави се загубите на моќност во мрежата (задоволување на критериумот за економичност);
- да се направи проценка на годишните загуби на електрична енергија во мрежата (повторно задоволување на критериумот за економичност/рентабилност).

2 Задача: избор (димензионирање) на пресеците на одделните делници од мрежата при точно дефиниран конзум и точно дефинирана топологија и структура на самата мрежа. Овде, пак, станува збор за некоја идна мрежа којашто допрва ќе се гради. Таа ќе треба да напојува некој иден конзум. Кај оваа задача се воведуваат и определени услови и ограничувања кои ќе овозможат со изборот на параметрите на мрежата да се постигнат некои дополнителни критериуми односно цели. Најчесто се бара, безусловно, да биде задоволен критериумот за квалитет на испорачаната електрична енергија којшто се исполнува преку задоволување на напонскиот критериум ($\Delta U \leq \Delta U_{doz}$). Честопати се воведуваат и дополнителни критериуми каков што е, на пример, критериумот за минимални инвестиции за новата мрежа, критериумот за минимални загуби на моќност и енергија во мрежата, критериумот на константен пресек на водовите од мрежата и слично.

Дистрибутивните мрежи за коишто овде станува збор се најчесто големи по обем, разгранети и отворени. Отворена мрежа се нарекува онаа мрежа која што не содржи ниту една контура. Такви се најчесто нисконапонските (НН) и среднонапонските (СН) дистрибутивни и индустриски мрежи. Тие се, по правило, и доста разгранети. Основна одлика на разгранетите среднонапонски и нисконапонски мрежи е таа што се тие составени од водови со релативно мали должини и од нив се напојува поголем број потрошувачи. Како илустрација ќе го наведеме податокот дека, на пример, во скопската СН дистрибутивна мрежа во 2005 година постојеа околу 2800 трансформаторски станици СН/НН. Од друга страна секоја таква трансформаторска станица (ТС), за СН дистрибутивна мрежа претставува "потрошувач", а самата ТС СН/Н, пак, напојува сопствена НН мрежа (0,4 kV) која може да се состои од десетици па и стотици локални НН потрошувачи, што значи дека вкупниот број потрошувачи во целата скопска дистрибутивна мрежа изнесува неколку десетици илјади.

Во случаите кога станува збор за една дистрибутивна мрежа со поголем број гранки и јазли многу е непрактично, дури и неможно, пресметките на разните режими на работа на таквите мрежи да се вршат со висока точност и со висок степен на детаљизација, како што тоа вообичаено се прави кај ВН преносни водови и мрежи. Затоа за ваквиот тип мрежи во практиката се развиени и се користат специјални постапки со кои се дозволуваат низа упростувања и занемарувања, без тоа значително да се одрази врз точноста на пресметките.

Повеќето од тие занемарувања и упростувања се веќе изложени во претходната точка 2.2, а овде ќе биде наведена уште една. Определувањето на распределбата на моќностите во ваквите мрежи може да се врши само врз основа на моќностите на потрошувачите, без да се води сметка за загубите на моќност во оделните нејзини елементи. Значи, тргнувајќи од претпоставката (или поточно кажано апроксимацијата) $U \approx U_n$, директно, од примената на I Кирхофов закон за струи за одделните јазли во мрежата, произлегува дека пресметката на моќноста низ некоја гранка од мрежата се сведува на директно сумирање на моќностите на сите потрошувачи што се напојуваат преку таа гранка.

Сите наведени упростувања овозможуваат развивање на специјални методи за решавање на ваквите мрежи кои значително ја олеснуваат пресметковната процедура без тоа во голема мера да влијае врз точноста на пресметките.

А) ЗАДАЧИ ОД ОБЛАСТА НА ПРЕНОСНИТЕ ВОДОВИ

Задача 2.1. Се посматра 110 kV вод долг $l=100$ km, со подолжни параметри: $z=(0,13+j0,4) \Omega/\text{km}$ и $y=j2,75 \mu\text{S}/\text{km}$. Водот е оптоварен на крајот со потрошувач чија моќност изнесува $\underline{S}_2 = (P_2 + jQ_2) = (30 + j10) \text{ MVA}$ и притоа напонот при потрошувачот изнесува $U_2 = 110 \text{ kV}$.

Да се пресметаат приликите на почетокот од водот $U_1 = ?$ $P_1 = ?$ и $Q_1 = ?$.

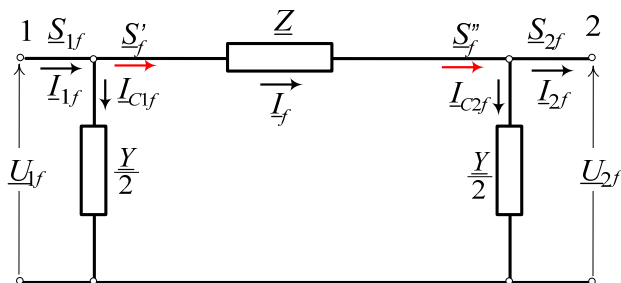
Решение:

Задачата ќе ја решиме на два начина: најнапред со помош на монофазната (еднополната) π -заменска шема, а потоа со помош на т.н. метод на "биланси на моќности", користејќи ги притоа релациите (2.5) и (2.6).

Со оглед на тоа дека се работи за вод со нормална должина ($l < 250 \text{ km}$), параметрите на π -заменската шема на водот се пресметуваат со слеените равенки:

$$R = r \cdot l = 0,13 \cdot 100 = 13 \Omega; \quad X = x \cdot l = 0,40 \cdot 100 = 40 \Omega; \quad (B/2) = 0,5 \cdot b \cdot l = 137,5 \mu\text{S}.$$

a) Решавање на водот со помош на еднофазната π -заменска шема



Слика 2.1.1. π -заменска шема на водот

Ефективната вредност на фазниот напон на крајот од водот ќе биде:

$$U_{2f} = U_2 / \sqrt{3} = 110 / \sqrt{3} = 63,508 \text{ kV}.$$

Трифазната привидна моќност на потрошувачот S_2 ќе биде:

$$S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2} = \sqrt{30^2 + 10^2} = 31,623 \text{ MVA}.$$

Аргументот φ_2 на моќноста $\underline{S}_2$ кој е наедно и агол помеѓу фазорите $\underline{U}_{2f}$ и $\underline{I}_{2f}$ ќе биде:

$$\varphi_2 = \arctg \frac{Q_2}{P_2} = \arctg \frac{10}{30} = 18,435^\circ \Rightarrow \cos \varphi_2 = 0,949 \text{ и } \sin \varphi_2 = 0,316.$$

Ефективната вредност на фазната струја (а тоа ќе биде наедно и на линиската струја) на крајот од водот ќе биде:

$$\underline{S}_2 = 3 \cdot \underline{U}_{2f} \cdot \underline{I}_{2f}^* \Rightarrow \underline{I}_{2f} = \frac{\underline{S}_2}{3 \cdot \underline{U}_{2f}};$$

$$\underline{S}_2 = \frac{31,623 \cdot 10^6}{3 \cdot 63,508 \cdot 10^3} = 166 \text{ A} \equiv 0,166 \text{ kA}.$$

За полесно натамошно пресметување, ќе го поставиме фазорот $\underline{U}_{2f}$ на фазната оска, т.е:

$$\underline{U}_{2f} = U_{2f} \cdot e^{j0} = U_{2f} \angle 0^\circ \text{ kV} = (63,508 + j0) \text{ kV}.$$

Тогаш, за струјата $\underline{I}_{2f}$ ќе добиеме:

$$\underline{I}_{2f} = I_{2f} \cdot e^{-j\varphi_2} = I_{2f} \cdot (\cos \varphi_2 - j \sin \varphi_2) = (0,158 - j0,052) \text{ kA}.$$

Понатаму, струјата I_{C2} низ попречната гранка на крајот од водот ќе биде:

$$I_{C2} = \frac{Y}{2} \cdot U_{2f} = j137,5 \cdot 10^{-6} \cdot 63,508 \cdot 10^3 = j9 \text{ A} = j0,009 \text{ kA}.$$

Струјата I_f низ редната гранка од водот, во согласност со I Кирхофов закон за струи за јазолот "2", ќе биде:

$$I_f = I_{2f} + I_{C2f} = (0,158 - j0,052) + j0,009 = (0,158 - j0,043) \text{ kA}.$$

Падот на напон ΔU во редната гранка од π -заменската шема на водот ќе биде:

$$\Delta U_f = Z \cdot I_f;$$

$$\Delta U_f = (13 + j40) \cdot (0,158 - j0,043) = (3,797 + j5,730) \text{ kV}.$$

$$U_{1f} = U_{2f} + \Delta U_f = (67,306 + j5,730) \text{ kV},$$

$$U_1 = \sqrt{3} \cdot U_{1f} = (116,577 + j9,924) \text{ kV} = 117 \angle 4,866^\circ \text{ kV}.$$

Струјата I_{C1} низ првата напречна гранка од водот ќе биде:

$$I_{C1} = (Y/2) \cdot U_{1f} = j137,5 \cdot 10^{-6} \cdot (67,284 + j5,761) \cdot 10^3 = (-0,8 + j9,3) \text{ A} \approx j0,009 \text{ kA}.$$

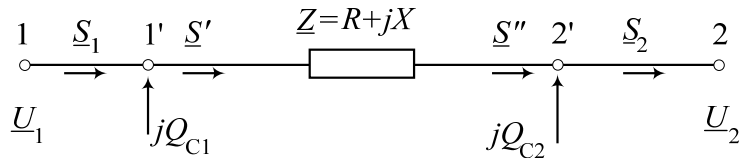
$$I_{1f} = I_{12f} + I_{C1f} = (0,158 - j0,043) + j0,01 = (0,157 - j0,034) \text{ kA}.$$

$$S_1 = 3 \cdot U_{1f} \cdot I_{1f}^* = 3 \cdot (67,306 + j5,730) \cdot (0,157 - j0,034)^* = (31,042 + j9,659) \text{ MVA}.$$

Значи, бараните величини ќе бидат:

$$U_1 = 117 \cdot e^{j4,866^\circ} \text{ kV}; \quad P_1 = 31,042 \text{ MW}; \quad Q_1 = 9,659 \text{ Mvar}.$$

б) Решавање на водот со методот на биланси на моќности



Слика 2.1.2. Решавање на водот со помош на методот на биланс на моќности

Реактивната моќност Q_{C2} што ја генерира капацитивната попречна гранка на крајот од водот ќе биде:

$$Q_{C2} = (B/2) \cdot U_2^2 = 137,5 \cdot 10^{-6} \cdot 110^2 \cdot 10^6 = 1,664 \text{ Mvar}.$$

Од билансот на моќностите (I Кирхофов закон за моќности) за јазелот "2'" добиваме:

$$S'' = S_2 - jQ_{C2} = (30 + j10) - j1,664 = (30 + j8,336) \text{ MVA}.$$

Загубата на моќност ΔS во импеданцијата Z на водот ќе биде:

$$\Delta S = \frac{P''^2 + Q''^2}{U_2^2} \cdot (R + jX) = \frac{30^2 + 8,336^2}{110^2} \cdot (13 + j40) = (1,042 + j3,205) \text{ MVA}.$$

Загубата на напон ΔU во импеданцијата на водот Z ќе биде:

$$\Delta U = \Delta U_d + j\Delta U_q = \frac{P'' \cdot R + Q'' \cdot X}{U_2^*} + j \frac{P'' \cdot X - Q'' \cdot R}{U_2^*}; \quad \Delta U = (6,577 + j9,924) \text{ kV}.$$

$$U_1 = U_2 + \Delta U = (110 + j0) + (6,577 + j9,924);$$

$$U_1 = (116,577 + j9,924) \text{ kV} = 117 \angle 4,866^\circ \text{ kV}.$$

$$\underline{S}' = \underline{S}'' + \Delta \underline{S} = (30 + j8,336) + (1,042 + j3,205) = (31,042 + j11,541) \text{ MVA}.$$

Моќноста $\underline{S}_1$ што изворот му ја предава на водот на неговиот почетокот ќе биде:

$$Q_{C1} = (B/2) \cdot U_1^2 = 1,882 \text{ Mvar};$$

$$\underline{S}_1 = \underline{S}' - jQ_{C1} = (31,042 + j11,541) - j1,882 = (31,042 + j9,659) \text{ MVA}.$$

Значи, решението гласи:

$$\underline{U}_1 = 117 \angle 4,866^\circ \text{ kV}; \quad P_1 = 31,042 \text{ MW}; \quad Q_1 = 9,659 \text{ Mvar}.$$

За загубите на напон и моќност во водот, според тоа, ќе добиеме:

$$\Delta U = U_1 - U_2 = 117 - 110 = 7 \text{ kV};$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 31,042 - 30 = 1,042 \text{ MW};$$

$$\Delta Q = Q_1 - Q_2 = 9,659 - 10 = -0,341 \text{ Mvar}.$$

*) **Забелешка:** Бидејќи фазните и линиските струи кај трифазните надземни водови се исти ($I_f = I$), од сега па натаму индексот "f" кај струите низ водот најчесто ќе го испуштаме како непотребен.

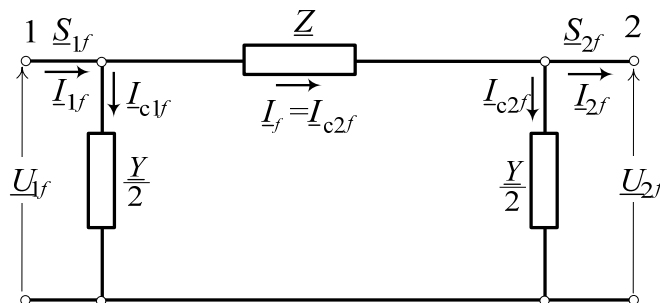
□ □ □

Задача 2.2. Се посматра водот од претходната задача ($l = 100 \text{ km}$; $\underline{z} = (0,13 + j0,4) \Omega/\text{km}$; $\underline{y} = j2,75 \mu\text{S}/\text{km}$). Водот работи во режим на празен од, при што напонот на неговиот почеток изнесува $U_1 = 110 \text{ kV}$.

Со помош на π -еквивалентната шема да се пресмета напонот U_2 на крајот од водот. Колкава е капацитивната моќност Q_{C0} што ја произведува водот во овој режим на работа.

(Во пресметките, активната отпорност на водот да се занемари).

Решение:



Слика 2.2.1. π -заменска шема на водот

За прикажаната π -еквивалентна шема на водот (сл. 2.2.1) можеме да пишуваме:

$$\underline{I}_f = \underline{I}_{c2f} = \frac{\underline{U}_{1f}}{\underline{Z} + 2/\underline{Y}},$$

$$\underline{U}_{2f} = \frac{2}{\underline{Y}} \cdot \underline{I}_{c2f} = \underline{U}_{1f} \cdot \frac{2/\underline{Y}}{\underline{Z} + 2/\underline{Y}} = \underline{U}_{1f} \cdot \frac{1}{1 + \underline{Z} \cdot \underline{Y}/2}$$

$$\underline{U}_{2f} = \frac{63,508}{1 + j40 \cdot j137,5 \cdot 10^{-6}} = 63,86 \text{ kV}; \quad U_2 = \sqrt{3} \cdot U_{2f} = 110,608 \text{ kV}.$$

Понатаму имаме:

$$\underline{I}_{1f} = \underline{I}_{c1f} + \underline{I}_f = \frac{\underline{Y}}{2} \cdot \underline{U}_{1f} + \frac{\underline{U}_{1f}}{\underline{Z} + 2/\underline{Y}} = \frac{\underline{Y}}{2} \cdot \frac{2 + \underline{Z} \cdot \underline{Y}/2}{1 + \underline{Z} \cdot \underline{Y}/2} \cdot \underline{U}_{1f}$$

$$\underline{I}_{1f} = j17,5 \text{ A};$$

$$\underline{S}_1 = 3 \cdot \underline{U}_{1f} \cdot \underline{I}_{1f}^* = (0 - j3,337) \text{ MVA}.$$

Негативниот знак на имагинарниот дел од моќноста $\underline{S}_1$ ни кажува дека фактичката насока на оваа моќност е обратна од означената, т.е. водот произведува реактивна моќност $Q_{C0} = 3,337 \text{ Mvar}$ и му ја предава на изворот приклучен во точката 1.

Забелешка. Доколку во задачата не беше занемарена активната отпорност r на водот, ќе се добиеше практично истиот резултат, со таа разлика што моќноста на почетокот од водот $\underline{S}_1$ ќе имаше и мала активна компонента: $\underline{S}_1 = (0,003 + j3,337) \text{ MVA}$.

□ □ □

Задача 2.3: Да се пресмета влезната импеданција $\underline{Z}_{vl}$ на водот од претходната задача 2.2 ($l = 100 \text{ km}$, $\underline{z} = (0,21 + j0,40) \Omega/\text{km}$, $\underline{y} = j2,75 \mu\text{S}/\text{km}$) кога тој работи во режим на празен од.

Решение:

Во задачата 2.2 беше изведена релацијата помеѓу фазната струја и фазниот напон на почетокот од водот:

$$\underline{I}_{1f} = \frac{\underline{Y}}{2} \cdot \frac{2 + \underline{Z} \cdot \underline{Y}/2}{1 + \underline{Z} \cdot \underline{Y}/2} \cdot \underline{U}_{1f}.$$

Бидејќи влезната адмитанција на водот $\underline{Y}_{vl}$ се дефинира како однос помеѓу струјата $\underline{I}_{1f}$ и напонот $\underline{U}_{1f}$, следува:

$$\underline{Y}_{vl} = \frac{\underline{Y}}{2} \cdot \frac{2 + \underline{Z} \cdot \underline{Y}/2}{1 + \underline{Z} \cdot \underline{Y}/2}; \quad \underline{Z}_{vl} = \frac{1}{\underline{Y}_{vl}} = \frac{2}{\underline{Y}} \cdot \frac{1 + \underline{Z} \cdot \underline{Y}/2}{2 + \underline{Z} \cdot \underline{Y}/2}.$$

Со замена на конкретните вредности за $\underline{Z}$ и $\underline{Y}$, занемарувајќи ја повторно активната отпорност на водот, добиваме:

$$\underline{Y} = jb \cdot l = j275 \cdot 10^{-6} \text{ S}; \quad \underline{Z} = z \cdot l \approx jx \cdot l = j40 \Omega; \quad \underline{Z} \cdot \underline{Y} = -5,5 \cdot 10^{-3}$$

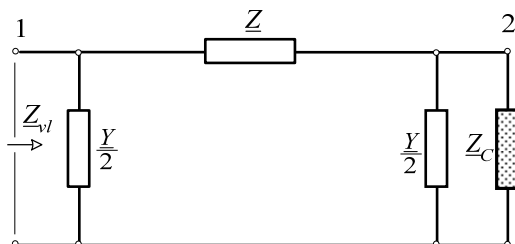
$$\underline{Y}_{vl} = \frac{\underline{Y}}{2} \cdot \frac{2 - 0,0055}{1 - 0,0055} = 1,003 \cdot \underline{Y} = j275,8 \mu\text{S} \quad \underline{Z}_{vl} = \frac{10^6}{j275,8} = -j3626,34 \Omega.$$

Не е на одмет да се забележи дека влезната адмитанција на водот во празен од е практично еднаква на неговата сумарна напречна адмитанција, т.е. $\underline{Y}_{vl} \approx \underline{Y}$ што значи дека влијанието на редната импеданција $\underline{Z}$ при определувањето на $\underline{Y}_{vl}$ е занемарливо мало.

□ □ □

Задача 2.4: Да се пресмета влезната импеданција $\underline{Z}_{vl}$ на водот од задачата 2.2. за случајот кога е тој оптоварен на крајот со трифазен потрошувач чија што импеданција $\underline{Z}_p$ (по фаза) е еднаква на карактеристичната импеданција на водот $\underline{Z}_p = \underline{Z}_C$.

Решение:



Слика 24.1. π -заменска шема на водот затворен со карактеристичната импеданција

Во овој случај ќе имаме:

$$\underline{Z}_C = \sqrt{\frac{\underline{z}}{\underline{y}}} = \sqrt{\frac{(0,13 + j0,40)}{j2,75 \cdot 10^{-6}}} = (386,263 - j61,192) \Omega = 391,08 \cdot e^{-j9,002^\circ} \Omega.$$

Ако со Π го означиме операторот кој ќе означува паралелна врска од две импеданции:

$$\underline{Z}_1 \Pi \underline{Z}_2 = \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2},$$

тогаш врз основа на сликата 2.4.1, за влезната импеданција на водот во дадениот режим можеме да пишуваме:

$$\underline{Z}_{vl} = \frac{2}{\underline{Y}} \Pi \left[\underline{Z} + \underline{Z}_C \Pi \frac{2}{\underline{Y}} \right] = (386,343 - j61,104) = 391,15 \cdot e^{-j8,99^\circ} \Omega \approx \underline{Z}_C.$$

Значи го добивме она што требаше и да го очекуваме бидејќи од теорија на водовите е познато дека кога еден вод ќе се затвори со својата карактеристична импеданција тогаш односот $\underline{U}_f / \underline{I}_f$ во било која точка од водот, па според тоа и односот $\underline{U}_{lf} / \underline{I}_{lf}$ на неговиот почеток, ќе биде еднаков на импеданцијата $\underline{Z}_C$ без оглед на должината на водот.

Малата разлика помеѓу добиената вредност за $\underline{Z}_{vl}$ и очекуваната $\underline{Z}_C$ се должи во основа на нумеричките грешки што се прават при операциите со комплексните броеви поради заокружувањето на броевите т.е. нивното претставување со конечен број децимали.

□ □ □

Задача 2.5. Даден е 110 kV вод, долг $l = 30$ km, со подолжни параметри $\underline{z} = (0,21 + j0,40) \Omega/\text{km}$. Водот е оптоварен на крајот со моќност $\underline{S}_2 = (40 + j20) \text{ MVA}$, а напонот на неговиот почеток изнесува $U_1 = 115 \text{ kV}$.

Да се определат напонот на крајот на водот U_2 , и моќноста на неговиот почеток $\underline{S}_1$ за следните два случаја:

- ако се занемари погонскиот капацитет на водот,
- со уважување на погонскиот капацитет на водот.

Решение:

а) Решавање на водот со занемарување на погонскиот капацитет

Решение може да се добие на два начина. Според првиот начин, за одредување на напонот U_2 ќе се користиме со напонската равенка:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \Delta \underline{U} = \underline{U}_2 + \frac{P_2 \cdot R + Q_2 \cdot X}{\underline{U}_2^*} + j \frac{P_2 \cdot X - Q_2 \cdot R}{\underline{U}_2^*}$$

во која што падот на напон $\Delta \underline{U}$ се изразува преку познатите моќности на крајот од водот. Последната равенка најнапред ја множиме со конјугираната вредност на напонот на крајот $(\underline{U}_2)^*$:

$$\underline{U}_1 \cdot \underline{U}_2^* = [U_2^2 + (P_2 \cdot R + Q_2 \cdot X)] + j[P_2 \cdot X - Q_2 \cdot R]$$

а потоа, со изедначување на модулите на левата и десната страна и нивно квадрирање, ја добиваме следната биквадратна равенка:

$$U_1^2 \cdot U_2^2 = [U_2^2 + (P_2 \cdot R + Q_2 \cdot X)]^2 + [P_2 \cdot X - Q_2 \cdot R]^2.$$

Понатаму, со воведување на смената:

$$v = (U_2 / U_1)^2,$$

ја добиваме следната квадратна равенка:

$$v^2 - v \cdot (1 - 2 \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_1^2}) + \frac{(P_2^2 + Q_2^2) \cdot (R^2 + X^2)}{U_1^4} = 0, \text{ или:}$$

$$v^2 - 0,9259955 \cdot v - 0,00210051 = 0.$$

Решенијата на оваа равенка гласат:

$$v_1 = 0,9233205 \text{ и } v_2 = 0,0022748.$$

Според тоа, разгледуваниот проблем ќе има вкупно четири решенија:

$$U_2 = \pm U_1 \cdot \sqrt{v_1} = \pm 115 \cdot \sqrt{0,9233205} = \pm 110,503 \text{ kV и}$$

$$U_2 = \pm U_1 \cdot \sqrt{v_2} = \pm 115 \cdot \sqrt{0,0022748} = \pm 5,485 \text{ kV.}$$

Од сите четири решенија, единствено можно и логично е првото позитивно решение, односно решението на задачата гласи:

$$U_2 = 110,503 \text{ kV.}$$

Во тој случај, за загубите $\Delta \underline{S}$ и за моќноста $\underline{S}_1$ ќе добиеме:

$$\Delta \underline{S} = \Delta P + j \Delta Q = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} \cdot (R + jX) = (1,032 + j1,966) \text{ MVA}$$

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_2 + \Delta \underline{S} = (41,032 + j21,966) \text{ MVA.}$$

Ако не го земеме превид фактот дека погонскиот капацитет на водот во пресметките е занемарен, ова решение може да се третира како "егзактно" бидејќи е добиено без какво и да е друго занемарување. Но во натамошниот дел од задачата ќе видиме дека кај ВН водови ($U_n \geq 110 \text{ kV}$) погонскиот капацитет на водовите не би требало да се занемарува.

Истиот проблем може да се реши на многу поедноставен начин, ако тргнеме од приближната равенка за пад на напон:

$$U_1 = U_2 + \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} \quad \text{односно} \quad U_2 = U_1 - \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2}$$

во која е занемарена попречната компонента ΔU_q (што може сосема слободно да се направи за сите надземни водови со номинален напон $U_n \leq 110 \text{ kV}$).

Во последната равенка единствена непозната е напонот U_2 . Од неа следува релацијата:

$$U_2^2 = U_1 \cdot U_2 - (P_2 R + Q_2 X),$$

или

$$U_2^2 - U_1 \cdot U_2 + (P_2 R + Q_2 X) = 0.$$

Со замена на конкретните вредности, ќе добиеме:

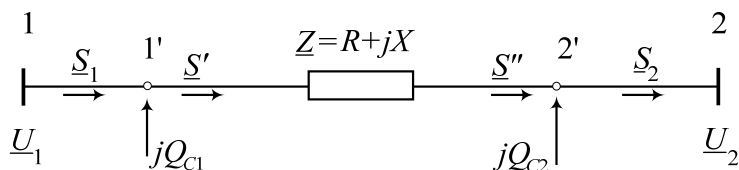
$$U_2^2 - 115 \cdot U_2 + 492 = 0; \Rightarrow U_2 = 110,55 \text{ kV и } U_2 = 4,45 \text{ kV.}$$

Второто решение нема логична смисла, па според тоа, резултатот гласи:

$$U_2 = 110,55 \text{ kV,}$$

што е за само 0,04% поголемо од неговата, условно кажано, "точна" вредност.

б) Решавање на водови со уважување на погонскиот капацитет



Слика 2.5.1.

Во овој случај моќноста $\underline{S}''$ на крајот од редната гранка на водот и моќноста на потрошувачот $\underline{S}_2$ се разликуваат поради инјекцијата на моќност Q_{C2} што ја генерира попречната капацитивна гранка на крајот од водот. Затоа сега решавањето на водот ќе го вршиме со помош на шемата прикажана на сликата 2.5.1. Во оваа шема водот не е претставен со соодветната π -еквивалентна шема, во која покрај редната гранка $\underline{Z}$ фигурираат и 2 попречни гранки со адмитанции $Y/2$, туку тој е претставен само со редната гранка, додека попречните гранки, со кои се опфаќа погонскиот капацитет на водот, се симулираат со соодветни инјекции на реактивна моќност Q_{C1} и Q_{C2} .

Затоа, најнапред, со помош на релацијата (1.12), ќе ја пресметаме подолжната капацитивна спроводност на водот b :

$$b \cdot x = \frac{\omega^2}{c_o^2} \approx 1,1 \cdot 10^{-6} \Rightarrow b = \frac{\omega^2}{x \cdot c_o^2} = \frac{1,1 \cdot 10^{-6}}{0,4} = 2,74 \mu\text{S/km}; \quad B = b \cdot l = 82,2 \mu\text{S}.$$

За да ја пресметаме реактивната моќност Q_{C2} генерирана од капацитетот на крајот од водот, потребно е да ни биде познат напонот U_2 . Бидејќи тој не ни е познат, но сепак знаеме дека тој не може во голема мера да отстапува од својата номинална вредност U_n , моќноста Q_{C2} ќе ја пресметаме приближно, земајќи дека е $U_2 = U_n$. Тогаш ќе имаме:

$$Q_{C2} = (B/2) \cdot U_2^2 = (B/2) \cdot U_n^2 = 0,497 \text{ Mvar}.$$

Понатаму имаме:

$$\underline{S}'' = \underline{S}_2 - jQ_{C2} = (40 + j19,503) \text{ MVA}.$$

За модулите на напоните $\underline{U}_1$ и $\underline{U}_2$ приближно ќе важи:

$$U_1 = U_2 + \Delta U \approx U_2 + \Delta U_d = U_2 + \frac{P'' \cdot R + Q'' \cdot X}{U_2};$$

$$\Rightarrow U_2^2 - U_1 \cdot U_2 + (P'' \cdot R + Q'' \cdot X); \quad U_2 = 110,605 \text{ kV}.$$

Загубите на моќност $\Delta \underline{S}$ во редната гранка на водот $\underline{Z}$ ќе бидат:

$$\Delta \underline{S} = \frac{P''^2 + Q''^2}{U_2^2} \cdot (R + jX) = \frac{40^2 + 19,503^2}{110,6^2} \cdot (6,3 + j12); \quad \Delta \underline{S}_Z = (1,02 + j1,943) \text{ MVA}.$$

$$Q_{C1} = (B/2) \cdot U_1^2 = 0,543 \text{ Mvar},$$

$$\underline{S}_1 = \underline{S}' - jQ_{C1} = (\underline{S}'' + \Delta \underline{S}) - jQ_{C1} = (41,02 + j20,903) \text{ MVA}.$$

Се разбира дека вака добиеното решение е приближно бидејќи тоа се темелеше на претпоставката $U_2 = U_n$. Доколку е потребно, него можеме да го уточнуваме на тој начин што истата постапка ќе ја повториме повеќе пати. При секое повторување на постапката за напонот U_2 ќе се зема претходно добиената вредност. Уточнувањата ќе ги правиме сè додека разликите помеѓу новодобиената вредност на напонот U_2 и неговата претходно добиена вредност станат доволно мали. Инаку, со таква итеративна постапка се добива егзактното решение на проблемот. Тоа гласи:

$$U_2 = 110,558 \text{ kV}; \quad \theta = \angle(\underline{U}_1, \underline{U}_2) = 1,61^\circ; \quad \underline{S}_1 = (41,0206 + j20,9031) \text{ MVA}.$$

□ □ □

Задача 2.6. 110 kV надземен вод, со должина $l = 30 \text{ km}$ и подолжни параметри $r = 0,21 \Omega/\text{km}$, $x = 0,40 \Omega/\text{km}$ и $b = 2,74 \mu\text{S/km}$, пренесува природна моќност. Напонот на крајот од водот изнесува $U_2 = U_n = 110 \text{ kV}$. Да се одредат приликите на почетокот од водот $\underline{U}_1$ и $\underline{S}_1$.

Решение:

Брановата погонска импеданција на водот Z_V и природната моќност на водот P_N ќе бидат:

$$Z_V = \sqrt{\frac{x}{b}} = \sqrt{\frac{0,4}{2,74 \cdot 10^{-6}}} = 382 \, \Omega; \quad P_N = \frac{U_2^2}{Z_V} = \frac{110^2}{382} = 31,7 \, \text{MW}.$$

Кога водот пренесува природна моќност имаме:

$$P_2 = P_N = 31,7 \, \text{MW}; \quad Q_2 = 0; \quad \underline{S}_2 = (31,7 + j0) \, \text{MVA}.$$

Во согласност со ознаките од сликата 2.5.1, реактивната моќност Q_{C2} што ја генерира попречната капацитивна гранка на крајот од водот ќе биде:

$$Q_{C2} = (B/2) \cdot U_2^2 = 41,1 \cdot 10^{-6} \cdot 110^2 = 0,497 \, \text{Mvar}.$$

Понатаму имаме:

$$\underline{S}'' = \underline{S}_2 - jQ_{C2} = (31,7 - j0,497) \, \text{MVA}.$$

Ако усвоиме $\underline{U}_2 = U_2 \cdot e^{j0} = 110 \angle 0^\circ \, \text{kV}$ и ако не ја занемариме капацитивната моќност Q_{C2} , за напонот на почетокот од водот ќе добиеме:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \Delta \underline{U} = \underline{U}_2 + \frac{P'' \cdot R + Q'' \cdot X}{\underline{U}_2^*} + j \frac{P'' \cdot X - Q'' \cdot R}{\underline{U}_2^*}$$

$$\underline{U}_1 = 110 + \frac{31,7 \cdot 6,3 - 0,497 \cdot 12}{110} + j \frac{31,7 \cdot 12 + 0,497 \cdot 6,3}{110};$$

$$\underline{U}_1 = 111,81 \angle 1,79^\circ \, \text{kV}.$$

За загубите во редната гранка од водот ќе добиеме:

$$\Delta \underline{S}_Z = (\Delta P + j\Delta Q) = \frac{P''^2 + Q''^2}{U_2^2} \cdot (R + jX);$$

$$\Delta \underline{S}_Z = \frac{31,7^2 + 0,497^2}{110^2} \cdot (6,3 + j12) = (0,523 + j0,997) \, \text{MVA}.$$

Реактивната моќност Q_{C1} генерирана од капацитивната попречна гранка на почетокот од водот ќе биде:

$$Q_{C1} = (B/2) \cdot U_1^2 = 41,1 \cdot 10^{-6} \cdot 111,81^2 = 0,514 \, \text{Mvar}.$$

Според тоа, моќноста на почетокот од водот ќе биде (слика 5.5.1):

$$\underline{S}_1 = \underline{S}' - jQ_{C1} = \underline{S}'' + \Delta \underline{S}_Z - jQ_{C1} = (32,223 - j0,014) \, \text{MVA} \approx (32,223 + j0) \, \text{MVA}.$$

Овие резултати се добиени со уважување на капацитивноста на водот, што е неопходно бидејќи се работи за високонапонски вод. Но кога се работи за среднонапонски или нисконапонски надземни водови или пак се работи за високонапонски водови со релативно мала должина l , па според тоа, ќе се работи и за релативно мала генерирана реактивна моќност Q_C , тогаш, заради упростување на пресметките, можеме да го занемариме присуството на капацитивната спроводност на водот. Доколку постапиме така и во овој случај, за приликите на почетокот од водот ќе добиеме нови вредности:

$$\underline{U}_1 = 111,87 \angle 1,79^\circ \, \text{kV}; \quad \underline{S}_1 = (32,192 - j0,995) \, \text{MVA}$$

кои малку се разликуваат од претходно добиените.

Напомена: Истата задача да се реши и за следниот два случаја:

а) $P_2 = \frac{1}{2} P_N$; $Q_2 = 0$; Решение:

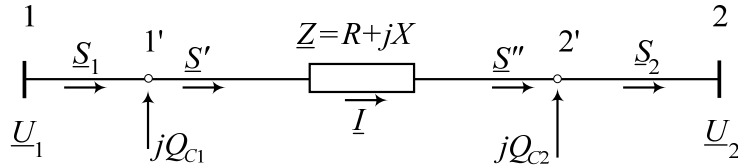
б) $P_2 = 2 \cdot P_N$; $Q_2 = 0$. Решение:

□ □ □

Задача 2.7: Се посматра повторно случајот од задачата 2.5. Водот ги има следните параметри: $l = 30 \, \text{km}$, $\underline{z} = (0,21 + j0,40) \, \Omega/\text{km}$, $b = 2,74 \, \mu\text{S}/\text{km}$. Моќноста на потрошувачот, приклучен на крајот од

водот изнесува $\underline{S}_2 = (P_2 + jQ_2) = (40 + j20)$ MVA, а напонот на неговиот почеток изнесува $U_1 = 115$ kV. Приближно да се реши водот на начин според кој што се оперира со приликите на неговиот почеток P_1 , Q_1 и U_1 .

Решение:



Слика 2.7.1.

Во овој случај падот на напон во водот ΔU ќе го пресметуваме со помош на равенката (2.10) во која струјата $\underline{I}$ низ редната гранка $\underline{Z}$ е изразена преку приликите на почетокот од водот P_1 , Q_1 и U_1 . Притоа задачата ќе ја решиме на два начина – со и без уважување на погонскиот капацитет на водот.

а) Решавање на водот со занемарување на погонскиот капацитет

Кога се занемарува погонскиот капацитет на водот врз основа на сликата 2.7.1 можеме да пишуваме:

$$\underline{S}'' = \underline{S}_2 = (40 + j20) \text{ MVA}; \quad \underline{S}' = \underline{S}'' + \Delta \underline{S}_Z;$$

$$\Delta \underline{S}_Z = \frac{(S'')^2}{U_2^2} \cdot (R + jX) \approx \frac{P''^2 + Q''^2}{U_n^2} \cdot (R + jX);$$

$$\Delta \underline{S}_Z = \frac{40^2 + 20^2}{110^2} \cdot (6,3 + j12) = (1,041 + j1,984) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_1 = \underline{S}' = \underline{S}'' + \Delta \underline{S} = (41,041 + j21,983) \text{ MVA}.$$

$$\Delta U \approx \Delta U_d \approx \frac{P_1 \cdot R + Q_1 \cdot X}{U_1} = \frac{41,041 \cdot 6,3 + 21,984 \cdot 12}{115} = 4,542 \text{ kV}. \quad U_2 = U_1 - \Delta U = 110,458 \text{ kV}.$$

Значи решението на задачата гласи:

$$U_2 = 110,458 \text{ kV}; \quad P_1 = 41,041 \text{ MW}; \quad Q_1 = 21,984 \text{ Mvar}; \quad \underline{S}_1 = (41,041 + j21,984) \text{ MVA}.$$

б) Решавање на водот со уважување на погонскиот капацитет

Падот на напон во водот $\Delta U = U_1 - U_2$, во согласност со сликата 2.7.1, може да се изрази и на следниот начин:

$$\Delta \underline{U} = \sqrt{3} \cdot \underline{Z} \cdot \underline{I} = \sqrt{3} \cdot (R + jX) \cdot \frac{(\underline{S}')^*}{\sqrt{3} \cdot \underline{U}_1^*} = \frac{P' \cdot R + Q' \cdot X}{\underline{U}_1^*} + j \frac{P' \cdot X - Q' \cdot R}{\underline{U}_1^*}; \quad \underline{U}_2 = \underline{U}_1 - \Delta \underline{U}.$$

Во прикажаната равенка фигурира моќноста $\underline{S}' = (P' + jQ')$ која што е непозната така што оваа равенка директно не може да биде решена. Но непознатата моќност $\underline{S}'$ можеме да ја "процениме" со помош на релациите (2.6) и (2.12a), на следниот начин:

$$Q_{C2} = \frac{B}{2} \cdot U_2^2 \approx \frac{b \cdot l}{2} \cdot U_n^2 = \frac{2,74 \cdot 10^{-6} \cdot 30}{2} \cdot 110^2 \cdot 10^6 = 0,497 \text{ Mvar};$$

$$\Delta \underline{S}_Z = 3 \cdot \underline{Z} \cdot \underline{I}^2 = \frac{S''^2}{U_2^2} \cdot (R + jX) = \frac{P''^2 + Q''^2}{U_n^2} \cdot (R + jX) \approx \frac{P_2^2 + (Q_2 - Q_{C2})^2}{U_n^2};$$

$$P'' = P_2 = 40 \text{ MW}; \quad Q'' = Q_2 - Q_{C2} = 19,503 \text{ Mvar};$$

$$\Delta S_Z \approx \frac{40^2 + 19,503^2}{110^2} \cdot (6,3 + j12) = (1,031 + j1,964) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}' = \underline{S}'' + \Delta \underline{S} = (41,031 + j21,467) \text{ MVA}.$$

Значи добивме: $P' = 41,031 \text{ MW}$ и $Q' = 21,467 \text{ Mvar}$. Сега, значи, моќноста $\underline{S}'$ е позната.

Заради поедноставно пресметување напонот $\underline{U}_1$ ќе го поставиме на фазната оска, т.е. усвојуваме $\underline{U}_1 = U_1 \cdot e^{j0} = (115 + j0) \text{ kV}$. Понатаму следи пресметка на падот на напон $\Delta \underline{U}$:

$$\Delta \underline{U} = \frac{P' \cdot R + Q' \cdot X}{\underline{U}_1^*} + j \frac{P' \cdot X - Q' \cdot R}{\underline{U}_1^*} = (4,488 + j3,105) \text{ kV};$$

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 - \Delta \underline{U} = 115 - (4,488 + j3,105) = 110,512 - j3,105 \text{ kV} = 110,556 \cdot e^{-j1,61^\circ} \text{ kV}.$$

Капацитивната моќност Q_{C1} што ја генерира првата попречна гранка на водот ќе биде:

$$Q_{C1} = \frac{B}{2} \cdot U_1^2 = \frac{82,2 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot 115^2 = 0,544 \text{ Mvar}.$$

Сега, врз основа на сликата 2.7.1, со примена на I Кирхофов закон за моќности за јазолот 1', ја пресметуваме моќноста на почетокот од водот $\underline{S}_1$:

$$\underline{S}_1 + jQ_{C1} = \underline{S}' \Rightarrow \underline{S}_1 = \underline{S}' - jQ_{C1} = (41,031 + j20,923) \text{ MVA}.$$

Значи, решението на задачата гласи:

$$U_2 = 110,556 \text{ kV}; \quad P_1 = 41,031 \text{ MW}; \quad Q_1 = 20,923 \text{ Mvar}.$$

Забележуваме дека тоа се разликува сосема малку од решението добиено во првиот дел од задачата каде што генерираната реактивна моќност на водот $Q_C = Q_{C1} + Q_{C2}$ не беше земена предвид во пресметувањата. Главната разлика помеѓу овие две решенија е во големината на реактивната моќност Q_1 на почетокот од водот. Таа разлика изнесува:

$$21,984 - 20,923 = 1,061 \text{ Mvar},$$

и по својата вредност е сосема блиску до капацитивната моќност што ја генерираат попречните гранки на водот и која, приближно, изнесува:

$$Q_C = Q_{C1} + Q_{C2} = \frac{B}{2} \cdot (U_1^2 + U_2^2) = \frac{82,2 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot (115^2 + 110,556^2) \cdot 10^6 = 1,05 \text{ Mvar}.$$

Инаку, за потсетување, оваа задача беше веќе решена во примерот 2.5 на поинаков начин и притоа точното нејзино решение гласеше:

$$U_2 = 110,558 \text{ kV}; \quad \theta = \angle(\underline{U}_1, \underline{U}_2) = 1,61^\circ; \quad \underline{S}_1 = (41,0206 + j20,9031) \text{ MVA}.$$

□ □ □

Задача 2.8^V: Потрошувач со моќност $\underline{S}_2 = (15 + j10) \text{ MVA}$ се напојува преку 110 kV вод со параметри $\underline{Z} = (26,4 + j33,9) \Omega$ и $\underline{Y} = j219 \mu\text{S}$. Напонот на другиот крај од водот изнесува $U_1 = 116 \text{ kV}$. Да се одреди моќноста на почетокот од водот $\underline{S}_1$ и напонот на крајот U_2 .

Решение:

Решението на задачата гласи:

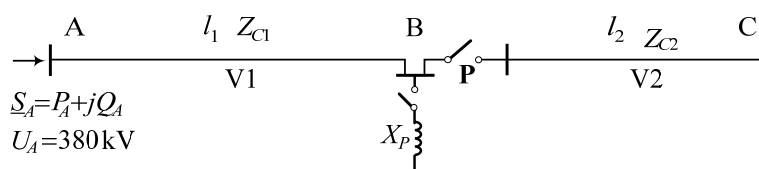
$$U_2 = 109,711 \text{ kV}; \quad \underline{S}_1 = (15,66 + j8,049) \text{ MVA}.$$

Од резултатот заклучуваме дека загубите на активната моќност во преносот изнесуваат $\Delta P = 0,66 \text{ MW}$, додека загубите на реактивната моќност се негативни, т.е. $\Delta Q = -1,951 \text{ Mvar}$. Негативните загуби на реактивната моќност се должат на фактот што е водот подоптоварен, т.е. тој пренесува привидна моќност која е помала од неговата природна моќност.

□ □ □

Задача 2.9*: Се посматра 380 kV преносна мрежа составена од 2 вода V1 и V2 со идентични карактеристики [$\underline{z} = (r+jx) = (0,032+j0,315) \Omega/\text{km}$; $\underline{y} = jb=j3,492 \mu\text{S}/\text{km}$; $Z_V = 310 \Omega$] и со должини $l_1 = 150 \text{ km}$ и $l_2 = 150 \text{ km}$. Мрежата работи во режим на празен од при што напонот во напојната точка A се одржува на константна вредност $U_A = U_n = 380 \text{ kV} = \text{const}$. Реакторот X_P , приклучен во точката B, е исклучен. Третирајќи ги водовите како идеални ($r = 0$) да се пресмета:

- Колкав е напонот $U_B = ?$ и моќноста $S_A = P_A + jQ_A = ?$ на почетокот од водот V1 за случајот кога прекинувачот **P** е исклучен.
- Колкави се напоните U_B и U_C како и моќноста $S_A = P_A + jQ_A$ за случајот кога прекинувачот **P** е вклучен.
- Се посматра режим на празен од со вклучен прекинувач **P**. Со цел да се елиминира генерираната реактивна моќност на празен од Q_A , се предвидува поставување на реактор во постројката B чијашто реактанција изнесува $X_P = 950 \Omega$. Колкава ќе биде струјата I_P низ реакторот? Колкави се напоните U_B и U_C во тој случај и колкава моќност $\underline{S}_A$ ќе повлече водот од напојната точка "A" во тој случај.



Слика 2.9.1. 380 kV преносна мрежа во празен од

Решение:

a) Решавање на водот V1

Во задачата 2.2. беше покажано дека кога е водот V1 во празен од, ќе важат следните релации:

$$\underline{Z} = \underline{Z}_1 = \underline{z} \cdot l_1 \approx jx \cdot l_1 = j0,315 \cdot 150 = j47,25 \Omega;$$

$$\underline{Y} = \underline{Y}_1 = \underline{y} \cdot l_1 = jb \cdot l_1 = j3,492 \cdot 150 = j523,8 \mu\text{S};$$

$$\underline{U}_B = \frac{\underline{U}_A}{1 + \underline{Z} \cdot (\underline{Y}/2)}; \quad \underline{I}_A = \frac{\underline{Y}}{2} \cdot \frac{2 + \underline{Z} \cdot (\underline{Y}/2)}{1 + \underline{Z} \cdot (\underline{Y}/2)} \cdot \underline{U}_A$$

На тој начин добиваме:

$$\underline{Z} \cdot \underline{Y}/2 = j47,25 \cdot j523,8 \cdot 10^{-6} = -0,012374,$$

$$\underline{U}_B = \frac{\underline{U}_A}{1 - 0,012374} = \frac{\underline{U}_A}{0,987626} = \frac{380}{0,987626} = 384,76 \text{ kV}, \quad (U_B > U_A).$$

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\underline{Y}}{2} \cdot \frac{2 - 0,012374}{1 - 0,012374} = j0,11564 \text{ kA} \equiv j115,64 \text{ A}.$$

Моќноста $\underline{S}_A$ што ја "влече" водот во режимот на празен од ќе биде:

$$S_A = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_A \cdot \underline{I}_A^* = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot (j0,11564)^* = (0 - j76,111) \text{ MVA}.$$

Значи, водот V1 во празен од влече чисто капацитивна струја и соодветно на тоа влече негативна реактивна моќност. Тоа значи дека тој всушност "генерира" реактивна моќност во износ од 76,111 Mvar.

б) Решавање на мрежата составена од водовиџе водоџи V1 и V2

Кога прекинувачот Р е вклучен, се формира радијална мрежа од два редно (сериски) поврзани вода V1 и V2. Бидејќи обата вода се со идентични карактеристики, тие можат да се третираат како еден единствен вод V со должина $l = l_1 + l_2 = 150 + 150 = 300$ km. Понатаму, постапувајќи на сосема ист начин како и во случајот под а) може да се реши и водот V којшто работи во режим на празен од. На тој начин добиваме:

$$\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 = j47,5 + j47,5 = j95 \Omega; \quad \underline{Y} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 = j523,8 + j523,8 = j1047,6 \mu S.$$

$$\underline{U}_C = \frac{\underline{U}_A}{1 + \underline{Z} \cdot \underline{Y}/2} = 399,8 \text{ kV}; \quad \underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\underline{Y}}{2} \cdot \frac{2 + \underline{Z} \cdot \underline{Y}/2}{1 + \underline{Z} \cdot \underline{Y}/2} = j0,2358 \text{ kA} \equiv j235,8 \text{ A}.$$

$$\underline{S}_A = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_A \cdot \underline{I}_A^* = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot (j0,2358)^* = (0 - j155,5) \text{ MVA}.$$

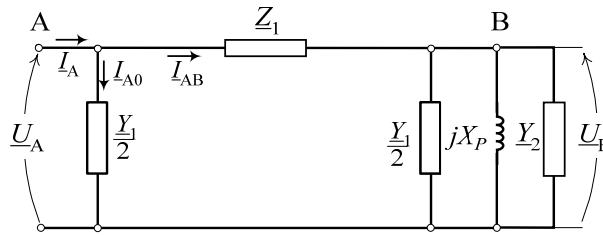
Бидејќи точката В претставува почеток на водот V2, којшто работи во режим на празен од, неговата вредност $\underline{U}_B$ ќе ја добиеме на ист начин како и во случајот под а), тргнувајќи од врската што постои помеѓу напонот на почетокот и напонот на крајот од еден вод во празен од. На тој начин добиваме:

$$\underline{Z}_2 = \underline{z} \cdot l_2 \approx jx \cdot l_2 = j0,315 \cdot 150 = j47,25 \Omega;$$

$$\underline{Y}_2 = \underline{y} \cdot l_2 = jb \cdot l_2 = j3,492 \cdot 150 = j523,8 \mu S;$$

$$\underline{U}_C = \frac{\underline{U}_B}{1 + \underline{Z}_2 \cdot (\underline{Y}_2/2)} \Rightarrow \underline{U}_B = \underline{U}_C \cdot [1 + \underline{Z}_2 \cdot (\underline{Y}_2/2)] = 394,79 \text{ kV}.$$

в) Состојба во мрежата со вклучен реактор X_P



Слика 2.9.2. Работа на мрежата со вклучен реактор

Во согласност со заклучоците изведени во задачата 2.2, водот V2 во празен од можеме, со доволна точност, да го еквивалентираме со својата влезна адмитанција (импеданција) $\underline{Y}_{v1,2} \cong \underline{Y}_2$. Истовремено водот V1 ќе го претставиме со неговата π -заменска шема, составена од редната гранка $\underline{Z}_1$ и двете напречни гранки $\underline{Y}_1/2$ и $\underline{Y}_1/2$, како што е тоа прикажано на сликата 2.7.2. И конечно, во точката В е приклучен и реакторот $X_P = 950 \Omega$.

Ако паралелната врска составена од трите гранки приклучени во јазолот В ги еквивалентираме со една еквивалентна $\underline{Z}_{ek}$, ќе добиеме:

$$\underline{Z}_{ek} = jX_P \Pi(2/\underline{Y}_1) \Pi(1/\underline{Y}_2) = j950 \Pi(-j3818,25) \Pi(-j1909,13) = j3746,3 \Omega.$$

Понатаму, струите $\underline{I}_{AB}$, $\underline{I}_{A0}$ и $\underline{I}_A$ (слика 2.9.2) ќе ги добиеме на следниот начин:

$$\underline{I}_{AB} = \frac{\underline{U}_{Af}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{ek}} = \frac{\underline{U}_A/\sqrt{3}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{ek}} = \frac{380/\sqrt{3}}{j47,5 + j3746,3} = -j57,833 \cdot 10^{-3} \text{ kA};$$

$$\underline{U}_B = \sqrt{3} \cdot \underline{Z}_{ek} \cdot \underline{I}_{AB} = \frac{\underline{Z}_{ek}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{ek}} \cdot \underline{U}_A = 0,9875 \cdot \underline{U}_A = 375,27 \text{ kV},$$

$$\underline{I}_{A0} = \frac{\underline{Y}_1}{2} \cdot \underline{U}_{Af} = \frac{j523,8 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot \frac{380}{\sqrt{3}} = j57,459 \cdot 10^{-3} \text{ kA} \equiv j57,459 \text{ A},$$

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{A0} + \underline{I}_{AB} = j57,459 - j57,83 = -j0,37 \text{ A} \approx 0.$$

Значи со приклучувањето на реакторот X_p се изврши практично целосна компензација на капацитивната струја што ја генерираат водовите V1 и V2 во режимот на празен од. Значи мрежата вака компензирана нема да влече практично никаква струја, односно моќност.

Овој резултат е сосема логичен бидејќи вредноста $X_p = 950 \Omega$ е избрана така што приближно важи:

$$\frac{1}{Y_1 + Y_2} = \frac{10^6}{523,8 + 523,8} = 954,6 \Omega \approx X_p = 950 \Omega.$$

Лесно се покажува дека напонот $\underline{U}_C$ на крајот од водот V2 во случајов ќе биде:

$$\underline{U}_C = 379,95 \text{ kV} \approx \underline{U}_A.$$

И конечно, струјата I_p низ реакторот како и реактивната моќност $\underline{S}_p = jQ_p$ што реакторот ја троши во посматраниот режим ќе бидат:

$$I_p = \frac{U_B}{\sqrt{3} \cdot X_p} = \frac{375,27}{\sqrt{3} \cdot 950} = 0,228 \text{ kA}; \quad Q_p = \sqrt{3} \cdot U_B \cdot I_p = 148,24 \text{ Mvar}.$$

□ □ □

Задача 2.10^V: 380 kV далекувод, со должина $l = 200 \text{ km}$ и подолжни параметри $r = 0,032 \Omega/\text{km}$, $x = 0,328 \Omega/\text{km}$, $b = 3,421 \mu\text{S}/\text{km}$ и $g = 0$ (активната одводност е занемарена), е оптоварен на крајот со чисто активен потрошувач со моќност P_2 , при фактор $\cos\varphi_2 = 1$ и напон $U_2 = U_n = 380 \text{ kV}$.

Потребно е да се одредат напонот U_1 и моќноста $\underline{S}_1$ на почетокот од далекуводот, за следните карактеристични режима на работа:

- а) $P_2 = 0$,
- б) $P_2 = \frac{1}{2}P_N = 233 \text{ MW}$,
- в) $P_2 = P_N = 466 \text{ MW}$,
- г) $P_2 = 2 \cdot P_N = 932 \text{ MW}$.

Решение:

Бидејќи се работи за релативно долг вод со висок напон, потребно ќе биде да ја уважине и капацитивната одводност на водот B, т.е. водот ќе го претставиме со неговата π -заменска шема. Освен тоа, при определувањето на загубата на напон во преносот ќе мораме да ја земеме предвид и попречната компонента на падот на напон, бидејќи нејзиното неуважување ќе внесе големи грешки во пресметките.

Резултатите од вака изведените пресметки се прикажани во следната табела.

Табела 2.10.1 Зависност на приликите на почетокот од водот од степенот на неговата оптовареност за чисто активен товар ($\cos\varphi = 1$)

		а) $P_2=0$	б) $P_2=\frac{1}{2}P_N$	в) $P_2=P_N$	г) $P_2=2P_N$
P_2	(MW)	0	233	466	932
P_1	(MW)	0,078	235,51	475,73	970,61
Q_1	(Mvar)	-95,5	-72,4	0	286,1
ΔU_d	(kV)	-8,528	-4,60	-0,88	7,17
ΔU_q	(kV)	0,832	41,1	81,3	161,7
U_1	(kV)	371,5	377,64	387,93	419,6
ΔU	(%)	-2,24	-0,62	2,31	10,42

□ □ □

Б) ЗАДАЧИ ОД ОБЛАСТА НА ДИСТРИБУТИВНИТЕ МРЕЖИ

Задача 2.11: Трифазен четирижилен НН кабел од типот РР 00 А 4×70 0,6/1 kV, со спроводници од алуминиум ($r = 0,443 \Omega/\text{km}$; $x = 0,074 \Omega/\text{km}$) и со должина $l = 200 \text{ m}$, напојува на својот крај група потрошувачи со сумарна моќност $P = 100 \text{ kW}$, $\cos \varphi = 0,95$.

Да се пресмета загубата на напон ΔU и загубата на активна моќност ΔP во кабелот.

Решение:

Параметрите R и X на редната импеданција на кабелот ќе бидат:

$$R = r \cdot l = 0,443 \cdot 0,2 = 0,0886 \Omega; \quad X = x \cdot l = 0,074 \cdot 0,2 = 0,0148 \Omega.$$

За реактивната моќност Q на потрошувачот ќе имаме:

$$\cos \varphi = 0,95; \quad \varphi = 18,2^\circ; \quad \tan \varphi = 0,32868 \approx 0,329; \quad Q = P \cdot \tan \varphi = 32,87 \text{ kvar}.$$

Во согласност со изразите (2.2.1) и (2.2.4) што важат за НН водови ќе имаме:

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_n} = \frac{P \cdot r + Q \cdot x}{U_n} \cdot l = \frac{100 \cdot 0,443 + 32,87 \cdot 0,074}{0,4} \cdot 0,2 = 23,366 \text{ V}.$$

$$\Delta U \% = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100 = \frac{23,366}{400} \cdot 100 = 5,842\%.$$

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U_n^2} \cdot R = \frac{100^2 + 32,87^2}{0,4^2} \cdot 0,0886 = 6136 \text{ W} \equiv 6,136 \text{ kW},$$

$$\Delta P \% = \frac{\Delta P}{P} \cdot 100 = \frac{6,136}{100} \cdot 100 = 6,136\%.$$

Истата задача ќе ја решиме и на друг начин. Врз основа на изразите (2.2.2), (2.2.36) и (2.2.6) можеме да пишуваме:

$$M = \frac{10 \cdot U_n^2}{r + x \cdot \tan \varphi} = \frac{10 \cdot 0,4^2}{0,443 + 0,074 \cdot 0,32868} = 3,43375 \frac{\text{kW} \times \text{km}}{\%}.$$

$$\Delta U \% = \frac{P \cdot l}{M} = \frac{100 \cdot 0,2}{3,43375} = 5,842\%.$$

$$\frac{\Delta P \%}{\Delta U \%} = \frac{1 + \tan^2 \varphi}{1 + (x/r) \cdot \tan \varphi} = \frac{1 + 0,32868^2}{1 + (0,4343/0,074) \cdot 0,32868} = 1,0504;$$

$$\Delta P \% = 1,0504 \cdot 5,842 = 6,136\%.$$

□ □ □

Задача 2.12: Нисконапонски надземен вод ($U_n = 0,4 \text{ kV}$) е изведен со спроводници $\text{Al}/\check{\text{C}} 50/8 \text{ mm}^2$ ($D_m = 0,6 \text{ m}$) и има подолжни параметри $r = 0,639 \Omega/\text{km}$ и $x = 0,316 \Omega/\text{km}$. Трајно дозволената струја на спроводниците изнесуваат $I_d = 170 \text{ A}$ а привидната термичка моќност $S_t = 118 \text{ kVA}$. Водот е на крајот оптоварен со потрошувач со активна моќност P и фактор на моќност $\cos \varphi$.

Да се определи зависноста $P = f(l)$ така што загубата на напон во водот да изнесува $\Delta U = 5\%$.

Решение:

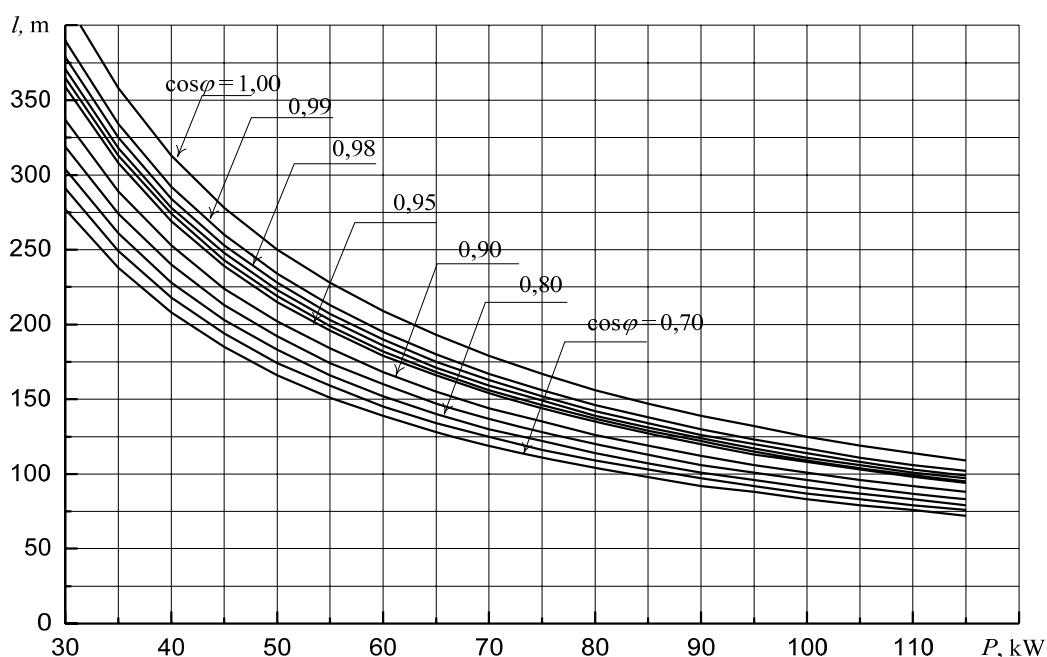
Од приближниот израз за загуба на напон во водот (2.2.1) произлегува следната релација:

$$\Delta U \approx \Delta U_d \approx \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_n} = \frac{P \cdot l \cdot r \cdot (1 + \frac{x}{r} \cdot \tan \varphi)}{U_n}; \quad \Rightarrow \quad P \cdot l = \frac{\Delta U \cdot U_n}{r + x \cdot \tan \varphi} = \text{const}.$$

Со помош на последната релација, за разни вредности на моќноста на потрошувачот P се определува должината на водот l за која загубата на напон во водот ќе биде точно еднаква на зададената вредност $\Delta U = 5\%$. На тој начин се добиваат податоците прикажани во долната табела. Во неа се разгледуваат и случаите кога факторот на моќност на потрошувачот $\cos \varphi$ има и други вредности во интервалот од 0,7 до 1. Овие зависимости се прикажани и на дијаграмот од слика 2.12.1.

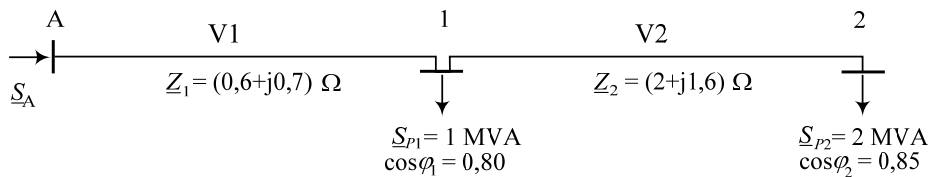
Табела 2.12.1: Зависност на граничната должина l (m) на водот од оптоварувањето на неговиот крај при услов $\Delta U = 5\%$

$\cos \varphi$	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70
20 kW	626	585	569	557	547	538	505	479	457	436	416
25 kW	501	468	455	446	438	431	404	383	365	349	333
30 kW	417	390	379	371	365	359	337	319	304	291	277
35 kW	358	334	325	318	313	308	289	274	261	249	238
40 kW	313	292	284	278	274	269	253	240	228	218	208
45 kW	278	260	253	248	243	239	224	213	203	194	185
50 kW	250	234	228	223	219	215	202	192	183	174	166
55 kW	228	213	207	203	199	196	184	174	166	159	151
60 kW	209	195	190	186	182	179	168	160	152	145	139
65 kW	193	180	175	171	168	166	155	147	140	134	128
70 kW	179	167	163	159	156	154	144	137	130	125	119
75 kW	167	156	152	149	146	144	135	128	122	116	111
80 kW	156	146	142	139	137	135	126	120	114	109	104
85 kW	147	138	134	131	129	127	119	113	107	103	98
90 kW	139	130	126	124	122	120	112	106	101	97	92
95 kW	132	123	120	117	115	113	106	101	96	92	88
100 kW	125	117	114	111	109	108	101	96	91	87	83
105 kW	119	111	108	106	104	103	96	91	87	83	79
110 kW	114	106	103	101	99	98	92	87	83	79	76
115 kW	109	102	99	97	95	94	88	83	79	76	72
120 kW	104	97	95	93	91	90	84	80	76	73	69



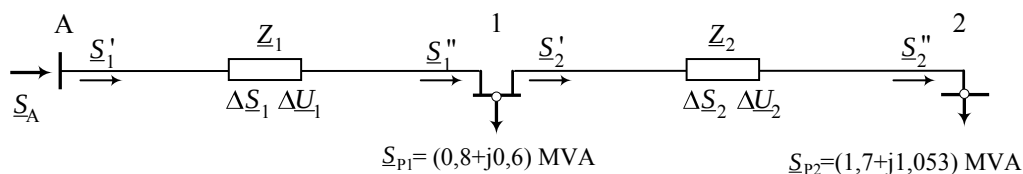
Слика 2.12.1. Зависност $l_{gr}(P)$, за нисконапонски надземен вод со спроводници Al/C 50/8 mm² при услов $\Delta U = 5\%$

Задача 2.13: На сликата е прикажана 10 kV надземна мрежа. Познат е напонот при потрошувачот приклучен во точката 2, $\underline{U}_2 = 10/\underline{0}^\circ$ kV. Потребно е да се одредат напонот во напојната точка A, $\underline{U}_A$, загубата на моќност во мрежата $\Delta \underline{S}$ и загубата на напон во мрежата $\Delta \underline{U}$.



Слика 2.13.1. 10 kV надземна мрежа од задачата 2.13.

Решение:



Слика 2.13.2. Приказ на водовите од мрежата со редни импеданции

Бидејќи се работи за среднонапонска надземна мрежа, задачата ќе ја решиме без да водиме сметка за капацитивноста на водовите. Најнапред ќе ги пресметаме привидните моќности на обата потрошувача $\underline{S}_{P1}$ и $\underline{S}_{P2}$:

$$\underline{S}_{P1} = 1 \cdot (0.80 + j0.60) = (0.8 + j0.6) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{P2} = 2 \cdot (0.85 + j0.527) = (1.7 + j1.053) \text{ MVA}.$$

Тогаш, во согласност со сликата 2.13.2, моќноста $\underline{S}_2''$ на крајот од водот V2 ќе биде еднаква на моќноста на потрошувачот $\underline{S}_{P2}$, т.е.

$$\underline{S}_2'' = \underline{S}_{P2} = (1.7 + j1.053) \text{ MVA}.$$

Загубата на моќност $\Delta \underline{S}_2$ во водот V2 ќе изнесува:

$$\Delta \underline{S}_2 = \frac{P_2'^2 + Q_2'^2}{U_2^2} \cdot (R_2 + jX_2) = \frac{1.7^2 + 1.053^2}{10^2} \cdot (2 + j1.6);$$

$$\Delta \underline{S}_2 = (0.08 + j0.064) \text{ MVA}.$$

Моќноста $\underline{S}_2'$ на почетокот од водот V2 сега ќе изнесува:

$$\underline{S}_2' = \underline{S}_2'' + \Delta \underline{S}_2 = (1.7 + j1.053) + (0.08 + j0.064);$$

$$\underline{S}_2' = (1.78 + j1.117) \text{ MVA}.$$

Падот на напон $\Delta \underline{U}_2$ во водот V2 ќе биде:

$$\Delta \underline{U}_2 = \frac{P_2'' \cdot R_2 + Q_2'' \cdot X_2}{U_2^*} + j \frac{P_2'' \cdot X_2 - Q_2'' \cdot R_2}{U_2^*} = (0.508 + j0.06) \text{ kV}$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \Delta \underline{U}_2 = (10 + j0) + (0.508 + j0.06);$$

$$\underline{U}_1 = (10.508 + j0.06) \text{ kV} = 10.508 \angle 0.33^\circ \text{ kV}.$$

Сега напонот $\underline{U}_1$ ќе го поставиме на референтна оска, т.е:

$$\underline{U}_1 = U_1 / \underline{0}^\circ \text{ kV}.$$

Како последица на тоа ќе имаме промена на фазниот агол θ_2 на фазорот $\underline{U}_2$, т.е.:

$$U_2 = U_1 \angle -0,33^\circ \text{ kV} = 10 \cdot e^{-j0,33^\circ} \text{ kV}.$$

Според Кирхофовиот закон за струи (моќности), моќноста $\underline{S}_1''$ на крајот од водот V1 ќе биде:

$$\underline{S}_1'' = \underline{S}_2' + \underline{S}_{P1} = (2,58 + j1,717) \text{ MVA}.$$

Понатаму, пресметката на приликите во водот V1 се изведува на наполно ист начин како што беше тоа направено и со водот V2. На тој начин за загубата на моќност $\Delta \underline{S}_1$ во водот V1 се добива:

$$\Delta \underline{S}_1 = \frac{P_1'^2 + Q_1'^2}{U_1^2} \cdot (R_1 + jX_1) = \frac{2,58^2 + 1,717^2}{10,508^2} \cdot (0,6 + j0,7);$$

$$\Delta \underline{S}_1 = (0,052 + j0,074) \text{ MVA}.$$

додека за моќноста $\underline{S}_1'$ на почетокот од водот V1 ќе добиеме:

$$\underline{S}_A = \underline{S}_1' = \underline{S}_1'' + \Delta \underline{S}_1 = (2,632 + j1,778) \text{ MVA}.$$

Падот на напон $\Delta \underline{U}_1$ во водот V1 ќе биде:

$$\Delta \underline{U}_1 = \frac{P_1'' \cdot R_1 + Q_1'' \cdot X_1}{U_1^*} + j \frac{P_1'' \cdot X_1 - Q_1'' \cdot R_1}{U_1^*} = (0,262 + j0,074) \text{ kV},$$

$$\underline{U}_A = \underline{U}_1 + \Delta \underline{U}_1 = (10,77 + j0,074) \text{ kV} = 10,77 \angle 0,39^\circ \text{ kV}.$$

Загубата на напон во мрежата ΔU претставува разлика на ефективните вредности на напонот во напојната точка U_A и напонот во крајната точка "2" (како точка со најмал напон во мрежата), т.е:

$$\Delta U = U_A - U_2 = 10,77 - 10 = 0,77 \text{ kV}.$$

Значи, за дадениот режим на работа, во прикажаната мрежа ќе имаме:

- загуба на напон: $\Delta U = 0,77 \text{ kV}$,
- загуба на активна моќност ΔP : $\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 = P_A - (P_{P1} + P_{P2}) = 0,132 \text{ MW}$ и
- загуба на реактивна моќност ΔQ : $\Delta Q = Q_A - (Q_{P1} + Q_{P2}) = 0,125 \text{ Mvar}$.

Приближен начин на решавање

Истата задача ќе ја решиме со користење на приближните формули за пресметување на тековите на моќности, загубите на напони ΔU и загубите на моќности $\Delta \underline{S}$ во елементите од мрежата со цел да ја оцениме големината на грешката што се прави решавајќи ја мрежата со приближната постапка. Значи, ќе ги користиме следните приближни формули:

$$\underline{S}_\Sigma = \Sigma \underline{S};$$

$$\Delta U \approx \Delta U_d = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U} \approx \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_n};$$

$$\Delta \underline{S} \approx \Delta \underline{S}_Z = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot (R + jX) \approx \frac{P^2 + Q^2}{U_n^2} \cdot (R + jX).$$

Овие формули, иако приближни, даваат резултати со задоволителна точност кога се работи за нисконапонски (НН) и среднонапонски (СН) мрежи, каде што напонските прилики во мрежата се движат во тесен интервал околу вредноста на номиналниот напон U_n .

Работејќи на тој начин за приближните текови на моќности во мрежата ќе добиеме:

$$\underline{S}_{\Sigma 1} = \underline{S}_{P1} + \underline{S}_{P2} = (0,8 + j0,6) + (1,7 + j1,053) = (2,5 + j1,653) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{\Sigma 2} = \underline{S}_{P2} = (1,7 + j1,053).$$

Понатаму, за загубата на напон во одделните водови ќе имаме:

$$\Delta U_1 = \frac{P_{\Sigma 1} \cdot R_1 + Q_{\Sigma 1} \cdot X_1}{U_n} = \frac{2,5 \cdot 0,6 + 1,653 \cdot 0,7}{10} = 0,266 \text{ kV};$$

$$\Delta U_2 = \frac{P_{\Sigma 2} \cdot R_2 + Q_{\Sigma 2} \cdot X_2}{U_n} = \frac{1,7 \cdot 2,0 + 1,053 \cdot 1,6}{10} = 0,508 \text{ kV}.$$

$$U_2 = 10 \text{ kV};$$

$$U_1 = U_2 + \Delta U_2 = 10 + 0,508 = 10,508 \text{ kV};$$

$$U_A = U_1 + \Delta U_1 = 10,508 + 0,266 = 10,778 \text{ kV}.$$

Загубите на моќност $\Delta \underline{S}_1$ и $\Delta \underline{S}_2$ во одделните делници на мрежата ќе бидат:

$$\Delta \underline{S}_1 = \frac{P_{\Sigma 1}^2 + Q_{\Sigma 1}^2}{U_n^2} \cdot (R_1 + jX_1) = \frac{2,5^2 + 1,653^2}{10^2} \cdot (0,6 + j0,7) = (47,4 + j55,3) \cdot 10^{-3} \text{ MVA};$$

$$\Delta \underline{S}_2 = \frac{P_{\Sigma 2}^2 + Q_{\Sigma 2}^2}{U_n^2} \cdot (R_2 + jX_2) = \frac{1,7^2 + 1,053^2}{10^2} \cdot (2,0 + j1,6) = (78 + j64) \cdot 10^{-3} \text{ MVA}.$$

Вкупните загуби во мрежата ќе се добијат како збир од загубите во сите елементи:

$$\Delta \underline{S} = \Delta \underline{S}_1 + \Delta \underline{S}_2 = (125,4 + j119,3) \cdot 10^{-3} \text{ MVA}.$$

$$\underline{S}_A = \underline{S}_1' + \Delta \underline{S}_1 = (2,638 + j1,784) \text{ MVA}.$$

Значи, со упростениот начин на пресметување ги добивме следните резултати:

$$\Delta U = U_A - U_2 = 0,778 \text{ kV} \text{ или } \Delta U\% = \Delta U/U_n \cdot 100 = 7,78 \%;$$

$$\Delta P = 127,4 \text{ kW} \text{ и } \Delta Q = 119,3 \text{ kvar}.$$

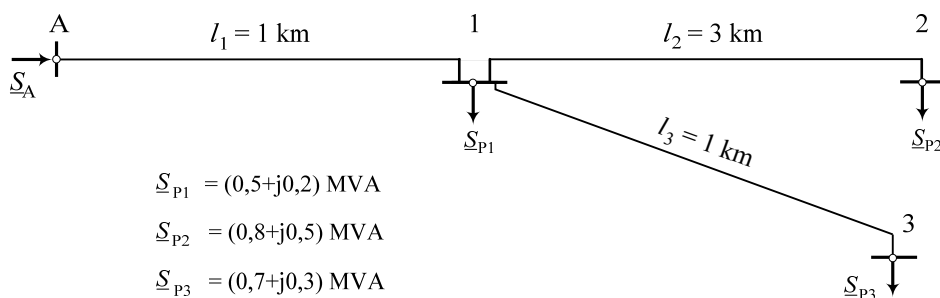
Очигледно е дека отстапувањето на овие резултати од нивните точни вредности, во конкретниов случај, е сосема мало, а начинот на нивното добивање многу поедноставен.

Во општ случај може да се каже дека кога се работи за НН и СН мрежи ($U_n < 110 \text{ kV}$) грешките што ги правиме решавајќи ги мрежите со приближните формули се релативно мали. Затоа, кај овие мрежи најчесто работиме со упростениот метод кој базира на примената на приближните формули за пресметка тековите на моќности и на загубите $\Delta \underline{S}$ и $\Delta \underline{U}$ во мрежата. Со тоа пресметките значително се поедноставуваат (што е од особено големо значење за потребното време и обемот на пресметките, неопходни за решавање кај разгранетите мрежи), а сепак добиените резултати се доволно (за практични цели) точни.

□ □ □

Задача 2.14: На сликата 2.14.1 е прикажана 10 kV дистрибутивна мрежа. Сите водови од мрежата имаат ист пресек и исти карактеристики: $\underline{z} = (0,40 + j0,40) \Omega/\text{km}$. Должините на поедините делници (во km) и моќностите на потрошувачите (во MVA) се дадени на сликата.

Приближно да се одреди загубата на напон $\Delta U(\%)$ и загубата на активна моќност $\Delta P(\%)$ во мрежата, за дадениот режим на работа.



Слика 2.14.1. 10 kV радијална дистрибутивна мрежа.

Решение:

Со оглед на изнесеното во претходната задача, за решавањето и на оваа задача ќе ги применуваме приближните формули. Најнапред ќе ја определиме распределбата на моќности во мрежата. Моќностите низ поедините делници (приближно, со занемарување на загубите на моќност во водовите) ќе бидат:

$$\underline{S}_3 = \underline{S}_{P3} = (0,7 + j0,3) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_2 = \underline{S}_{P2} = (0,8 + j0,5) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_{\Sigma 1} = \underline{S}_{P1} + \underline{S}_{P2} + \underline{S}_{P3} = (2,0 + j1,0) \text{ MVA}.$$

Загубите на напон во поедините делници ќе бидат:

$$\Delta U_3 \approx \Delta U_{d3} = \frac{P_3 \cdot r + Q_3 \cdot x}{U_n} \cdot l_3 = 0,04 \text{ kV};$$

$$\Delta U_2 \approx \Delta U_{d2} = \frac{P_2 \cdot r + Q_2 \cdot x}{U_n} \cdot l_2 = 0,156 \text{ kV};$$

$$\Delta U_1 \approx \Delta U_{d1} = \frac{P_1 \cdot r + Q_1 \cdot x}{U_n} \cdot l_1 = 0,120 \text{ kV}.$$

Бидејќи е $\Delta U_2 > \Delta U_3$, ќе биде $U_2 < U_3$, па загубата на напон во мрежата ќе биде:

$$\Delta U = U_A - U_2 = \Delta U_1 + \Delta U_2 = 0,276 \text{ kV, или:}$$

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100 = \frac{0,276}{10} \cdot 100 = 2,76\%.$$

Загубите на моќност ΔP во мрежата ќе бидат:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3;$$

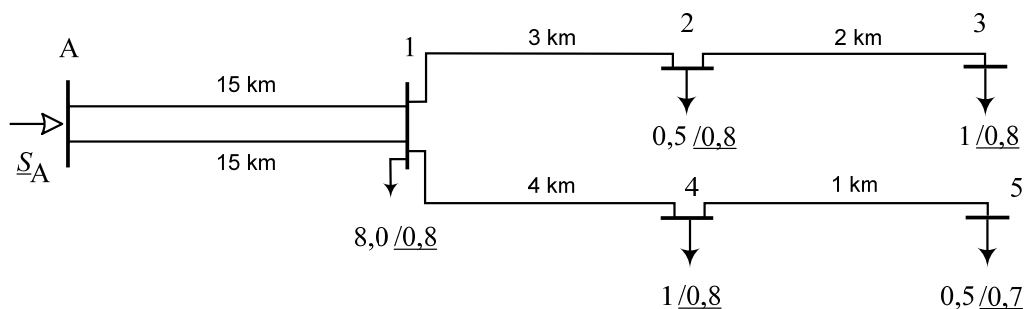
$$\Delta P = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_n^2} \cdot r \cdot l_1 + \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_n^2} \cdot r \cdot l_2 + \frac{P_3^2 + Q_3^2}{U_n^2} \cdot r \cdot l_3;$$

$$\Delta P = 20 + 10,7 + 2,3 = 33 \text{ kW}.$$

$$\Delta P\% = \frac{\Delta P}{P_A} \cdot 100 = 1,65\%.$$

□ □ □

Задача 2.15: На сликата е прикажана една 35 kV дистрибутивна мрежа. На главниот дел од мрежата (делница А-1) паралелно работат два вода со спроводници Al/Č 95/16 mm². Останатите водови се изведени со спроводници Al/Č 70/12 mm². Водовите со спроводници Al/Č 95/16 mm² имаат подолжни параметри $r_{95} = 0,33 \text{ } \Omega/\text{km}$ и $x_{95} = 0,41 \text{ } \Omega/\text{km}$. Останатите водови со спроводници Al/Č 70/12 mm² имаат подолжни параметри $r_{70} = 0,45 \text{ } \Omega/\text{km}$ и $x_{70} = 0,43 \text{ } \Omega/\text{km}$. Моќностите на потрошувачите се дадени во MVA а должините на одделните водови во km. Потребно е да се одреди загубата на напон во мрежата за дадениот режим на работа.



Слика 2.15.1. 35 kV дистрибутивна надземна мрежа.

Решение:

Пресметувањето на напонските прилики во мрежата, како што е вообичаено, ќе го вршиме со приближните текови на моќности, пресметани со занемарување на загубите на моќност ΔS во поедините водови од мрежата. Исто така, попречните компоненти на падот на напон ќе ги занемаруваме, па напоните ќе ги пресметуваме со приближните формули за пад (загуба) на напон во водовите.

Моќностите на поедините потрошувачи ќе бидат:

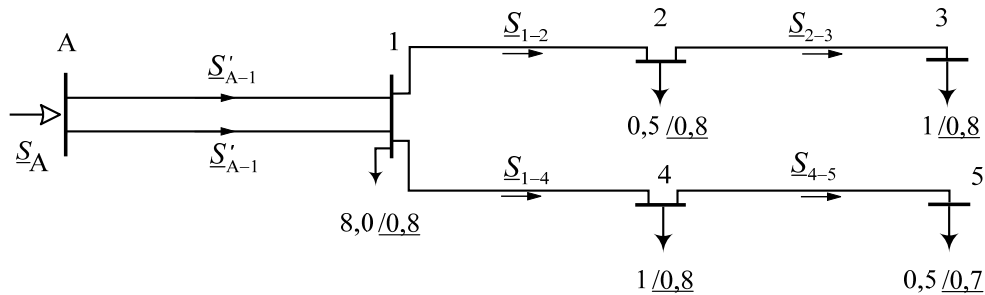
$$\underline{S}_{P1} = 8 \cdot (0,8 + j0,6) = (6,4 + j4,8) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{P2} = 0,5 \cdot (0,8 + j0,6) = (0,4 + j0,3) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{P3} = 1 \cdot (0,9 + j0,436) = (0,9 + j0,436) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{P4} = 1 \cdot (0,8 + j0,6) = (0,8 + j0,6) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{P5} = 0,5 \cdot (0,7 + j0,7) = (0,35 + j0,35) \text{ MVA}.$$



Слика 2.15.2. Приближни текови на моќноста во посматраната 35 kV мрежа.

Моќноста $\underline{S}_{A-1}$ низ главниот дел А-1 приближно (со занемарување на загубите на моќност во мрежата ΔS) изнесува:

$$\underline{S}_{A-1} = \underline{S}_{\Sigma 1} = \Sigma \underline{S}_{Pi} = \underline{S}_{P1} + \underline{S}_{P2} + \underline{S}_{P3} + \underline{S}_{P4} + \underline{S}_{P5} = (8,85 + j6,436) \text{ MVA}.$$

и при тоа, низ секој вод на главниот дел ќе тече по половина моќност.

$$\underline{S}'_{A-1} = 0,5 \cdot \underline{S}_{A-1} = (4,425 + j3,218) \text{ MVA}$$

Загубите на напон на поедините делници ќе бидат:

$$\Delta U_{A-1} = \frac{P'_{A-1} \cdot r_{95} + Q'_{A-1} \cdot x_{95}}{U_n} \cdot l_{A-1};$$

$$\Delta U_{A-1} = \frac{4,425 \cdot 0,33 + 3,218 \cdot 0,41}{35} \cdot 15 = 1,19 \text{ kV}.$$

$$\underline{S}_{1-2} = \underline{S}_{\Sigma 2} = \underline{S}_{P2} + \underline{S}_{P3} = (1,3 + j0,736) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{2-3} = \underline{S}_{\Sigma 3} = \underline{S}_{P3} = (0,9 + j0,436) \text{ MVA}.$$

$$\underline{S}_{1-4} = \underline{S}_{\Sigma 4} = \underline{S}_{P4} + \underline{S}_{P5} = (1,15 + j0,95) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{4-5} = \underline{S}_{\Sigma 5} = \underline{S}_{P5} = (0,35 + j0,35) \text{ MVA}.$$

$$\Delta U_{1-2} = \frac{P_{\Sigma 2} \cdot r_{70} + Q_{\Sigma 2} \cdot x_{70}}{U_n} \cdot l_{1-2}; \quad \Delta U_{1-2} = \frac{1,3 \cdot 0,45 + 0,736 \cdot 0,43}{35} \cdot 3 = 0,077 \text{ kV}.$$

$$\Delta U_{2-3} = \frac{P_{\Sigma 3} \cdot r_{70} + Q_{\Sigma 3} \cdot x_{70}}{U_n} \cdot l_{2-3}; \quad \Delta U_{2-3} = \frac{0,9 \cdot 0,45 + 0,436 \cdot 0,43}{35} \cdot 3 = 0,051 \text{ kV}.$$

$$\Delta U_{A-3} = \Delta U_{A-1} + \Delta U_{1-2} + \Delta U_{2-3} = 1,318 \text{ kV}.$$

На сличен начин се добива:

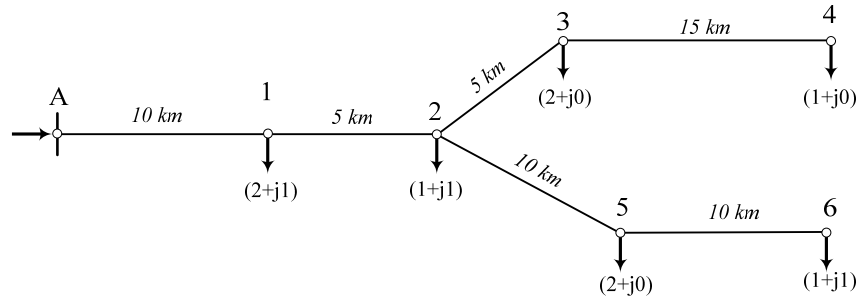
$$\Delta U_{1-4} = 0,106 \text{ kV}; \quad \Delta U_{4-5} = 0,009 \text{ kV} \quad \text{и} \quad \Delta U_{A-5} = 1,305 \text{ kV}.$$

Гледаме дека најголема загуба на напон во мрежата се има до точката "3", односно загубата на напон во мрежата ΔU ќе биде:

$$\Delta U = \Delta U_{A-5} = 1,318 \text{ kV или } \Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100 = \frac{1,318}{35} \div 100 = 3,77\%.$$

□ □ □

Задача 2.16: На сликата 2.16.1 е прикажана 35 kV мрежа. Сите водови се со исти подолжни параметри $\underline{z} = (0,35+j0,35) \Omega/\text{km}$, а нивните должини, изразени во km, се прикажани на сликата. Моќностите на поедините потрошувачи, во MVA, се дадени исто така на сликата. Приближно да се определи најголемата загуба на напон во мрежата.



Слика 2.16.1.

Решение:

Од самата конфигурација на мрежата но и од карактерот на потрошувачите, можеме да заклучиме дека најмал напон ќе имаат потрошувачите приклучени во периферните точки од мрежата "4" или "6", т.е. најголемата загуба на напон во мрежата ќе биде ΔU_{A-4} или ΔU_{A-6} .

За да ја одредиме максималната загуба на напон во мрежата ΔU потребно е, најнапред, да ја одредиме распределбата на моќности низ поедините водови, односно да ги одредиме моќностите $\underline{S}_{A-1}$, $\underline{S}_{1-2}$, . . . $\underline{S}_{5-6}$. Нив ќе ги одредиме приближно, со просто сумирање на моќностите на потрошувачите што се напојуваат преку секоја од овие делници, без земање предвид на загубите на моќност во водовите и на генерираните реактивни моќности Q_{Ci} , т.е.:

$$\underline{S}_{A-1} = \underline{S}_{\Sigma 1} = \underline{S}_{P1} + \underline{S}_{P2} + \underline{S}_{P3} + \underline{S}_{P4} + \underline{S}_{P5} + \underline{S}_{P6} = (9 + j3) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{1-2} = \underline{S}_{\Sigma 2} = \underline{S}_{P2} + \underline{S}_{P3} + \underline{S}_{P4} + \underline{S}_{P5} + \underline{S}_{P6} = (7 + j2) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{2-3} = \underline{S}_{\Sigma 3} = \underline{S}_{P3} + \underline{S}_{P4} = (3 + j0) \text{ MVA}; \quad \underline{S}_{3-4} = \underline{S}_{\Sigma 4} = \underline{S}_{P4} = (1 + j0) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{2-5} = \underline{S}_{\Sigma 5} = \underline{S}_{P5} + \underline{S}_{P6} = (3 + j1) \text{ MVA}; \quad \underline{S}_{5-6} = \underline{S}_{\Sigma 6} = \underline{S}_{P6} = (1 + j1) \text{ MVA}.$$

Сега можеме да ги пресметаме загубите на напон во одделните делници од мрежата. Притоа ќе го користиме упростениот израз за пресметка на загубата на напон ΔU (2.2.1). На тој начин ќе добиеме:

$$\Delta U_{A-1} = \frac{P_{A-1} \cdot r + Q_{A-1} \cdot x}{U_n} \cdot I_{A-1} = \frac{9 \cdot 0,35 + 3 \cdot 0,35}{35} = 1,2 \text{ kV}.$$

Слично се пресметуваат загубите на напон и во останатите делници. Тие изнесуваат:

$$\Delta U_{1-2} = 0,45 \text{ kV}; \quad \Delta U_{2-3} = 0,15 \text{ kV}; \quad \Delta U_{3-4} = 0,15 \text{ kV}; \quad \Delta U_{4-5} = 0,40 \text{ kV}; \quad \Delta U_{5-6} = 0,20 \text{ kV}.$$

Според тоа, ќе имаме:

$$\Delta U_{2-4} = \Delta U_{2-3} + \Delta U_{3-4} = 0,30 \text{ kV}; \quad \Delta U_{2-6} = \Delta U_{2-5} + \Delta U_{5-6} = 0,60 \text{ kV}.$$

Бидејќи $\Delta U_{2-6} > \Delta U_{2-4}$ следува дека напонот ќе биде најнизок во точката "6" т.е. дека најголемата загуба на напон во мрежата ќе биде:

$$\Delta U = \Delta U_{A-6} = \Delta U_{A-1} + \Delta U_{1-2} + \Delta U_{2-5} + \Delta U_{5-6};$$

$$\Delta U = 1,20 + 0,45 + 0,40 + 0,20 = 2,25 \text{ kV}.$$

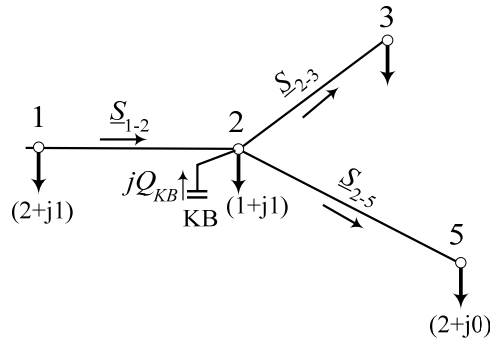
Значи најголемата загуба на напон во мрежата ќе биде:

$$\Delta U_{A-6} = U_A - U_6 = 2,25 \text{ kV};$$

или

$$\Delta U_{A-6}\% = \Delta U_{A-6} / U_n \cdot 100 = 7,43 \%.$$

Што ќе се случи ако сега, при истите оптоварувања, во јазелот "2" приклучиме кондензаторска батерија која ќе дава реактивна моќност $Q_{KB} = 2 \text{ MVA}$.



Слика 2.16.2.

Од билансот на моќности за јазлите 3, 4, 5, и 6 заклучуваме дека моќностите $\underline{S}_{2-3}$, $\underline{S}_{3-4}$, $\underline{S}_{2-5}$ и $\underline{S}_{5-6}$ ќе останат непроменети. Како последица на тоа непроменети ќе останат и соодветните загуби на напон во тие водови:

$$\Delta U_{2-4} = 0,3 \text{ kV} \text{ и } \Delta U_{2-6} = 0,6 \text{ kV}.$$

Билансот на моќности за јазелот "2" е изразен со равенката:

$$\underline{S}_{1-2} + jQ_{KB} = \underline{S}_{2-3} + \underline{S}_{2-5} + \underline{S}_{P2},$$

од каде што следува:

$$\underline{S}_{1-2} = \underline{S}_{2-3} + \underline{S}_{2-5} + \underline{S}_{P2} - jQ_{KB} = (7 + j0) \text{ MVA},$$

и понатаму:

$$\underline{S}_{A-1} = \underline{S}_{1-2} + \underline{S}_{P1} = (9 + j1) \text{ MVA}.$$

Значи, моќностите низ водовите A-1 и 1-2 се променети, а како последица на тоа, ќе се променат и загубите на напон ΔU_{A-2} и ΔU_{1-2} .

$$\Delta U_{A-1} = \frac{9 \cdot 0,35 + 1 \cdot 0,35}{35} \cdot 10 = 1,00 \text{ kV};$$

$$\Delta U_{1-2} = \frac{7 \cdot 0,35 + 01 \cdot 0,35}{35} \cdot 10 = 0,35 \text{ kV};$$

$$\Delta U_{A-2} = \Delta U_{A-1} + \Delta U_{1-2} = 1,35 \text{ kV}.$$

$$\Delta U_{A-4} = \Delta U_{A-2} + \Delta U_{2-4} = 1,65 \text{ kV},$$

$$\Delta U_{A-6} = \Delta U_{A-2} + \Delta U_{2-6} = 1,95 \text{ kV}..$$

Според тоа, во овој случај ќе имаме:

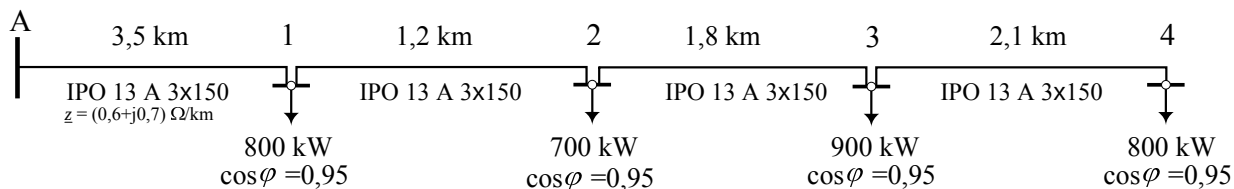
$$\Delta U = \Delta U_{A-6} = 1,95 \text{ kV}, \text{ или}$$

$$\Delta U\% = (1,95/35) \cdot 100 = 5,57 \%$$

□ □ □

Задача 2.17: Кабелски 10 kV извод со вкупна должина $L = l_{\Sigma} = 8,6$ km напојува 4 потрошувачи со вкупно оптоварување $P_{\Sigma} = 3,2$ MW. (слика 2.17.1). Сите потрошувачи имаат ист фактор на моќност $\cos \varphi = 0,95$. Нивните моќности, изразен во kW, се прикажани на самата слика 2.17.1. Сите секции (делници) од кабелскиот извод се изведени со кабли од типот IPO 13 A 3x150 6/10 kV и имаат подолжни параметри $\underline{z} = (r+jx) = (0,21+j0,08) \Omega/\text{km}$; $b=157 \mu\text{S}/\text{km}$, а нивните должини, изразени во km, се исто така прикажани на сликата 2.17.1.

Да се пресмета загубата на напон во мрежата ΔU .



Слика 2.17.1. Магистрален вод со 4 делници

Решение:

Во случајов се работи за магистрален вод, т.е. неразгранета мрежа во која сите секции се од ист тип и имаат исти карактеристики. Тоа овозможува задачата да се реши поедноставно, со помош на релацијата (4.25) или, пак, релацијата (4.33) од [1], како што ќе биде направено во оваа задача.

$$\Delta U = \sum_{k=1}^4 \Delta U_k = \sum_{k=1}^4 \frac{P_{\Sigma k} \cdot R_k + Q_{\Sigma k} \cdot X_k}{U_n} \equiv \sum_{k=1}^4 \frac{P_k \cdot R_{A-k} + Q_k \cdot X_{A-k}}{U_n}.$$

Бидејќи сите делници имаат исти подолжни параметри и сите потрошувачи имаат ист фактор на моќност, ќе важи:

$$R_{A-k} = r \cdot l_{A-k}; \quad X_{A-k} = x \cdot l_{A-k}; \quad k \in (1, 4) \text{ и}$$

$$Q_k = P_k \cdot \tan \varphi; \quad k \in (1, 4),$$

па во тој случај формулата за пресметка на загубата на напон ќе се упрости уште повеќе:

$$\Delta U = \sum_{k=1}^4 P_k \cdot l_{A-k} \cdot \frac{r + x \cdot \tan \varphi}{U_n} = \frac{r + x \cdot \tan \varphi}{U_n} \cdot \sum_{k=1}^4 P_k \cdot l_{A-k}.$$

Од самата слика добиваме:

$$\sum_{k=1}^4 P_k \cdot l_{A-k} = 800 \cdot 3,5 + 700 \cdot 4,7 + 900 \cdot 6,5 + 800 \cdot 8,6 = 18.200 \text{ kW} \times \text{km} = 18,82 \text{ MW} \times \text{km}.$$

Лесно може да се провери дека истиот резултат може да се добие и на поинаков начин, т.е. дека во исто време важи:

$$\sum_{k=1}^4 P_{\Sigma k} \cdot l_k = 3.200 \cdot 3,5 + 2.500 \cdot 1,2 + 1.700 \cdot 1,8 + 800 \cdot 2,1 = 18.200 \text{ kW} \times \text{km} = 18,82 \text{ MW} \times \text{km}.$$

што значи дека истовремено важи и општата релација (4.25):

$$\sum_{k=1}^n P_k \cdot l_{A-k} = \sum_{k=1}^n P_{\Sigma k} \cdot l_k.$$

Според тоа, за загубата на напон во мрежата ќе добиеме:

$$\Delta U = \frac{r + x \cdot \tan \varphi}{U_n} \cdot \sum_{k=1}^4 P_k \cdot l_{A-k} = \frac{0,21 + 0,08 \cdot 0,32868}{10} \cdot 18,82 = 0,445 \text{ kV} \text{ или}$$

$$\Delta U \% = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100 = \frac{0,445}{10} \cdot 100 = 4,45\%.$$

Задачата може да се реши и на поинаков начин, сличен на оној на којшто беше решена задачата бр. 2.11.

За секоја делница k на мрежата ќе важи:

$$\Delta U_k \% = \frac{P_{\Sigma k} \cdot l_k}{M_k}; \quad M_k = \frac{U_n^2}{100 \cdot (r_k + x_k \cdot \operatorname{tg} \varphi_k)}; \quad p_k = \frac{\Delta P_k \%}{\Delta U_k \%} = \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_k}{1 + (x_k / r_k) \cdot \operatorname{tg} \varphi_k}; \quad k \in (1, 4).$$

Бидејќи сите делници имаат исти карактеристики, тогаш за секое k ќе биде:

$$M_k = M = \frac{10^2 / 100}{(0,21 + 0,08 \cdot 0,32868)} = 4,232 \frac{\text{MW} \times \text{km}}{\%}; \quad p_k = p = \frac{1 + 0,32868^2}{1 + 0,08 / 0,21 \cdot 0,32868} = 0,98473.$$

$$\Delta U = \sum_{k=1}^4 \frac{P_{\Sigma k} \cdot l_k}{M_k} = \frac{1}{M} \cdot \sum_{k=1}^4 P_{\Sigma k} \cdot l_k = \frac{18,82}{4,232} = 4,45\%.$$

Значи го добивме истиот резултат како и претходно.

Да ги пресметаме сега и загубите на активна моќност ΔP во мрежата.

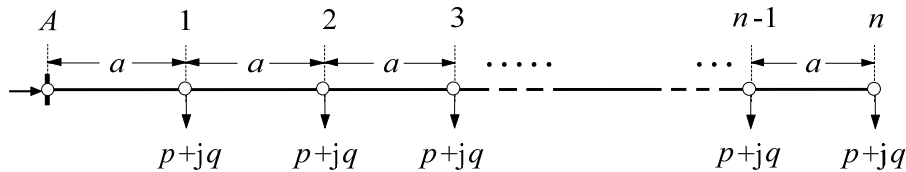
$$\Delta P = \sum_{k=1}^n \Delta P_k = \sum_{k=1}^n \frac{P_{\Sigma k}^2 + Q_{\Sigma k}^2}{U_n^2} \cdot R_k = \frac{r}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi} \cdot \sum_{k=1}^n P_{\Sigma k}^2 \cdot l_k;$$

$$\sum_{k=1}^4 P_{\Sigma k}^2 \cdot l_k = 3,2^2 \cdot 3,5 + 2,4^2 \cdot 1,2 + 1,7^2 \cdot 1,8 + 0,8^2 \cdot 2,1 = 49,298 \text{ MW} \times \text{km},$$

$$\Delta P = \frac{0,21}{10^2 \cdot 0,95^2} \cdot 49,298 = 0,1147 \text{ MW} \equiv 114,7 \text{ kW} \quad (3,58\%).$$

□ □ □

Задача 2.18: Да се изведат изразите за пресметка на загубата на напон ΔU и загубата на моќност ΔP во магистрален вод со должина $l = n \cdot a$ и подолжни параметри $\underline{z} = (r + jx)$ којшто напојува n идентични потрошувачи разместени на еднакви меѓусебни растојанија a , според сликата 2.18.1.



Слика 2.18. Идеализиран модел на рамномерно оптоварен магистрален вод

Решение:

Посматраниот случај е прикажан на сликата 2.18.1. Нека со $\underline{s} = (p + jq)$ го означиме оптоварувањето на еден од потрошувачите. Во тој случај вкупното оптоварување на водот ќе биде:

$$\underline{S} = (P + jQ) = n \cdot \underline{s}; \quad P = n \cdot p \quad \text{и} \quad Q = n \cdot q.$$

Со $\underline{S}_{\Sigma k} = (P_{\Sigma k} + jQ_{\Sigma k})$, како и досега, го означиме моќноста низ делницата k од мрежата. Тогаш, во согласност со сликата 2.18.1 ќе имаме:

$$P_{\Sigma n} = p;$$

$$P_{\Sigma n-1} = 2 \cdot p;$$

.....

$$P_{\Sigma k} = (n+1-k) \cdot p$$

.....

$$P_{\Sigma 1} = n \cdot p.$$

Напълно идентични односи ќе имаме и за реактивните моќности $Q_{\Sigma k}$ и q .

Понатаму имаме:

$$\sum_{k=1}^n P_{\Sigma k} = p + 2 \cdot p + \dots + n \cdot p = p \cdot \frac{n \cdot (n+1)}{2} = P \cdot \frac{n+1}{2} \text{ и } \sum_{k=1}^n Q_{\Sigma k} = Q \cdot \frac{n+1}{2}.$$

Загубата на напон ΔU_k во k -тата делница од мрежата ќе биде:

$$\Delta U_k = \frac{P_{\Sigma k} \cdot R_k + Q_{\Sigma k} \cdot X_k}{U_n} = \frac{P_{\Sigma k} \cdot r + Q_{\Sigma k} \cdot x}{U_n} \cdot a; \quad \forall k \in (1, n).$$

Тогаш вкупната загуба на напон ΔU во целиот магистрален вод ќе биде:

$$\begin{aligned} \Delta U &= \sum_{k=1}^n \Delta U_k = \sum_{k=1}^n \frac{P_{\Sigma k} \cdot r + Q_{\Sigma k} \cdot x}{U_n} \cdot a = \sum_{k=1}^n \frac{P_{\Sigma k} \cdot r + Q_{\Sigma k} \cdot x}{U_n} \cdot \frac{l}{n}. \\ \Delta U &= \frac{n+1}{2n} \cdot \sum_{k=1}^n \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_n} = \frac{n+1}{2n} \cdot \Delta U_{\text{конц}}. \end{aligned} \quad (2.18.1)$$

Во последниот израз со $\Delta U_{\text{конц}}$ е означена загубата на напон во водот за случајот кога сите потрошувачи се концентрирани на крајот од водот.

На сличен начин се постапува и при пресметувањето на загубите на активна моќност ΔP . Во општ случај, загубата на моќност во k -тата делница од мрежата ќе биде:

$$\Delta P_k = \frac{P_{\Sigma k}^2 + Q_{\Sigma k}^2}{U_n^2} \cdot r \cdot a = \frac{P_{\Sigma k}^2 + Q_{\Sigma k}^2}{U_n^2} \cdot \frac{R}{n}; \quad \forall k \in (1, n).$$

Сумарните загуби на активна моќност ΔP ќе бидат:

$$\begin{aligned} \Delta P &= \sum_{k=1}^n \Delta P_k = \frac{R}{n \cdot U_n^2} \cdot \left[\sum_{k=1}^n P_{\Sigma k}^2 + \sum_{k=1}^n Q_{\Sigma k}^2 \right]. \text{ Притоа важи:} \\ \sum_{k=1}^n P_{\Sigma k}^2 &= p^2 + (2p)^2 + \dots + (np)^2 = p^2 \cdot (1^2 + 2^2 + \dots + n^2) \text{ или} \\ \sum_{k=1}^n P_{\Sigma k}^2 &= p^2 \cdot \frac{n \cdot (n+1) \cdot (2n+1)}{6} = \frac{(n+1) \cdot (2n+1)}{6n} \cdot P^2. \end{aligned}$$

$$\text{Слично: } \sum_{k=1}^n Q_{\Sigma k}^2 = \frac{(n+1) \cdot (2n+1)}{6n} \cdot Q^2.$$

Според тоа, за вкупните загуби ΔP ќе добиеме:

$$\begin{aligned} \Delta P &= \sum_{k=1}^n \Delta P_k = \frac{R}{n \cdot U_n^2} \cdot \frac{(n+1) \cdot (2n+1)}{6n} \cdot (P^2 + Q^2), \text{ или} \\ \Delta P &= \frac{(n+1) \cdot (2n+1)}{6n^2} \cdot \frac{P^2 + Q^2}{U_n^2} \cdot R = \frac{(n+1) \cdot (2n+1)}{6n^2} \cdot \Delta P_{\text{конц}}. \end{aligned} \quad (2.18.2)$$

Слично како и во претходниот случај со вкупната загуба на напон, во последниот израз со $\Delta P_{\text{конц}}$ е означена загубата на активна моќност во водот за случајот кога сите потрошувачи се концентрирани на крајот од водот.

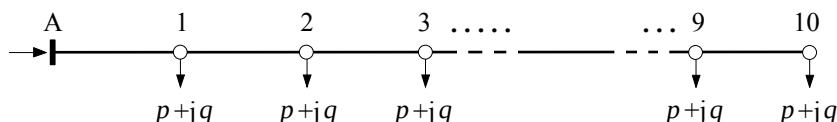
□ □ □

Задача бр. 2.19. Нисконапонски (НН) надземен вод ($U_n = 400 \text{ V}$) со должина $l = 300 \text{ m}$ и со подолжни параметри $r = 0,647 \Omega/\text{km}$ и $x = 0,33 \Omega/\text{km}$ се состои од вкупно $n = 10$ распони со приближно еднакви должини $a = l/n = 30 \text{ m}$, како што е тоа прикажано на сликата. Водот напојува 20 индивидуални станбени објекти од типот П+1 во кои живеат вкупно 40 домаќинства, чија што сумарна врвна моќност изнесува $P = P_{\Sigma} = 92 \text{ kW}$; $\cos \varphi = 0,97$. Може да се смета дека потро-

шувачите се рамномерно распределени по должината на водот и дека од секој столб, на сликата означен со мал круг, потрошувачите одземаат трифазна моќност $p = 9,2 \text{ kW}$ при $\cos \varphi = 0,97$. Напонот на почетокот од водот изнесува $U_A = 400 \text{ V}$. Да се пресмета:

- загубата на напон во водот $\Delta U\%$ во проценти и ΔU во волти;
- напонот кај крајниот потрошувач U_{10} ;
- вкупните загуби на активна моќност во водот ΔP .

Решение:



Слика 2.19. Мрежа со рамномерно распределен товар

За прикажаниот вод ќе имаме:

$$P_{\Sigma} = 92 \text{ kW}; \quad Q_{\Sigma} = P_{\Sigma} \tan \varphi = 92 \cdot 0,25 = 23 \text{ kvar}; \quad R = r \cdot l = 0,194 \, \Omega; \quad X = x \cdot l = 0,1 \, \Omega.$$

Пресметка на загубите на напон

Загубата на напон во водот ΔU , според изнесеното во задачата бр. 2.18 ќе биде:

$$\Delta U = \frac{n+1}{2n} \cdot \frac{P_{\Sigma} \cdot R + Q_{\Sigma} \cdot X}{U_n} = \frac{n+1}{2n} \cdot \Delta U_{\text{конц}};$$

$$\Delta U_{\text{конц}} = \frac{92 \cdot 0,194 + 23 \cdot 0,1}{0,4} = 50,37 \text{ V}; \quad \Delta U = \frac{11}{20} \cdot 50,37 = 27,7 \text{ V}.$$

а процентуалната загуба на напон ќе биде:

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100 = \frac{27,7}{400} \cdot 100 = 6,93\%.$$

Значи крајниот потрошувач ќе прима електрична енергија при напон:

$$U_n = U_{10} = U_A - \Delta U = 400 - 27,7 = 372,3 \text{ V}.$$

Пресметка на загубите на моќност

Во согласност со изразите (2.18.2) за загубите на активна моќност во водот ќе имаме:

$$\Delta P_{\text{конц}} = \frac{P^2 + Q^2}{U_n^2} \cdot R = \frac{92^2 + 23^2}{0,4^2} \cdot 0,194 = 10,94 \text{ kW}$$

$$\Delta P = \frac{(n+1) \cdot (2n+1)}{6n^2} \cdot \Delta P_{\text{конц}} = \frac{11 \cdot 21}{6 \cdot 100} \cdot 10,94 = 0,385 \cdot 10,94 = 4,2 \text{ kW}.$$

$$\Delta P\% = \frac{\Delta P}{P_{\Sigma}} \cdot 100 = \frac{4,2}{92} \cdot 100 = 4,56\%.$$

□ □ □

Задача 2.20: Проблемот обработен во задачата 2.19 да се реши со примена на моделот за рамномерно распределен континуиран товар. Колкави се разликите што се прават при пресметката на загубите на напон ΔU и на моќност ΔP во мрежата.

Бројни вредности: $U_n = 400 \text{ V}$; $l = 300 \text{ m}$; $\underline{z} = (r+jx) = (0,647+j0,33) \, \Omega/\text{km}$; $P = P_{\Sigma} = 92 \text{ kW}$; $\cos \varphi = 0,97$.

Решение:

Загубата на напон $\Delta U_{\text{конц}}$ и загубата на моќност $\Delta P_{\text{конц}}$ во водот кога целиот товар е концентриран на крајот од водот ќе бидат:

$$\Delta U_{\text{конц}} = \frac{P_{\Sigma} \cdot R + Q_{\Sigma} \cdot X}{U_n} = \frac{92 \cdot 0,194 + 23 \cdot 0,1}{0,4} = 50,37 \text{ V};$$

$$\Delta P_{\text{конц}} = \frac{P_{\Sigma}^2 + Q_{\Sigma}^2}{U_n^2} \cdot R = \frac{92^2 + 23^2}{0,4^2} \cdot 0,194 = 10,94 \text{ kW}.$$

Според тоа, загубата на напон ΔU и загубата на моќност ΔP во водот кога товарот е континуиран и рамномерно распределен по неговата должина ќе биде:

$$\Delta U = \frac{1}{2} \cdot \Delta U_{\text{конц}} = \frac{1}{2} \cdot 50,37 = 25,19 \text{ V} \quad (6,3\%);$$

$$\Delta P = \frac{1}{3} \cdot \Delta P_{\text{конц}} = \frac{1}{3} \cdot 10,94 = 3,65 \text{ kW} \quad (3,97\%).$$

Во примерот 2.19 за истите овие величини ги добивме следните вредности:

$$\Delta U = 27,7 \text{ V} \quad (6,93\%) \text{ и } \Delta P = 4,2 \text{ kW} \quad (4,56\%).$$

Значи добивме вредности што се помали од вистинските. Може да се констатира дека моделот на континуиран, рамномерно распределен, товар секогаш дава помали вредности за загубите ΔU и ΔP во мрежата во однос на вистинските. Во принцип, со зголемувањето на бројот n на потрошувачите во мрежата овие разлики ќе се намалуваат.

□ □ □

Задача 2.21. За општиот случај на мрежа со рамномерно распределен товар (слика 2.18), со произволен број потрошувачи n , да се изведе изразот за пресметка на напонот U_i во произволен јазел од мрежата. Потоа, за случајот анализиран во задачата 2.19 ($n = 5$) да се пресмета колкав ќе биде напонот на средината од водот $U_{\text{средина}} = U_5 = ?$

Решение:

Загубата на напон $\Delta u = \Delta U_n$ во последната делница од мрежата ќе изнесува (приближно):

$$\Delta U_{k=n} = \Delta u = \frac{p \cdot r + q \cdot x}{U_n} \cdot a = \frac{(P_{\Sigma} / n) \cdot (R / n) + (Q_{\Sigma} / n) \cdot (X / n)}{U_n}, \text{ или}$$

$$\Delta u = \frac{1}{n^2} \cdot \frac{P_{\Sigma} \cdot R + Q_{\Sigma} \cdot X}{U_n} = \frac{1}{n^2} \cdot \Delta U_{\text{конц}}.$$

Бидејќи според изразот (2.18.1) важи:

$$\Delta U = \frac{n+1}{2n} \cdot \Delta U_{\text{конц}} \Rightarrow \Delta U_{\text{конц}} = \frac{2n}{n+1} \cdot \Delta U.$$

Понатаму следува:

$$\Delta u = \frac{1}{n^2} \cdot \Delta U_{\text{конц}} = \frac{1}{n^2} \cdot \frac{2n}{(n+1)} \cdot \Delta U = \frac{2}{n \cdot (n+1)} \cdot \Delta U.$$

Во согласност со изведеното во примерот обработуван од задачата 2.18, моќноста низ k -тата делница од мрежата ќе биде:

$$P_{\Sigma k} = (n+1-k) \cdot p = \frac{n+1-k}{n} \cdot P_{\Sigma}; \quad Q_{\Sigma k} = \frac{n+1-k}{n} \cdot Q_{\Sigma}; \quad \forall k \in (1, n).$$

Загубата на напон ΔU_k во k -тата делница од мрежата ќе биде:

$$\Delta U_k = \frac{P_{\Sigma k} \cdot (R / n) + Q_{\Sigma k} \cdot (X / n)}{U_n} = \frac{n+1-k}{n^2} \cdot \frac{P_{\Sigma} \cdot R + Q_{\Sigma} \cdot X}{U_n}; \quad \forall k \in (1, n),$$

$$\Delta U_k = \frac{n+1-k}{n^2} \cdot \Delta U_{\text{конц}} = (n+1-k) \cdot \Delta u; \quad \forall k \in (1, n).$$

Понатаму, за напонот U_i кај i -тиот потрошувач ќе имаме:

$$U_i = U_A - \Delta U_1 - \Delta U_2 - \dots - \Delta U_i,$$

или тргнувајќи од крајот на водот:

$$U_i = U_n + \Delta U_n + \Delta U_{n-1} + \dots + \Delta U_{i+1} = (U_A - \Delta U) + \sum_{k=i+1}^n \Delta U_k,$$

$$U_i = U_A - \Delta U + \Delta u + 2\Delta u + 3\Delta u + \dots + (n-i) \cdot \Delta u;$$

$$U_i = U_A - \Delta U + \Delta u \cdot (1 + 2 + 3 + \dots + n-i) = U_A - \Delta U + \Delta u \cdot \frac{(n-i) \cdot (n+1-i)}{2};$$

$$U_i = U_A - \Delta U + \frac{2 \cdot \Delta U}{n \cdot (n+1)} \cdot \frac{(n-i) \cdot (n+1-i)}{2};$$

$$U_i = U_A - \Delta U \cdot \left[1 - \frac{(n-i) \cdot (n+1-i)}{n \cdot (n+1)} \right]; \quad \forall i \in (1, n). \quad (2.21.1)$$

За $i = 5$ ќе добиеме:

$$U_5 = 400 - 27,7 \cdot \left[1 - \frac{5 \cdot 6}{10 \cdot 11} \right] = 379,85 \text{ V}.$$

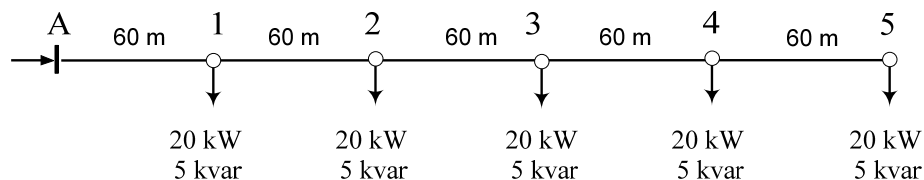
Подоцна, во задачата 2.27 ќе се покаже дека во идеализиран случај на континуиран, рамномерно распределен, товар напонот на средината од водот U_{sr} ќе изнесува:

$$U_{\text{середина}} = U_A - (3/4) \cdot \Delta U = 400 - 0,75 \cdot 27,7 = 379,23 \text{ V}.$$

□ □ □

Задача бр. 2.22. Нисконапонски (НН) надземен вод ($U_n = 400 \text{ V}$) со должина $l = 200 \text{ m}$ и со подолжни параметри $r = 0,647 \Omega/\text{km}$ и $x = 0,33 \Omega/\text{km}$ се состои од вкупно $n = 5$ распони со приближно еднакви должини $a = l/n = 40 \text{ m}$, како што е тоа прикажано на сликата 2.22.1. Водот напојува 5 потрошувачи со приближно исти карактеристики. Сумарната врвна моќност на потрошувачите изнесува $P = P_{\Sigma} = 100 \text{ kW}$; $\cos \varphi = 0,97$. Може да се смета дека потрошувачите се рамномерно распределени по должината на водот и дека од секој столб, на сликата означен со мал круг, потрошувачите одземаат трифазна моќност $p = 20 \text{ kW}$ при $\cos \varphi = 0,95$. Напонот на почетокот од водот изнесува $U_A = 405 \text{ V}$. Да се пресметаат напоните U_1, U_2, U_3, U_4 и U_5 во одделните точки по должината на водот.

Бројни вредности: $l = 0,2 \text{ km}$; $r = 0,647 \Omega/\text{km}$; $x = 0,33 \Omega/\text{km}$; $P_{\Sigma} = 100 \text{ kW}$; $\cos \varphi = 0,95$; $U_A = 400 \text{ V}$.



Слика 2.22.1. Мрежа со 5 идентични, рамномерно распределени потрошувачи

Решение:

Во претходната задача беше изведен изразот (2.21.1) за пресметка на напонот U_i кај i -тиот потрошувач од мрежата:

$$\Delta U = \frac{n+1}{2n} \cdot \frac{P_{\Sigma} \cdot R + Q_{\Sigma} \cdot X}{U_n} = \frac{n+1}{2n} \cdot \Delta U_{\text{конц}};$$

$$U_i = U_A - \Delta U \cdot \left[1 - \frac{(n-i) \cdot (n+1-i)}{n \cdot (n+1)} \right]; \quad \forall i \in (1, n).$$

Применувајќи ја оваа формула добиваме:

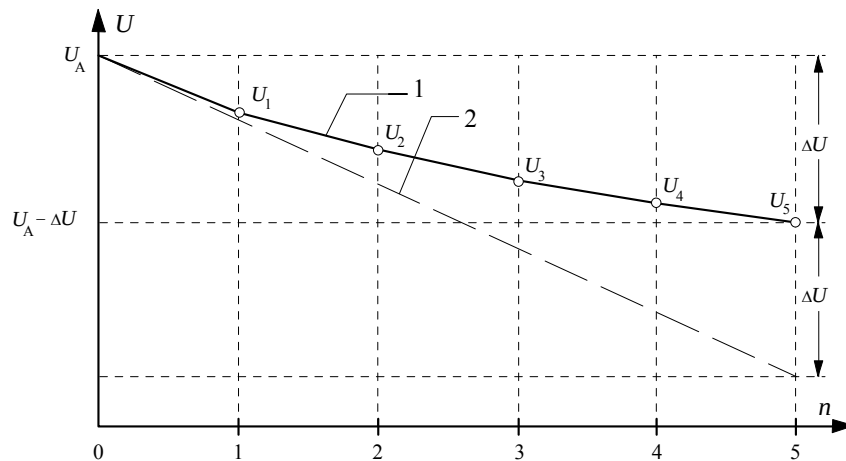
$$\Delta U_{\text{конц}} = \frac{P_{\Sigma} \cdot r + Q_{\Sigma} \cdot x}{U_n} \cdot l = \frac{100 \cdot 0,647 + 32,87 \cdot 0,33}{0,4} \cdot 0,2 = 37,8 \text{ V}$$

$$\Delta U = \frac{n+1}{2n} \cdot \Delta U_{\text{конц}} = \frac{6}{2 \cdot 5} \cdot 37,8 = 0,6 \cdot 37,8 = 22,7 \text{ V}.$$

$$U_1 = 405 - 22,7 \cdot \left(1 - \frac{4 \cdot 5}{5 \cdot 6} \right) = 397,4 \text{ V}; \quad U_2 = 405 - 22,7 \cdot \left(1 - \frac{3 \cdot 4}{5 \cdot 6} \right) = 391,4 \text{ V};$$

$$U_3 = 405 - 22,7 \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot 3}{5 \cdot 6} \right) = 386,8 \text{ V}; \quad U_4 = 405 - 22,7 \cdot \left(1 - \frac{1 \cdot 2}{5 \cdot 6} \right) = 383,8 \text{ V};$$

$$U_5 = 405 - 22,7 \cdot \left(1 - \frac{0 \cdot 1}{5 \cdot 6} \right) = 382,3 \text{ V}.$$



Слика 2.21.2 Напонски профил по должината на водот: 1) кога товарот е распределен, 2) кога товарот е концентриран на крајот од водот

На сликата 2.22.2 е прикажан напонскиот профил долж разгледуваниот вод (крива 1 – со полна линија). На истата слика е прикажан и напонскиот профил за случајот кога сиот товар би бил концентриран на крајот од водот (крива 2 – со испрекината линија).

□ □ □

Задача бр. 2.23. Се посматра водот од претходната задача бр.2.22. Во некој режим на работа е утврдено со мерење дека напонот на почетокот изнесувал $U_A = 395 \text{ V}$, а во исто време напонот на крајот од водот изнесувал $U_5 = 370 \text{ V}$. Да се процени колкави се во тој момент напоните во мрежата и колкаво е сумарното оптоварување P_{Σ} . Во пресметките да се усвои дека сите потрошувачи имаат исти карактеристики и ист фактор на моќност $\cos \varphi = 0,97$.

Решение:

Во претходната задача беа изведени изразите за пресметка на вкупната загуба на напон во мрежата ΔU како и загубите ΔU_i во поедините делници:

$$\Delta U = \frac{n+1}{2n} \cdot \Delta U_{\text{конц}} = \frac{n+1}{2n} \cdot \frac{P_{\Sigma} \cdot R}{U_n} \cdot \left(1 + \frac{x}{r} \cdot \tan \varphi \right);$$

$$\Delta U_i = \frac{P_{\Sigma i} \cdot R_i + Q_{\Sigma i} \cdot X_i}{U_n} = \frac{2(n+1-i)}{n \cdot (n+1)} \cdot \Delta U; i = 1, n.$$

Разликата на напоните U_A и U_5 ќе биде:

$$U_A - U_5 = \Delta U_{A-5} = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 + \Delta U_4 + \Delta U_5 = 395 - 375 = 20 \text{ V.}$$

Понатаму имаме:

$$\Delta U_{A-5} = \frac{2 \cdot \Delta U}{n \cdot (n+1)} \cdot [n + (n-1) + (n-2) + (n-3) + (n-4)] = \frac{2 \Delta U}{10 \cdot 11} \cdot 40 = \frac{8}{11} \cdot \Delta U,$$

од каде што се добива:

$$\Delta U = \frac{11}{8} \cdot \Delta U_{A-5} = \frac{11}{8} \cdot 20 = 27,5 \text{ V.}$$

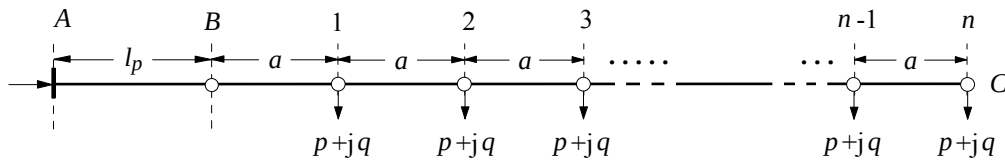
$$U_{10} = U_A - \Delta U = 395 - 27,5 = 367,5 \text{ V.}$$

Откога ја пресметавме (проценивме) вкупната загуба на напон во водот ΔU , ќе можеме да го процениме и вкупното оптоварување на водот P_{Σ} :

$$P_{\Sigma} = \frac{2n}{n+1} \cdot \frac{\Delta U \cdot U_n}{R} \cdot \frac{1}{1 + (x/r) \cdot \tan \varphi} = \frac{20}{11} \cdot \frac{27,5 \cdot 380}{0,1875} \cdot \frac{1}{1,184} = 85,6 \text{ kW}; \quad S_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma}}{\cos \varphi} = 90 \text{ kVA}.$$

□ □ □

Задача бр. 2.24. На сликата 2.24.1 е прикажан магистрален вод со познати параметри r , x и l . Водот напојува n идентични потрошувачи со сумарна моќност $\underline{S}_{\Sigma} = P_{\Sigma} + jQ_{\Sigma}$. Растојанието помеѓу секои два соседни потрошувача изнесува a . Должината на потегот А-1 помеѓу напојната точка "А" и првиот потрошувач (точка 1) изнесува $l' = l_p + a \neq a$. Да се изведат изразите за пресметување на загубите на напон ΔU и на моќност ΔP во магистралниот вод.



Слика 2.24.1. Идеализиран модел на магистрален вод со продолжена прва делница

Решение:

Задачата наједноставно ќе ја решиме ако магистралниот вод го поделиме на две секции: А-В и В-С. Должината на првата секција (делот А-В) ќе ја означиме со l_p . Нека е $l_p = f_p \cdot a$, каде што со f_p е означен т.н. "фактор на продолжување" на магистралниот вод. Должината на втората секција В-С изнесува $n \cdot a$, така што за вкупната должина l на магистралниот вод важи:

$$l = l_p + n \cdot a = (f_p + n) \cdot a$$

Ако со $R = r \cdot l$ и $X = x \cdot l$ ги означиме вкупната активна и реактивна отпорност на магистралниот вод, тогаш за активните и реактивните отпорности на неговите секции ќе важи:

$$R_{A-B} = r \cdot l_p = R \cdot \frac{f_p \cdot a}{l}; \quad X_{A-B} = x \cdot l_p = X \cdot \frac{f_p \cdot a}{l},$$

$$R_{B-C} = r \cdot n \cdot a = R \cdot \frac{n \cdot a}{l}; \quad X_{B-C} = x \cdot n \cdot a = X \cdot \frac{n \cdot a}{l}.$$

Пресметување на загубата на напон ΔU

Согласно со поделбата на водот на две секции, за загубата на напон во водот ΔU ќе можеме да пишуваме $\Delta U = \Delta U_{A-B} + \Delta U_{B-C}$. Притоа ќе важи:

$$\Delta U_{A-B} = \frac{P_{\Sigma} \cdot R_{A-B} + Q_{\Sigma} \cdot X_{A-B}}{U_n} = \frac{f_p \cdot a}{l} \cdot \frac{P_{\Sigma} \cdot R + Q_{\Sigma} \cdot X}{U_n},$$

$$\Delta U_{B-C} = \frac{n+1}{2n} \cdot \frac{P_{\Sigma} \cdot R_{B-C} + Q_{\Sigma} \cdot X_{B-C}}{U_n} = \frac{n \cdot a}{l} \cdot \frac{n+1}{2n} \cdot \frac{P_{\Sigma} \cdot R + Q_{\Sigma} \cdot X}{U_n}.$$

Според тоа, за вкупната загуба на напон добиваме:

$$\Delta U = \frac{f_p \cdot a}{l} \cdot \frac{P_{\Sigma} \cdot R + Q_{\Sigma} \cdot X}{U_n} + \frac{n \cdot a}{l} \cdot \frac{n+1}{2n} \cdot \frac{P_{\Sigma} \cdot R + Q_{\Sigma} \cdot X}{U_n};$$

$$\Delta U = k_{\Delta U} \cdot \frac{P_{\Sigma} \cdot R + Q_{\Sigma} \cdot X}{U_n} = k_{\Delta U} \cdot \Delta U_{\text{конц}},$$

каде што е:

$$k_{\Delta U} = \frac{2f_p + n + 1}{2 \cdot (f_p + n)} \quad \text{и} \quad \Delta U_{\text{конц}} = \frac{P_{\Sigma} \cdot R + Q_{\Sigma} \cdot X}{U_n}.$$

Пресметување на загубата на напон ΔP

Слично како и во претходниот случај, ќе имаме:

$$\Delta P = \Delta P_{A-B} + \Delta P_{B-C},$$

$$\Delta P_{A-B} = \frac{P_{\Sigma}^2 + Q_{\Sigma}^2}{U_n^2} \cdot R_{A-B} = \frac{f_p \cdot a}{l} \cdot \frac{P_{\Sigma}^2 + Q_{\Sigma}^2}{U_n^2} \cdot R,$$

$$\Delta P_{B-C} = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6n^3} \cdot \frac{P_{\Sigma}^2 + Q_{\Sigma}^2}{U_n^2} \cdot R_{B-C} = \frac{n \cdot a}{l} \cdot \frac{n(n+1)(2n+1)}{6n^3} \cdot \frac{P_{\Sigma}^2 + Q_{\Sigma}^2}{U_n^2} \cdot R,$$

$$\Delta P = \Delta P_{A-B} + \Delta P_{B-C} = \left[\frac{f_p \cdot a}{l} + \frac{n \cdot a}{l} \cdot \frac{n(n+1)(2n+1)}{6n^3} \right] \cdot \frac{P_{\Sigma}^2 + Q_{\Sigma}^2}{U_n^2} \cdot R \quad \text{или}$$

$$\Delta P = k_{\Delta P} \cdot \Delta P_{\text{конц}}.$$

каде што е:

$$k_{\Delta P} = \frac{1}{f_p + n} \cdot \left[f_p + \frac{(n+1) \cdot (2n+1)}{6n} \right];$$

$$\Delta P_{\text{конц}} = \frac{P_{\Sigma}^2 + Q_{\Sigma}^2}{U_n^2} \cdot R.$$

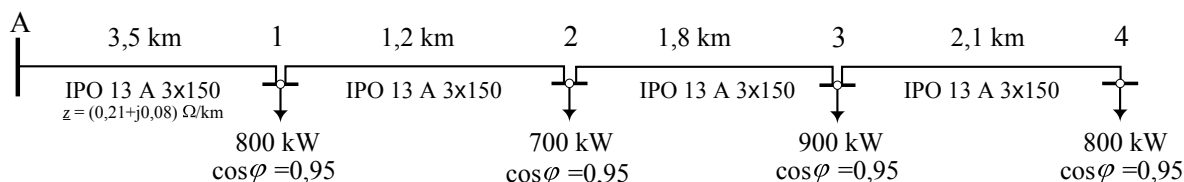
Значи загубата на напон ΔU и загубите на моќност ΔP во разгледуваниот случај ќе може да ги пресметаме со формулите кои важат за случајот кога целиот товар е концентриран на крајот од водот, но со дополнителна корекција, според релациите:

$$\Delta U = k_{\Delta U} \cdot \frac{P_{\Sigma} \cdot R + Q_{\Sigma} \cdot X}{U_n} = k_{\Delta U} \cdot \Delta U_{\text{конц}}; \quad k_{\Delta U} = \frac{2f_p + n + 1}{2(f_p + n)}; \quad \Delta U_{\text{конц}} = \frac{P_{\Sigma} \cdot R + Q_{\Sigma} \cdot X}{U_n};$$

$$\Delta P = k_{\Delta P} \cdot \Delta P_{\text{конц}}; \quad k_{\Delta P} = \frac{1}{f_p + n} \cdot \left[f_p + \frac{(n+1) \cdot (2n+1)}{6n} \right]; \quad \Delta P_{\text{конц}} = \frac{P_{\Sigma}^2 + Q_{\Sigma}^2}{U_n^2} \cdot R.$$

□ □ □

Задача 2.25: Примерот обработен во задачата 2.17 да се реши приближно, со помош на идеализираниот модел изведен во задачата 2.24. Да се изврши проценка на точноста на добиениот резултат и да се даде оценка на применливоста на идеализираниот модел за добивање приближни, но брзи, проценки на состојбата во една реална мрежа.



Слика 2.25.1. Магистрален вод со 4 делници

Решение:

Ќе го решиме најнапред случајот кога целиот товар е концентриран на крајот од водот. Во тој случај загубата на напон $\Delta U_{\text{конц}}$ и загубата на моќност $\Delta P_{\text{конц}}$ ќе бидат:

$$P_{\Sigma} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 800 + 700 + 900 + 800 = 3.200 \text{ kW};$$

$$Q_{\Sigma} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 1.052 \text{ kvar};$$

$$l_{\Sigma} = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 = 3,5 + 1,2 + 1,8 + 2,1 = 8,6 \text{ km.}$$

$$R = r \cdot l_{\Sigma} = 0,21 \cdot 8,6 = 1,806 \text{ } \Omega; \quad X = x \cdot l_{\Sigma} = 0,08 \cdot 8,6 = 0,688 \text{ } \Omega.$$

$$\Delta U_{\text{конц}} = \frac{P_{\Sigma} \cdot R + Q_{\Sigma} \cdot X}{U_n} \cdot R = \frac{3.200 \cdot 1,806 + 1.052 \cdot 0,688}{10} = 650,3 \text{ V} \equiv 6,053\%;$$

$$\Delta P_{\text{конц}} = \frac{P_{\Sigma}^2 + Q_{\Sigma}^2}{U_n^2} \cdot R = \frac{3.200^2 + 1.052^2}{10^2} \cdot 1,806 = 0,205 \text{ MW} \equiv 6,404\%.$$

Просечниот распон a помеѓу секои две соседни потрошувачи ќе биде:

$$a = \frac{1,2 + 1,8 + 2,1}{3} = 1,7 \text{ km.}$$

Факторот на продолжување на кабелот f_p ќе биде:

$$f_p = \frac{l - n \cdot a}{a} = \frac{8,6 - 4 \cdot 1,7}{1,7} = 1,05882. \text{ Понатаму имаме:}$$

$$k_{\Delta U} = \frac{2f_p + n + 1}{2 \cdot (f_p + n)} = \frac{2 \cdot 1,05882 + 5}{5,05882} = 0,703;$$

$$k_{\Delta P} = \frac{1}{f_p + n} \cdot \left[f_p + \frac{(n+1) \cdot (2n+1)}{6n} \right] = 0,58.$$

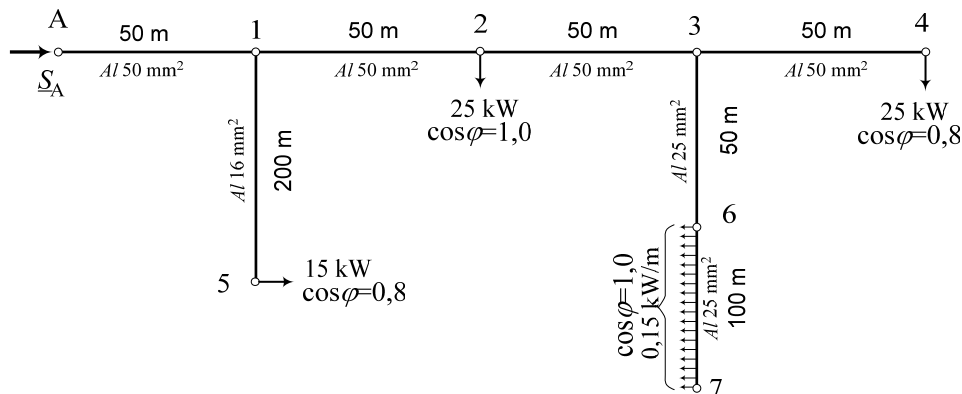
$$\Delta U = k_{\Delta U} \cdot \Delta U_{\text{конц}} = 0,703 \cdot 650,3 = 457 \text{ V} \equiv 4,57\%,$$

$$\Delta P = k_{\Delta P} \cdot \Delta P_{\text{конц}} = 0,58 \cdot 0,205 = 0,119 \text{ MW} \equiv 3,72\%.$$

Гледаме дека ги добивме практично истите резултати како и со "точните" пресметки направени во примерот 2.17 ($\Delta U = 4,45\%$ и $\Delta P = 3,58\%$). Одовде произлегува заклучокот дека идеализираните модели, како оној од задачата 2.22, кои даваат решение во затворена форма и овозможуваат едноставен начин на пресметување, честопати можат да се користат за брзи (но сепак за практиката доволно прецизни) проценки за состојбата во една мрежа, дури и тогаш кога таа се разликува по својата топологија и структура од идеализираниот случај.

□ □ □

Задача 2.26: Разгранета радијална трифазна мрежа со номинален напон 380 V напојува поголем број на потрошувачи (сл. 2.26.1). Сите водови се изведени со спроводници од алуминиум, прицврстени на дрвени столбови со потпорни изолатори, при што спроводниците се сместени во темињата на рамностран триаголник со страна $D = 60$ cm. Должините на поедините делници се дадени во метри, а оптоварувањата во kW. Магистралниот дел од мрежата, потегот А-4, е изведен со ист пресек Al 50 mm² ($r_{50} = 0,63 \Omega/\text{km}$, $x_{50} = 0,325 \Omega/\text{km}$).



Слика 2.26.1. Разгранета НН мрежа од задачата 2.26

Отцепот 1–5 има пресек 16 mm² ($r_{16} = 1,96 \Omega/\text{km}$, $x_{16} = 0,358 \Omega/\text{km}$), додека отцепот 3–7 има пресек 25 mm² ($r_{25} = 1,27 \Omega/\text{km}$, $x_{25} = 0,345 \Omega/\text{km}$).

Потребно е да се одреди загубата на напон и загубата на активна моќност во прикажаната мрежа.

Решение:

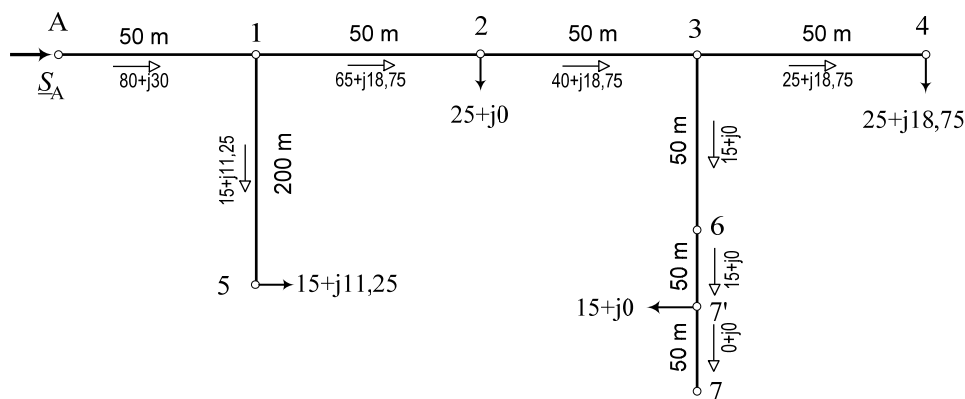
Најнапред ќе ги определиме приближните текови на моќностите во мрежата. Активните и реактивните моќности на одделните потрошувачи ќе бидат:

$$\underline{S}_{P2} = 25 + j25 \cdot 0 = (25 + j0) \text{ kVA};$$

$$\underline{S}_{P4} = 25 + j25 \cdot 0,75 = (25 + j18,75) \text{ kVA};$$

$$\underline{S}_{P5} = 15 + j15 \cdot 0,75 = (15 + j11,25) \text{ kVA};$$

$$\underline{S}_{\Sigma 6} = 15 + j15 \cdot 0 = (15 + j0) \text{ kVA}.$$



Слика 2.26.2. Пресметка на напонски прилики во мрежата

Распределбата на моќности во мрежата се одредува лесно, со примена на I Кирхофов закон за моќности, бидејќи мрежата е радијална (отворена). Притоа, бидејќи се работи за определување на загубата на напон во мрежата, распределениот товар на потегот 6-7 ќе го претставиме како концентриран, поставен во средината, како што е тоа прикажано на сликата. Пресметаните, приближни, вредности на моќностите низ гранките од мрежата се прикажани на самата слика:

Понатаму следува пресметка на загубата на напон по поедините делници од мрежата. Загубата на напон во магистралниот дел А-1 од мрежата ќе биде:

$$\Delta U_{A-1} = \frac{P_{A-1} \cdot r_{50} + Q_{A-1} \cdot x_{50}}{U_n} \cdot I_{A-1};$$

$$\Delta U_{A-1} = \frac{80 \cdot 0,63 + 30 \cdot 0,325}{0,38} \cdot 0,050 = 7,9 \text{ V.}$$

Слично се добива загубата на напон и во останатите делници:

$$\Delta U_{1-2} = 6,2 \text{ V}; \quad \Delta U_{2-3} = 4,2 \text{ V}; \quad \Delta U_{3-4} = 2,9 \text{ V}; \quad \Delta U_{1-5} = 17,6 \text{ V}; \quad \Delta U_{3-7'} = 5,0 \text{ V.}$$

Од овде произлегува:

$$\Delta U_{A-4} = \Delta U_{A-1} + \Delta U_{1-2} + \Delta U_{2-3} + \Delta U_{3-4} = 21,2 \text{ V};$$

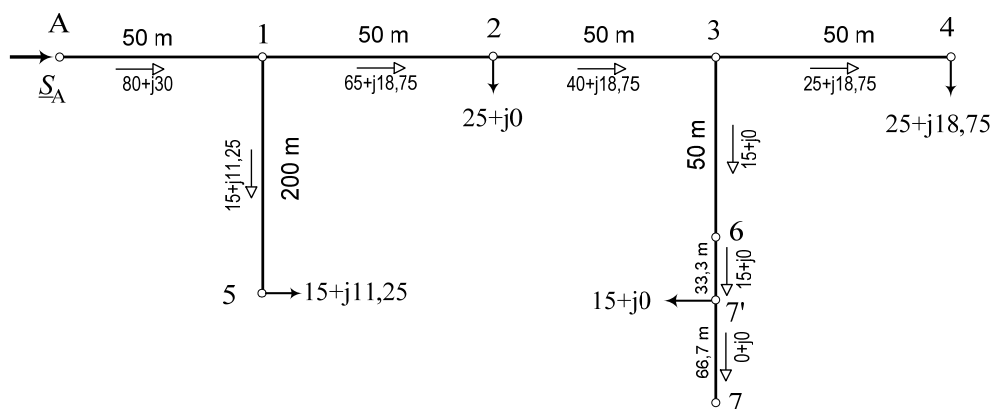
$$\Delta U_{A-5} = \Delta U_{A-1} + \Delta U_{1-5} = 25,5 \text{ V};$$

$$\Delta U_{A-7'} = \Delta U_{A-1} + \Delta U_{1-2} + \Delta U_{2-3} + \Delta U_{3-6} + \Delta U_{6-7'} = 23,3 \text{ V.}$$

Значи, најголемата загуба на напон во мрежата изнесува:

$$\Delta U = \Delta U_{A-5} = 25,5 \text{ V.}$$

За пресметка на загубата на моќност во мрежата распределениот товар ќе го претставиме повторно како концентриран, но сега поставен на една третина оддалечен од почетокот на делницата 6-7:



Слика 2.26.3. Пресметка на загубите на моќност во мрежата

Понатаму ќе биде потребно да се определат загубите на моќност ΔP_{i-j} во секоја делница од мрежата. За првата делница А-1 ќе добиеме:

$$\Delta P_{A-1} = \frac{P_{A-1}^2 + Q_{A-1}^2}{U_n^2} \cdot r_{50} \cdot l_{A-1};$$

$$\Delta P_{A-1} = \frac{80^2 + 30^2}{0,38^2} \cdot 0,63 \cdot 0,050 = 1592 \text{ W} = 1,592 \text{ kW.}$$

Слично ги пресметуваме загубите на моќност и во останатите делници. Како резултат добиваме:

$$\Delta P_{1-2} = 0,998 \text{ kW}; \quad \Delta P_{2-3} = 0,426 \text{ kW}; \quad \Delta P_{3-4} = 0,213 \text{ kW};$$

$$\Delta P_{1-5} = 0,954 \text{ kW}; \quad \Delta P_{3-7'} = 0,165 \text{ kW}; \quad \Delta P_{7-7'} = 0,165 \text{ kW.}$$

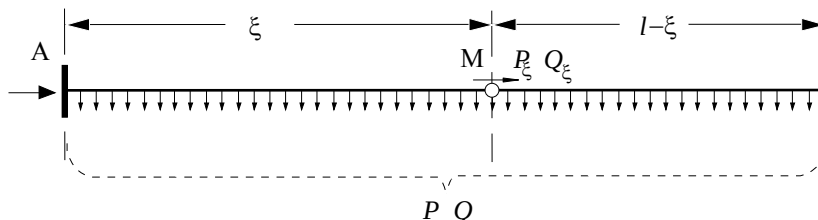
Вкупните загуби на активна моќност во мрежата ΔP ќе бидат збир од загубите што се остваруваат во поедините делници од мрежата:

$$\Delta P = \Delta P_{A-1} + \Delta P_{1-2} + \Delta P_{2-3} + \Delta P_{3-4} + \Delta P_{1-5} + \Delta P_{3-7'} = 4,35 \text{ kW.}$$

□ □ □

Задача бр. 2.27. Да се определи напонскиот профил, т.е. зависноста $U=U(x)$ ($0 \leq x \leq l$) по должината на магистрален вод оптоварен по својата должина со континуиран, рамномерно распределен, товар (слика 2.27.1) чиешто сумарно оптоварување $\underline{S}=P+jQ$ е познато. Должината l и подолжните параметри на водот r и x се исто така познати.

Решение:



Слика 2.27.1. Вод со континуиран, рамномерно распределен, товар

Ќе посматраме точка М што се наоѓа на растојание ξ од почетокот на водот, како што е тоа прикажано на сликата. Со P_ξ и Q_ξ ќе ги означиме активната и реактивната моќност што течат низ водот во точката М. Таа моќност ќе биде збир од моќностите на сите потрошувачи коишто се наоѓаат десно од неа, т.е.:

$$P_\xi = P \cdot \frac{l-\xi}{l}; \quad Q_\xi = Q \cdot \frac{l-\xi}{l}.$$

Напонот U_ξ во произволната точка М која се наоѓа на растојание ξ од почетокот на водот ќе го пресметаме како разлика помеѓу напонот во напојната точка U_A и загубата на напон ΔU_ξ на потегот А – ξ , т.е.

$$U_\xi = U_A - \int_0^\xi dU = U_A - \Delta U_\xi,$$

каде што е:

$$\Delta U_\xi = \int_0^\xi \frac{P_\xi \cdot r + Q_\xi \cdot x}{U_n} \cdot d\xi = \int_0^\xi \frac{P_\xi \cdot (1 + x/r \cdot \operatorname{tg} \varphi)}{U_n} \cdot r \cdot d\xi.$$

Со решавање на последниот интеграл добиваме:

$$\Delta U_\xi = \frac{P \cdot R \cdot (1 + x/r \cdot \operatorname{tg} \varphi)}{2U_n} \cdot \frac{\xi \cdot (2l - \xi)}{l^2}, \text{ и}$$

$$\Delta U = \Delta U_{(\xi=l)} = \frac{P \cdot R \cdot (1 + x/r \cdot \operatorname{tg} \varphi)}{2U_n} = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{2U_n}.$$

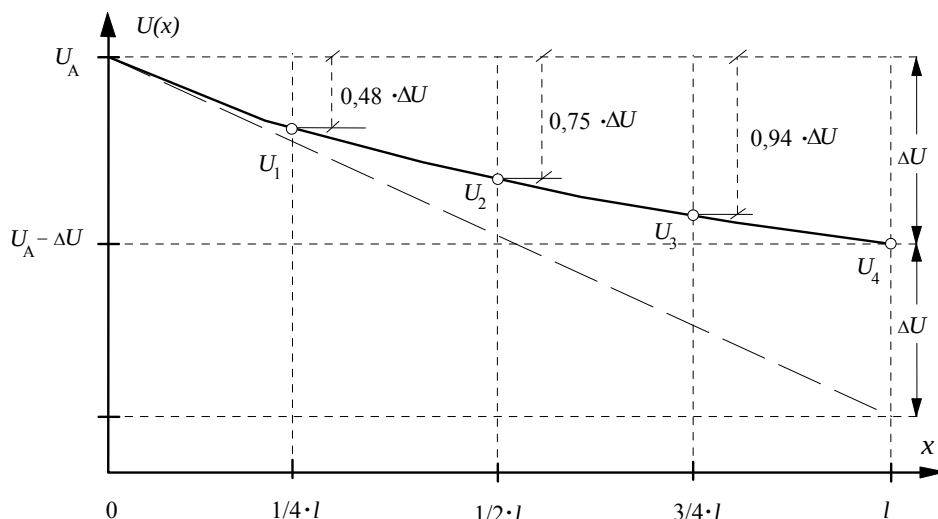
Според тоа, за напонот U_ξ во произволна точка на растојание ξ од почетокот на водот ќе го добиеме следниот израз:

$$U_\xi = U_A - \Delta U_\xi = U_A - \Delta U \cdot \frac{\xi \cdot (2l - \xi)}{l^2} \quad (2.27.1)$$

или

$$U_\xi = U_A - \frac{\xi \cdot (2l - \xi)}{2 \cdot l^2} \cdot \Delta U_{\text{конц}}. \quad (2.27.2)$$

На сликата 2.27.2 е во форма на дијаграм прикажана промената на напонот $U_\xi = U(\xi)$ по должината водот со континуиран, рамномерно распределен, товар.



Слика 2.27.2. Напонски профил по должината на водот

□ □ □

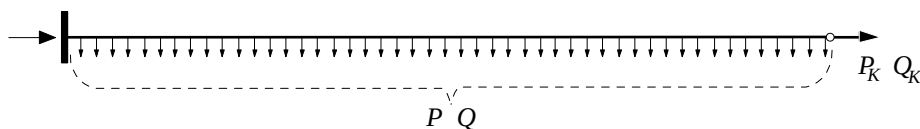
Задача бр. 2.28. На кое растојание ξ од почетокот на водот разгледуван во задачата бр. 6 загубата на напон ја има вредноста 50% од вкупната загуба на напон во водот ΔU .

Решение:

$$\frac{\xi \cdot (2l - \xi)}{l^2} = \frac{1}{2} \Rightarrow \xi = \frac{2 - \sqrt{2}}{2} \cdot l \approx 0,3 \cdot l$$

□ □ □

Задача бр. 2.29. На сликата 2.29.1 е прикажан магистрален вод со позната должина l и познати подолжни параметри r и x . На крајот од водот е приклучен концентриран потрошувач $\underline{S}_K = P_K + jQ_K$. Водот е во исто време оптоварен со потрошувачи и по сета своја должина. Сумарната моќност на тие потрошувачи изнесува $\underline{S} = P + jQ$ и може да се смета дека тие се приближно рамномерно распределени по неговата должина.

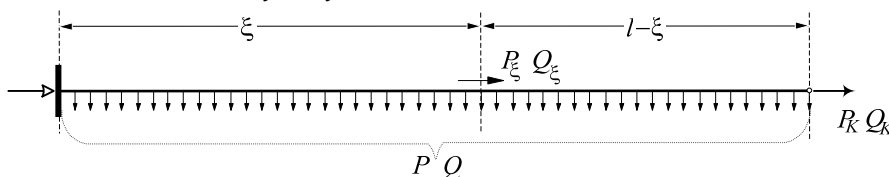


Слика 2.29.1. Магистрален вод со комбиниран товар

Да се изведат изразите за пресметка загубата на напон ΔU и вкупните загуби на моќност ΔP во разгледуваниот вод. Да се посматра идеализираниот модел кога бројот на потрошувачите распределени долж водот е многу голем ($n \rightarrow \infty$).

Решение:

Посматраме точка на водот која се наоѓа на растојание ξ од неговиот почеток. Во согласност со сликата 2.29.2, за моќностите P_ξ и Q_ξ што течат во посматраната точка ќе имаме:



Слика 2.29.2.

$$P_{\xi} = P_K + P \cdot \frac{l-\xi}{l} ; \quad Q_{\xi} = Q_K + Q \cdot \frac{l-\xi}{l}$$

Понатаму, за елементот од водот со елементарна должина $d\xi$ низ којшто тече моќноста $\underline{S}_{\xi} = P_{\xi} + jQ_{\xi}$ за диференцијалните загуби на напон и моќност можеме да пишуваме:

$$d(\Delta U) = \frac{P_{\xi} \cdot r \cdot d\xi + Q_{\xi} \cdot x \cdot d\xi}{U_n} = \frac{P_{\xi} \cdot r + Q_{\xi} \cdot x}{U_n} \cdot d\xi;$$

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

Со интегрирање на горната равенка во интервалот $\xi \in (0, l)$ се добива вкупната загуба на напон во водот ΔU :

$$\Delta U = \int_0^l d(\Delta U) = \int_0^l \frac{P_{\xi} \cdot r + Q_{\xi} \cdot x}{U_n} \cdot d\xi \quad \text{или}$$

$$\Delta U = \frac{P_K \cdot R + Q_K \cdot X}{U_n} + \frac{1}{2} \cdot \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_n}. \quad (2.29.1)$$

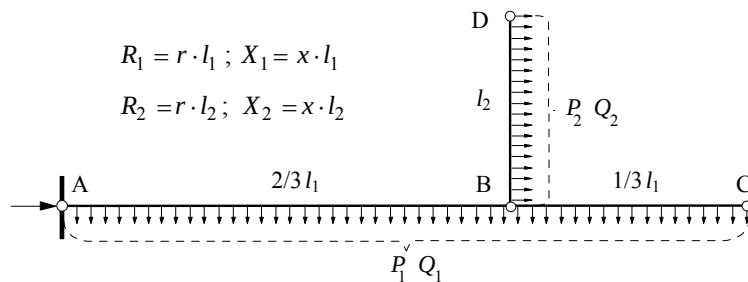
Слично, со интегрирање на втората равенка ги добиваме вкупните загуби на активна моќност во водот ΔP :

$$\Delta P = \int_0^l d(\Delta P) = \int_0^l \frac{P_{\xi}^2 + Q_{\xi}^2}{U_n^2} \cdot r \cdot d\xi \quad \text{или}$$

$$\Delta P = \frac{P_K^2 + Q_K^2}{U_n^2} \cdot R + \frac{1}{3} \cdot \frac{P^2 + Q^2}{U_n^2} \cdot R + \frac{P \cdot P_K + Q \cdot Q_K}{U_n^2} \cdot R. \quad (2.29.2)$$

□ □ □

Задача бр. 2.30. На сликата 2.30 е прикажана нисконапонска (НН) хомогена мрежа. Сите водови се со ист пресек и имаат исти подолжни параметри r и x . По должината на магистралниот вод "V1" на потегот А–В–С, со позната должина l_1 се напојува рамномерно распределен товар со сумарна моќност $\underline{S}_1 = P_1 + jQ_1$. По должината на отцепниот вод "V2" со позната должина l_2 се напојува рамномерно распределен товар со сумарна моќност $\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2$.



Слика 2.30. НН мрежа со континуиран товар

Да се изведат изразите за пресметка на загубата на напон ΔU и вкупните загуби на моќност ΔP во мрежата. Да се посматра идеализираниот модел кога бројот на потрошувачите распределени долж водовите е многу голем, така што е $n \rightarrow \infty$.

Решение:

Мрежата привремено ќе ја поделиме на три сегменти (делници): А–В; В–С и В–D. Сегментите В–С и В–D претставуваат,сами за себе, мрежи со континуиран товар. Нив можеме да ги решаваме со помош на изразите (2.29.1) и (2.29.2) што важат за ваквиот вид мрежи.

На тој начин за загубите на напон и моќност во овие две делници ќе добијеме:

$$\Delta U_{B-C} = \frac{P_{B-C} \cdot R_{B-C} + Q_{B-C} \cdot X_{B-C}}{2 \cdot U_n} = \frac{(P_1/3) \cdot (R_1/3) + (Q_1/3) \cdot (X_1/3)}{2 \cdot U_n} = \frac{P_1 \cdot R_1 + Q_1 \cdot X_1}{18 \cdot U_n};$$

$$\Delta P_{B-C} = \frac{P_{B-C}^2 + Q_{B-C}^2}{3 \cdot U_n^2} \cdot R_{B-C} = \frac{(P_1/3)^2 + (Q_1/3)^2}{3 \cdot U_n^2} \cdot (R_1/3) = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{81 \cdot U_n^2} \cdot R_1,$$

$$\Delta U_{B-D} = \frac{P_{B-D} \cdot R_{B-D} + Q_{B-D} \cdot X_{B-D}}{2 U_n} = \frac{P_2 \cdot R_2 + Q_2 \cdot X_2}{2 U_n};$$

$$\Delta P_{B-D} = \frac{P_{B-D}^2 + Q_{B-D}^2}{3 \cdot U_n^2} \cdot R_{B-D} = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{3 \cdot U_n^2} \cdot R_2.$$

Сега сегментите B-C и B-D ќе ги замениме (симулираме) со еден концентриран потрошувач $\underline{S}_K = (P_K + jQ_K)$ поставен на крајот од сегментот A-B:

$$P_K = P_{B-C} + P_{B-D} = P_1/3 + P_2; \quad Q_K = Q_{B-C} + Q_{B-D} = Q_1/3 + Q_2.$$

Конечно, сегментот A-B од мрежата ќе го решиме со помош на моделот од претходната задача, со помош на изразите (2.29.1) и (2.29.2). на тој начин за загубите на напон ΔU_{A-B} и на моќност ΔP_{A-B} во овој дел од мрежата добиваме:

$$\Delta U_{A-B} = \frac{P_{A-B} \cdot R_{A-B} + Q_{A-B} \cdot X_{A-B}}{2 \cdot U_n} + \frac{P_K \cdot R_{A-B} + Q_K \cdot X_{A-B}}{U_n}; \text{ или}$$

$$\Delta P_{A-B} = \frac{P_K^2 + Q_K^2}{U_n^2} \cdot R + \frac{1}{3} \cdot \frac{P_{A-B}^2 + Q_{A-B}^2}{U_n^2} \cdot R + \frac{P_{A-B} \cdot P_K + Q_{A-B} \cdot Q_K}{U_n^2} \cdot R.$$

Вкупните загуби на моќност во мрежата ΔP_Σ ќе бидат збир од загубите во одделните делници: $\Delta P_\Sigma = \Delta P_{A-B} + \Delta P_{B-C} + \Delta P_{B-D}$.

□ □ □

Задача 2.31. Трансформатор за снижување на напонот напојува еден потрошувач. Во режимот на максималното оптоварување потрошувачот зема моќност $P_2 = 20$ MW при $\cos \varphi_2 = 0,9$, а во режимот на минималното оптоварување тој зема моќност $P_2 = 10$ MW при $\cos \varphi_2 = 0,8$. Трансформаторот работи со својот номинален преносен однос $k_T = k_n = 110/10,5$.

Да се одредат загубите на напон и загубите на моќност во трансформаторот, како и напонот U_2 при потрошувачот, во споменатите два карактеристични режима на работа. Може да се претпостави дека напонот на високонапонската страна од трансформаторот се одржува на приближно константна вредност $U_1 = 110$ kV = const, независно од режимот на оптоварување.

Податоци за трансформаторот:

$$S_n = 25 \text{ MVA}; \quad U_{1n}/U_{2n} = 110/10,5 \text{ kV/kV};$$

$$u_k\% = 11\%; \quad \Delta P_{Cun} = 130 \text{ kW}; \quad \Delta P_{Fe} = 30 \text{ kW}; \quad i_o\% = 1\%.$$

Решение:

Загубата на напон во трансформаторот ΔU можеме (приближно) да ја пресметаме со изразот:

$$\Delta U = U_1 - U'_2 \approx \Delta U_d + \frac{\Delta U_q^2}{2 \cdot U'_2} \approx \Delta U_d + \frac{\Delta U_q^2}{2 \cdot U_n};$$

$$\Delta U_d = \frac{P_2 \cdot R_T + Q_2 \cdot X_T}{U'_2} \approx \frac{P_2 \cdot R_T + Q_2 \cdot X_T}{U_n} \text{ или}$$

$$\Delta U_d = \frac{S_2}{U_n} \cdot (R_T \cdot \cos \varphi_2 + X_T \cdot \sin \varphi_2), \text{ и}$$

$$\Delta U_q = \frac{P_2 \cdot X_T - Q_2 \cdot R_T}{U'_2} \approx \frac{P_2 \cdot X_T - Q_2 \cdot R_T}{U_n}; \text{ или}$$

$$\Delta U_q = \frac{S_2}{U_n} \cdot (X_T \cdot \cos \varphi_2 - R_T \cdot \sin \varphi_2).$$

Загубите на активна и реактивна моќност во трансформаторот се пресметуваат со помош на следните формули:

$$\Delta P = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2 = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cun} \cdot \left(\frac{S_2}{S_n}\right)^2$$

$$\Delta Q = S_n \cdot \left(\frac{i_o \%}{100} + \frac{u_k \%}{100} \cdot \alpha^2\right) = S_n \cdot \left(\frac{i_o \%}{100} + \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{S_2^2}{S_n^2}\right)$$

Параметрите R_T и X_T на подолжната (редната) гранка од трансформаторот, сведени на високонапонска страна ($U_n = 110 \text{ kV}$), ќе бидат:

$$R_T = \Delta P_{Cun} \cdot \frac{U_n^2}{S_n^2} = 0,130 \cdot \frac{110^2}{25^2} = 2,517 \, \Omega;$$

$$Z_T = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{11}{100} \cdot \frac{110^2}{25} = 53,24 \, \Omega;$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{53,24^2 - 2,517^2} = 53,18 \, \Omega;$$

$$\underline{Z}_T = (2,517 + j53,18) \, \Omega.$$

1. Пресметка на приликиите во режимот на максимално оптоварување

Во режимот на максимално оптоварување ќе имаме:

$$P_2 = 20 \text{ MW}; \quad \cos \varphi_2 = 0,9; \quad \sin \varphi_2 = 0,436;$$

$$S_2 = P_2 / \cos \varphi_2 = 22,222 \text{ MVA}; \quad \alpha = S_2 / S_n = 0,889$$

$$\Delta U_d = \frac{22,222}{110} \cdot (2,517 \cdot 0,9 + 53,18 \cdot 0,436) = 5,142 \text{ kV};$$

$$\Delta U_q = \frac{22,222}{110} \cdot (53,18 \cdot 0,9 - 2,517 \cdot 0,436) = 9,447 \text{ kV};$$

$$\Delta U \approx \Delta U_d + \frac{\Delta U_q^2}{2 \cdot U_n} = 5,142 + \frac{9,447^2}{2 \cdot 110} = 5,548 \text{ kV};$$

$$U'_2 = U_1 - \Delta U = 110 - 5,548 = 104,452 \text{ kV};$$

$$U_2 = U'_2 / k_T = 104,452 \cdot (10,5/110) = 9,97 \text{ kV}.$$

Загубите на моќности во трансформаторот ќе бидат:

$$\Delta P = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2 = 0,030 + 0,130 \cdot 0,889^2 = 0,133 \text{ MW};$$

$$\Delta Q = S_n \cdot \left(\frac{i_o \%}{100} + \frac{u_k \%}{100} \cdot \alpha^2\right) = 25 \cdot \left(\frac{1}{100} + \frac{11}{100} \cdot 0,889^2\right) = 2,423 \text{ Mvar}.$$

2. Пресметка на приликиите во режимот на минимално оптоварување

Во режимот на минимално оптоварување ќе имаме:

$$P_2 = 10 \text{ MW}; \quad \cos \varphi_2 = 0,8; \quad \sin \varphi_2 = 0,6;$$

$$S_2 = P_2 / \cos \varphi_2 = 12,5 \text{ MVA}; \quad \alpha = S_2 / S_n = 0,5$$

На сосема ист начин како во претходниот случај ги одредуваме загубата на напон и загубите на активна и реактивна моќност во трансформаторот и за овој работен режим. Притоа се добиваат следните резултати:

$$\Delta U_d = 3,63 \text{ kV}; \quad \Delta U_q = 4,67 \text{ kV}; \quad \Delta U = 3,63 + 4,67^2 / (2 \cdot 110) = 3,73 \text{ kV};$$

$$U'_2 = U_1 - \Delta U = 106,27 \text{ kV}; \quad U_2 = U'_2 / k_T = 10,14 \text{ kV}$$

$$\Delta P_T = 0,0625 \text{ MW} = 62,5 \text{ kW};$$

$$\Delta Q_T = 0,9375 \text{ Mvar} = 937,5 \text{ kvar}.$$

*) *Напомена:* Задачата е решена приближно бидејќи подолжната и попречната компонента на падот на напон ΔU_d и ΔU_q се пресметувани со номиналниот напон U_n наместо со вистинскиот напон U'_2 кој не ни е познат. За уточнување на решението ќе биде потребно истата постапка да се повтори доволен број пати при што компонентите ΔU_d и ΔU_q во секоја нова итерација ќе се пресметуваат со уточнетите вредности на напонот U'_2 .

□ □ □

Задача 2.32: Трансформаторска станица ТС 110/10 kV/kV напојува индустриски потрошувач со моќност $P=30 \text{ MW}$ $Q=14,53 \text{ Mvar}$ ($\cos \varphi = 0,9$). Во посматраниот режим напонот на високонапонските собирници изнесува $U_1 = 113 \text{ kV}$. Трансформацијата на електрична енергија се врши со трансформатор за кој што се познати следните податоци:

$$40 \text{ MVA} \quad (110 \pm 12 \times 1,25\%) / 10,5 \text{ kV} / \text{kV} \quad u_k = 11\% \quad i_0 = 0,6\% \quad \Delta P_{Cun} = 211 \text{ kW} \quad \Delta P_{Fe} = 36 \text{ kW}.$$

Да се пресмета:

а) загубите на напон и моќност во трансформаторот ΔU_T , ΔP_T и ΔQ_T ;

б) со каков преносен однос k_T треба да работи трансформаторот доколку сакаме напонот на неговиот секундар да изнесува $U_2 = U_0 = 10,5 \text{ kV}$.

Решение:

Најнапред ќе ги пресметаме параметрите R_T и X_T од редната гранка на заменската шема, сведени на високонапонска (ВН) страна.

$$R_T = \Delta P_{Cun} \frac{U_2^2}{S_n^2} = 0,211 \cdot \frac{110^2}{40^2} = 1,596 \, \Omega;$$

$$Z_T = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{U_2^2}{S_n} = \frac{11}{100} \cdot \frac{110^2}{40} = 33,275 \, \Omega; \quad .$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = 33,237 \, \Omega.$$

а) *Пресметка на загубата на напон ΔU_T .*

Подолжната и попречната компонента на падот на напон најнапред ќе ги пресметаме приближно, на упростен начин, со апроксимацијата $U'_2 = U_n = 110 \text{ kV}$. На тој начин ќе добиеме:

$$\Delta U_d \approx \frac{P \cdot R_T + Q \cdot X_T}{U_n} = \frac{30 \cdot 1,596 + 14,53 \cdot 33,237}{110} = 4,826 \text{ kV},$$

$$\Delta U_q \approx \frac{P \cdot X_T - Q \cdot R_T}{U_n} = \frac{30 \cdot 33,237 - 14,53 \cdot 1,596}{110} = 8,854 \text{ kV},$$

$$\Delta U_T \approx \Delta U_d + \frac{\Delta U_q^2}{2 \cdot U_n} = 4,826 + \frac{8,854^2}{2 \cdot 110} = 5,182 \text{ kV},$$

$$U'_2 = U_1 - \Delta U_T = 113 - 5,182 = 107,82 \text{ kV}.$$

Се разбира дека оваа вредност на напонот U'_2 не е егзактна. Нејзино уточнување ќе направиме ако истата постапка повеќекратно ја повториме, но сега со уточнетите вредности за напонот U'_2 . После само две вакви итерации се достигнува точната вредност на напонот:

$$U'_2 = 107,71 \text{ kV}.$$

Од овој пример гледаме дека претходно добиеното приближно решение добиено со упростената постапка е сосема блиску до својата точна вредност. Тоа укажува на фактот дека приближниот начин на пресметување на загубата на напон во трансформаторите дава резултати со прифатлива точност.

– Пресметка на загубите на моќносии.

Загубите ΔP_T и ΔQ_T во трансформацијата ќе ги пресметаме со помош на следните релации:

$$\Delta P_T = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2; \quad \Delta Q_T = \left(\frac{i_0 \%}{100} + \frac{u_k \%}{100} \cdot \alpha^2 \right) \cdot S_n; \quad \alpha = \frac{S}{S_n}$$

На тој начин се добива:

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{30}{0,9} = 33,333 \text{ MVA}; \quad \alpha = \frac{33,333}{40} = 0,833$$

$$\Delta P_T = 36 + 211 \cdot 0,833^2 = 182,53 \text{ kW}$$

$$\Delta Q_T = \left(\frac{0,6}{100} + \frac{11}{100} \cdot 0,833^2 \right) \cdot 40 = 3,296 \text{ Mvar} = 3296 \text{ kvar}.$$

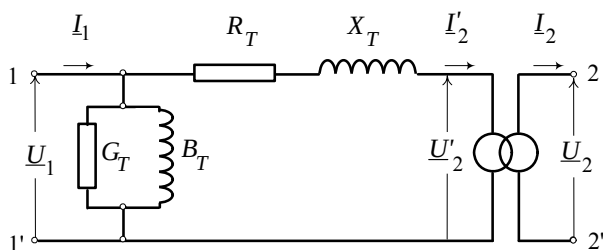
б) Пресметка на појребниот коефициент на трансформација.

Коефициентот на трансформација k_T претставува однос W_1/W_2 на бројот на навивки на примарната и секундарната намотка. Тој го дефинира правилото на сведување на одделните електрични величини, т.е. претставува однос на напоните U'_2 и U_2 , односно струите I'_2 и I_2 (слика 2.32.1), при што важи:

$$\frac{U'_2}{U_2} = k_T; \quad \frac{I_2}{I'_2} = k_T.$$

Од номиналните податоци за трансформаторот се гледа дека примарната намотка на трансформаторот има можност за промена на бројот на навивки W_1 , додека секундарната намотка има фиксен број на навивки $W_2=W_{2n}$. Притоа можеме да пишуваме:

$$W_1 = W_{1n} \cdot \left(1 + \frac{m\%}{100} \right); \quad W_2 = W_{2n}.$$



Слика 2.32.1. Заменска шема на двонамотниот трансформатор

Значи, преносниот однос k_T може да се напише на следниот начин:

$$k_{Tn} = \frac{W_{1n}}{W_{2n}} = \frac{110}{10,5} = 10,4762$$

$$k_T = \frac{W_1}{W_2} = \frac{W_{1n} \cdot (1 + m\%/100)}{W_{2n}} = k_{Tn} \cdot \left(1 + \frac{m\%}{100} \right).$$

Напонот на секоундарната страна од трансформаторот ќе биде:

$$U_2 = \frac{U'_2}{k_T} = \frac{U'_2}{k_{Tn}} \cdot \frac{1}{1 + m\%/100}.$$

Од погоре изложеното произлегува дека напонот U_2 што ќе владее на секундарна страна зависи од вредноста на напонот U'_2 (т.е. од напонските прилики на ВН страна и од загубите на напон во трансформаторот) но и од преносниот однос на трансформаторот k_T . Значи големината на напонот U_2 посредно зависи од позицијата на регулационата преклопка $m\%$ во примарната намотка. За да се постигне вредноста $U_2 = U_0 = 10,5 \text{ kV}$ во конкретните услови, преносниот однос на трансформаторот ќе треба да има вредност:

$$k_T = k_{T0} = \frac{U'_2}{U_0} = \frac{107,71}{10,5} = 10,2581. \text{ Од релацијата } k_{T0} = k_{Tn} \cdot \left(1 + \frac{m_0\%}{100}\right) \text{ следи:}$$

$$m_0\% = \left(\frac{k_{T0}}{k_{Tn}} - 1\right) \cdot 100 = \left(\frac{10,2581}{10,4762} - 1\right) \cdot 100 = -2,08\%.$$

Позицијата на преклопката $m\%$ на регулациониот трансформатор претставува дискретна променлива која може да има некоја од следните вредности: $0; \pm 1,25\%; \pm 2,50\%; \pm 3,75\% \dots \pm 13,75\%$ и $\pm 15\%$. Од тука произлегува дека од сите расположливи вредности за $m\%$ најблиску до саканата вредност $m_0\%$ ќе биде позицијата $m\% = -2,5\%$. За таа вредност на $m\%$, коефициентот на трансформација на трансформаторот ќе биде:

$$k_T = k_{Tn} \cdot \left(1 + \frac{m\%}{100}\right) = 10,4762 \cdot \left(1 + \frac{-2,5}{100}\right) = 10,2143.$$

Во тој случај напонот на секундарната страна ќе биде:

$$U_2 = \frac{U'_2}{k_T} = \frac{107,71}{10,2143} = 10,53 \text{ kV}.$$

□ □ □

Задача 2.33. Во трансформаторската станица од претходниот пример се инсталира уште еден трансформатор – идентичен на претходниот, кој треба да работи во паралела со него. Колкави ќе бидат загубата на напон и загубите на моќност во трансформацијата ΔU_T , ΔP_T и ΔQ_T во тој случај.

Решение:

Во случајот кога $n = 2$ трансформатора со идентични карактеристики работат во паралела, моќноста на потрошувачот ќе се подели помеѓу нив подеднакво, по половина на секој трансформатор. Во тој случај, постапувајќи на ист начин како и во претходната задача, ќе имаме:

$$\Delta U_d \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{P \cdot R_T + Q \cdot X_T}{U_n} = \frac{1}{2} \cdot \frac{30 \cdot 1,596 + 14,53 \cdot 33,237}{110} = 2,413 \text{ kV},$$

$$\Delta U_q \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{P \cdot X_T - Q \cdot R_T}{U_n} = \frac{30 \cdot 33,237 - 14,53 \cdot 1,596}{2 \cdot 110} = 4,427 \text{ kV},$$

$$\Delta U_T \approx \Delta U_d + \frac{\Delta U_q^2}{2 \cdot U_n} = 2,413 + \frac{4,427^2}{2 \cdot 110} = 2,68 \text{ kV} \Rightarrow U'_2 = U_1 - \Delta U_T = 113 - 2,68 = 110,32 \text{ kV}.$$

Загубите на активна и реактивна моќност во овој случај ќе бидат:

$$\Delta P_T = n \cdot \Delta P_{Fe} + \frac{1}{n} \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2; \quad \Delta Q_T = \left(n \cdot \frac{i_0\%}{100} + \frac{1}{n} \frac{u_k\%}{100} \cdot \alpha^2 \right) \cdot S_n; \quad \alpha = \frac{S}{S_n} = \frac{33,333}{40} = 0,833$$

$$\Delta P_T = 2 \cdot 36 + 0,5 \cdot 211 \cdot 0,833^2 = 145,3 \text{ kW}$$

$$\Delta Q_T = \left(\frac{2 \cdot 0,6}{100} + \frac{0,5 \cdot 11}{100} \cdot 0,833^2 \right) \cdot 40 = 2,008 \text{ Mvar} = 2008 \text{ kvar.}$$

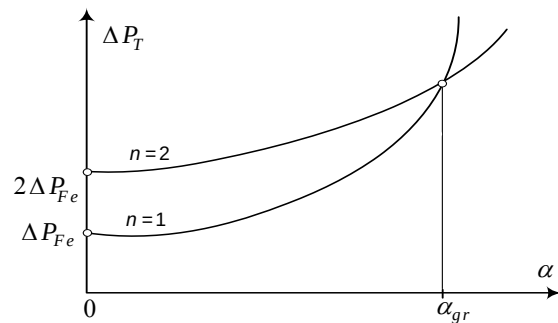
□ □ □

Задача 2.34. Да се пресмета граничната привидна моќност S_{gr} на потрошувачот за која што загубите на активна моќност во трансформацијата за случајот кога работи $n=1$ трансформатор $\Delta P_T(1)$ и загубите $\Delta P_T(2)$ во групата од $n=2$ трансформатора, разгледувани во претходниот пример, ќе биде иста.

Решение:

Од изразот за загуби во група од n идентични трансформатори се гледа дека загубите $\Delta P_T(n)$ зависат како од коефициентот на оптоварување α , така и од бројот на трансформатори во групата n .

На сликата 1 е прикажана графички таа зависност за случајот $n=1$ и $n=2$ трансформатора во групата. Граничната моќност S_{gr} , значи, се добива во пресекот на овие криви. Оттука следуваат односите:



Слика 2.34.1.

$$\Delta P_T(n) = n \cdot \Delta P_{Fe} + \frac{1}{n} \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2 = \Delta P(n, \alpha)$$

$$\Delta P_T(1) = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2; \quad \Delta P_T(2) = 2 \cdot \Delta P_{Fe} + 0,5 \cdot \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2$$

$$\Delta P_T(1) = \Delta P_T(2) \Rightarrow \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cun} \cdot \alpha_{gr}^2 = 2 \cdot \Delta P_{Fe} + 0,5 \cdot \Delta P_{Cun} \cdot \alpha_{gr}^2$$

$$\Rightarrow \alpha_{gr} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_{Fe}}{\Delta P_{Cun}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 36}{211}} = 0,584.$$

Граничната привидна моќност S_{gr} во тој случај ќе биде:

$$S_{gr} = \alpha_{gr} S_n = 0,584 \cdot 40 = 23,37 \text{ MVA.}$$

Според тоа за моќности на потрошувачот $S < S_{gr}$ помали ќе бидат активните загуби во трансформацијата ако работи само едниот трансформатор, додека за $S > S_{gr}$ е подобро да бидат вклучени обата трансформатора.

□ □ □

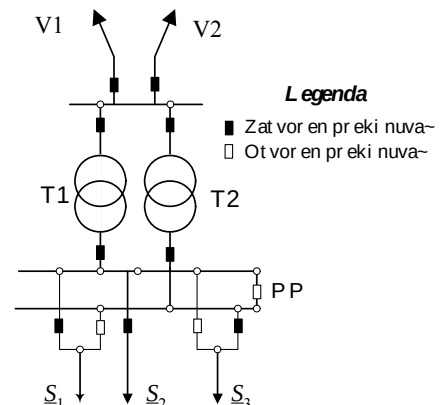
Задача 2.35. На сликата 1 е прикажана еднополната шема на една трафостаница ТС 110/10 kV/kV со два идентични трансформатора (видете ја задачата 2.10):

Да се пресметаат загубите во трансформацијата за следните два случаја:

- прекинувачот ПП е исклучен;
- прекинувачот ПП е вклучен.

Бројни вредносѝ:

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



$$\underline{S}_1 = (20 + j9,69) \text{ MVA}; \underline{S}_2 = (10 + j4,84) \text{ MVA}; \underline{S}_3 = \underline{S}_1$$

Слика 2.35.1

Решение:

Од сликата 2.35.1 произлегува дека кога прекинувачот ПП е исклучен, СН собирници се секционирани (раздвоени) така што на првиот трансформатор Т1 ќе бидат приклучени потрошувачите $\underline{S}_1$ и $\underline{S}_2$ додека потрошувачот $\underline{S}_3$ ќе биде приклучен на трансформаторот Т2, т.е.

$$\underline{S}_{T1} = \underline{S}_1 + \underline{S}_2 = (30 + j14,53) = 33,333 \angle 25,84^\circ \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{T2} = \underline{S}_3 = (20 + j9,69) = 22,222 \angle 25,84^\circ \text{ MVA}.$$

а) Прекинувачот ПП е отворен. Трансформаторите работат одвоено

Во овој случај коефициентите на оптоварување на трансформаторите α_1 и α_2 и соодветните загуби на активна моќност ќе бидат:

$$\alpha_1 = \frac{S_{T1}}{S_n} = \frac{33,333}{40} = 0,833; \Delta P_{T1} = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cun} \cdot \alpha_1^2 = 36 + 211 \cdot 0,833^2 = 182,53 \text{ kW};$$

$$\alpha_2 = \frac{S_{T2}}{S_n} = \frac{22,222}{40} = 0,556; \Delta P_{T2} = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cun} \cdot \alpha_2^2 = 36 + 211 \cdot 0,556^2 = 101,12 \text{ kW}.$$

$$\Delta P_{T\Sigma} = \Delta P_{T1} + \Delta P_{T2} = 182,53 + 101,12 = 283,65 \text{ kW}.$$

б) Прекинувачот ПП е затворен. Трансформаторите работат во паралела

Во овој случај сумарното оптоварување $\underline{S}_\Sigma = \underline{S}_1 + \underline{S}_2 + \underline{S}_3$ ќе се подели подеднакво на обата трансформатора бидејќи тие имаат идентични карактеристики:

$$\underline{S}_\Sigma = (30 + j14,53) + (20 + j9,69) = (50 + j24,22) \text{ MVA} = 55,556 \angle 25,84^\circ \text{ MVA}.$$

$$\alpha = \frac{S_\Sigma}{S_n} = \frac{55,556}{40} = 1,389; \Delta P_T = 2 \cdot \Delta P_{Fe} + \frac{1}{2} \cdot \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2 = 2 \cdot 36 + 0,5 \cdot 211 \cdot 1,389^2 = 275,6 \text{ kW}.$$

Лесно може да се докаже дека, во општ случај, загубите на моќност во група од n идентични трансформатори ќе биде најмала кога сумарното оптоварување $\underline{S}_\Sigma$ ќе се подели рамномерно по секој од нив што значи дека, од тој аспект, тие треба да работат во паралела. Но и покрај ова, во погонот најчесто трансформаторите работат одвоено на секундарната страна заради намалување на струите на куса врска.

□ □ □

Задача 2.36. Трансформатор за снижување на напонот напојува индустриски потрошувач со променлив товар. Во режимот на максималното оптоварување моќноста на потрошувачот изнесува $P_{\max} = 520 \text{ kW}$, $Q_{\max} = 170,9 \text{ kvar}$ ($\cos \varphi_{\max} = 0,95$), а напонот на примарната страна изнесува $U_{1,\max} = 9,8 \text{ kV}$. Во режимот на минималното оптоварување, пак, ја имаме следната ситуација: $P_{\min} = 200 \text{ kW}$, $Q_{\min} = 96,9 \text{ kvar}$ ($\cos \varphi_{\min} = 0,9$) и $U_{1,\min} = 10,2 \text{ kV}$. Потребно е:

- Да се пресмета интервалот во кој што ќе варира напонот на секундарот во текот на денот. Колкава е просечната (средната) вредност на напонот на секундарната страна $U_{2,\text{sr}}$. Трансформаторот работи со својот номинален преносен однос $k_T = k_{Tn} = 10/0,4 = 25$.
- Да се избере најсоодветен регулационен отцеп $m\%$ на примарната намотка од трансформаторот така што просечната вредност на напонот на секундарот $U_{2,\text{sr}}$ да биде што е можно поблиску до вредноста $U_{2,0} = 0,4 \text{ kV} \equiv 400 \text{ V}$.

Податоци за трансформаторот:

630 kVA; $(10+2 \times 2,5\%)/0,4$ kV/kV; $i_0\% = 1,8\%$; $u_k\% = 4\%$; $\Delta P_{Fe} = 1300$ W; $\Delta P_{Cun} = 6500$ W.

Решение:

а) Пресметка на величините $U_{2,max}$, $U_{2,min}$ и $U_{2,sr}$.

Параметрите R_T и X_T од редната гранка на трансформаторот, сведени на 10 kV страна, ќе бидат:

$$R_T = 1,638 \, \Omega; \quad X_T = 6,134 \, \Omega.$$

Компонентите ΔU_d и ΔU_q на падот на напон, како и загубата на напон во трансформаторот во режимот на максималното оптоварување $\Delta U_{T,max}$ ќе бидат:

$$\Delta U_d = \frac{P_{max} R_T + Q_{max} X_T}{U_n} = \frac{520 \cdot 1,638 + 170,9 \cdot 6,134}{10} = 190 \, V;$$

$$\Delta U_q = \frac{P_{max} X_T - Q_{max} R_T}{U_n} = \frac{520 \cdot 6,134 - 170,9 \cdot 1,638}{10} = 347 \, V;$$

$$\Delta U_{T,max} = \Delta U_d + \frac{\Delta U_q^2}{2U_n} = 190 + \frac{347^2}{220} = 196 \, V;$$

$$U'_{2,max} = U_{1,max} - \Delta U_{T,max} = 9,8 - 0,196 = 9,604 \, kV.$$

Според тоа напонот на секундарот $U_{2,max}$ во режимот на максималното оптоварување ќе биде:

$$U_{2,max} = U'_{2,max} / k_T = 9,604 \cdot 0,4 / 10 = 384,2 \, V.$$

Постапувајќи на сличен начин ја добиваме состојбата во минималниот режим. Резултатите од пресметките се прикажани во следната табела.

Табела 1. Напонски прилики во максималниот и минималниот режим

	P	Q	U_1	ΔU_d	ΔU_q	ΔU_T	U'_2	U_2
<i>режим</i>	kW	kvar	kV	V	V	V	kV	V
максимален	520	170,9	9,8	190	347	196	9,604	384,2
минимален	200	96,9	10,2	92,2	106,8	92,8	10,108	404,4

Значи напонот на секундарот ќе варира во текот на денот во интервалот:

$$384,2 \, V \leq U_2 \leq 404,4 \, V,$$

околу својата средна вредност: $U_{2,sr} = \frac{U_{2,min} + U_{2,max}}{2} = 394,3 \, V.$

б) Избор на преносен однос на трансформаторот.

Режимите на максималното и минималното оптоварување траат релативно кусо време и поголем дел од денот трансформаторот работи со некое друго оптоварување коешто е помеѓу минималното и максималното. Затоа за потрошувачите е најпогодно ако регулационата преклопка од примарната намотка ја поставиме во таква позиција што ќе биде исполнет условот $U_{2,sr} = U_{2,0}$, т.е. напонот на секундарната страна да варира околу бараната (пожелуваната) вредност $U_{2,0}$. Во тој случај напонот U_2 и понатаму ќе варира во текот на денот но отстапувањата на напонот во режимите на максимално и минимално оптоварување од бараната вредност $U_{2,0}$ ќе бидат еднакви. Покрај ова потрошувачите ќе работат најдолго време со напон близок до оној што сме сакале да го постигнеме. Затоа коефициентот на трансформација k_T и позицијата на преклопката $m\%$ ги бираме тргнувајќи од условот напонот кај потрошувачите во режимот на средното оптоварување да биде еднаков на бараниот $U_{2,0}$.

Од претходните пресметки произлезе заклучокот дека сведениот напон U'_2 не зависи од коефициентот на трансформација k_T туку зависи од напонот на примарната страна U_1 и од оптоварувањето на трансформаторот. Неговата средна (просечна) вредност ќе биде:

$$U'_{2.sr} = (U'_{2.max} + U'_{2.min})/2 = (9,604 + 10,108)/2 = 9,856 \text{ kV}.$$

За да се постигне условот $U_{2.sr} = U_{20} = 0,4 \text{ kV}$ коефициентот на трансформација на трансформаторот треба да биде: (видете ја задачата 2.32)

$$k_T = k_{T0} = U'_{2.sr}/U_{20} = 9,856/0,4 = 22,64.$$

За остварување на овој преносен однос ќе биде потребно позицијата на преклопката да изнесува:

$$m_0\% = \left(\frac{k_{T0}}{k_{Tn}} - 1 \right) \cdot 100 = \left(\frac{22,64}{25} - 1 \right) \cdot 100 = -1,44\%.$$

Бидејќи трансформаторот има само 5 отцепи (еден основен, кој соодветствува на номиналниот преносен однос и 4 регулациони отцепи), променливата $m\%$ во случајов може да прими само 5 дискретни вредности, и тоа: -5% , $-2,5\%$, 0 , $+2,5\%$ и $+5\%$. Од сите нив, најблиска до бараната $m_0\%$ е вредноста $m\% = -2,5\%$. За така избраната вредност на $m\%$, трансформаторот ќе има коефициент на трансформација:

$$k_T = k_{Tn} \cdot \left(1 + \frac{m\%}{100} \right) = \frac{10}{0,4} \cdot \left(1 + \frac{-2,5}{100} \right) = \frac{9,75}{0,4} = 24,375.$$

Во тој случај вредностите на напонот U_2 во двата карактеристични режима ќе бидат:

$$U_{2.max} = \frac{U'_{2.max}}{k_T} = \frac{9,604}{24,375} = 394 \text{ V}; \quad U_{2.min} = \frac{U'_{2.min}}{k_T} = \frac{10,108}{24,375} = 415 \text{ V}.$$

Значи, напонот на секундарот ќе варира во текот на денот во интервалот:

$$394 \text{ V} \leq U_2 \leq 415 \text{ V},$$

околу својата средна вредност: $U_{2.sr} = (394 + 415)/2 = 404,5 \text{ V}$.

□ □ □

Задача 2.37: Потрошувач со моќност $P_3 = 32 \text{ MW}$, $\cos \varphi_3 = 0,8$ се напојува преку преносен систем, прикажан на сликата 2.37.1. Напонот на почетокот од водот се одржува на константна вредност $U_1 = 115 \text{ kV} = \text{const}$. Трансформаторот Т работи со својот номинален преносен однос.

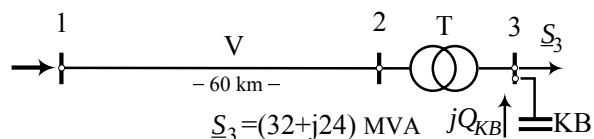
Занемарувајќи ја капацитивната одводност на водот и попречната компонента на падот на напон во преносниот систем, да се одреди:

- Колкава е вредноста на напонот при потрошувачот U_2 , колкава е загубата на напон $\Delta U\%$ и колкави се загубите на моќност ΔP во преносниот систем, за дадените услови на работа.
- Ако при потрошувачот инсталираме кондензаторска батерија КВ, колкава реактивна моќност Q_{KB} ќе треба таа да произведува за напонот на собирниците "3" да биде $U_3 = 10 \text{ kV}$. Колкави ќе бидат загубите $\Delta U\%$ и ΔP во преносот во овој случај.

Податоци за елементите:

$$V: \underline{z} = (r + jx) = (0,125 + j0,40) \Omega/\text{km}; \quad l = 60 \text{ km};$$

$$T: 110/10,5 \text{ kV/kV}; \quad 40 \text{ MVA}; \quad u_k\% = 10\%; \quad \Delta P_{Cun} = 240 \text{ kW}.$$



Слика 2.37.1

Решение:

Параметрите на елементите од системот, сведени на 110 kV страна, ќе бидат:

$$\underline{Z}_T = R_T + jX_T = (1,815 + j30,25) \Omega; \quad \underline{Z}_V = (R_V + X_V) = (7,5 + j24) \Omega$$

$$Z_e = Z_V + Z_T = (9,315 + j54,25) \Omega.$$

а) Пресметка на приликиите во системот за зададениот режим на работа

Загубата на напон во целиот преносен систем, приближно, со занемарување на попречната компонента на падот на напон, може да се пресмета со помош на следната релација:

$$\Delta U = U_1 - U'_3 \approx \Delta U_d = \frac{P_3 \cdot R_e + Q_3 \cdot X_e}{U'_3},$$

од каде што се добива следната квадратна равенка по непознатата U'_3 :

$$U_1 \cdot U'_3 - U'^2_3 = (P_3 \cdot R_e + Q_3 \cdot X_e).$$

Со нејзиното средување и решавање добиваме:

$$U'^2_3 - 115 \cdot U'_3 + 1600,08 = 0 \Rightarrow U'_3 = 98,806 \text{ kV и } U'_3 = 16,194 \text{ kV}.$$

Ќе го усвоиме првото решение како прифатливо. Во тој случај ќе имаме:

$$\Delta U = U_1 - U'_3 = 115 - 98,806 = 16,194 \text{ kV}; \quad \Delta U\% = 14,72\%;$$

$$U_3 = \frac{U'_3}{k_T} = \frac{98,806}{(110/10,5)} = 9,432 \text{ kV}.$$

Загубата на активна моќност ΔP , ќе изнесува:

$$\Delta P = \frac{P_3^2 + Q_3^2}{U'^2_3} \cdot R_e = \frac{32^2 + 24^2}{98,806^2} \cdot 9,315 = 1,527 \text{ MW}.$$

б) Пресметка на приликиите во системот за режимот кога работи и конд. батерија КВ.

За да се подигне напонот во точката "3" на бараната вредност $U_3 = 10 \text{ kV}$, што соодветствува на зголемување на сведениот напон U'_3 на вредноста $U'_3 = 10 \cdot (110/10,5) = 104,762 \text{ kV}$, ќе биде потребно, со инјектирање на некаква реактивна моќност Q_{KB} да се намали загубата на напон ΔU во преносниот систем. Во тој случај потребната инјектирана реактивна моќност од кондензаторската батерија Q_{KB} за одржување на напонот на собирница "3" на вредност 10 kV ќе ја пресметаме преку истата релација за пресметка на загубата на напон во системот, се разбира соодветно модифицирана заради моќноста Q_{SK} :

$$U_1 \cdot U'_3 - U'^2_3 = [P_3 \cdot R_e + (Q_3 - Q_{SK}) \cdot X_e]$$

Во неа единствена непозната е бараната моќност Q_{KB} . Решението гласи:

$$Q_{KB} = Q_3 - \frac{U'_3 \cdot (U_1 - U'_3) - P_3 \cdot R_e}{X_e};$$

$$Q_{KB} = 24 - \frac{104,762 \cdot (115 - 104,762) - 32 \cdot 9,315}{54,25} = 9,724 \text{ Mvar}$$

Загубата на активна моќност ΔP , во овој случај, ќе изнесува:

$$\Delta P = \frac{P_3^2 + (Q_3 - Q_{KB})^2}{U'^2_3} \cdot R_e; \quad \Delta P = \frac{32^2 + (24 - 18,4)^2}{104,762^2} \cdot 9,315 = 1,042 \text{ MW}.$$

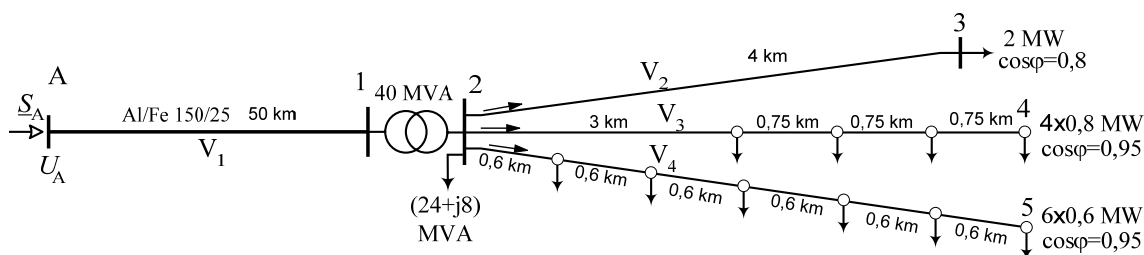
Значи после инсталирањето на кондензаторската батерија КВ, како дополнителен ефект, се намалија и загубите на моќност во преносот за 0,485 MW, т.е. за околу 40%.

□ □ □

Задача 2.38. На сликата 2.38.1 е прикажан дел од еден ЕЕС кој што се состои од 110 kV вод V1, ТС 110/10 kV/kV и 10 kV дистрибутивна мрежа. Напонот на собирницата 2, со помош на регулаторот на напон под товар на трансформаторот се одржува на константна вредност $U_2=10$ kV. Во посматраниот режим трансформаторот Т работи со својот номинален преносен однос $k_T=k_{Tn}$.

Среднонапонската мрежа, напојувана од трансформаторот Т, се состои од вкупно 8 изводи. На сликата 2.38.1 се прикажани само три од нив, додека преостанатите 5 изводи се еквивалентирани со сумарно оптоварување $\underline{S}_{\Sigma 2} = (P_{\Sigma 2} + jQ_{\Sigma 2}) = (24 + j8)$ MVA. Потрошувачот на крајот од надземниот вод V2 има моќност $P_2 = 2$ MW; $\cos\varphi_2 = 0,8$. Следниот извод V3 е кабелски и тој напојува вкупно 4 потрошувачи, секој со моќност од по 0,8 MW; $\cos\varphi = 0,95$. И конечно, третиот извод V4 е исто така кабелски. По неговата должина се наредени, на исти меѓусебни растојања $a_4 = 0,5$ km, вкупно 6 идентични потрошувачи, секој со моќност од по 600 kW; $\cos\varphi = 0,95$.

Да се пресметаат напоните U_A, U_1, U_3, U_4 и U_5 , и вкупната загуба на моќност $\Delta \underline{S}$ во мрежата.



Слика 2.38.1.

Податоците за елементите на мрежата се следните:

V1: $U_n = 110$ kV; Пресек Al/Č 150/25 mm²; $z_1 = (0,21 + j0,42)$ Ω/km; $b_1 = 2,62$ μS/km; $l_1 = 50$ km;

V2: $U_n = 10$ kV; Пресек Al/Č 50/8 mm²; $z_2 = (0,65 + j0,36)$ Ω/km; $b_2 = 3,05$ μS/km; $l_2 = 4$ km;

V3: кабел тип IPO 13 A 3×150 6/10 kV; $z_3 = (0,21 + j0,08)$ Ω/km; $l_3 = 3 + 3 \times 0,75 = 5,25$ km;

V4: кабел тип IPO 13 A 3×150 6/10 kV; $z_4 = (0,21 + j0,08)$ Ω/km; $l_4 = 6 \times 0,5 = 3$ km;

T: $(110 \pm 12 \times 1,25\%) / 10,5$ kV/kV; 40 MVA; $u_k\% = 11\%$; $i_o\% = 0,6\%$; $\Delta P_{Fe} = 36$ kW; $\Delta P_{Cun} = 211$ kW.

Напомена: При решавањето на задачата да не се занемарува капацитивната одводност на водовите и каблите во мрежата.

Решение:

Ќе ги пресметаме најнапред загубите на напон и моќност во одделните изводи од СН мрежа.

Прв извод. Вод V2: $P_2 = 2$ MW; $Q_2 = 1,5$ Mvar; $l_2 = 4$ km; $z_2 = (0,65 + j0,36)$ Ω/km.

$$\Delta U_2 = \frac{P_2 \cdot r_2 + Q_2 \cdot x_2}{U_n} \cdot l_2 = \frac{2 \cdot 0,65 + 1,5 \cdot 0,36}{10} \cdot 4 = 0,736 \text{ kV (7,36\%)};$$

$$U_3 = U_2 - \Delta U_2 = 10 - 0,736 = 9,264 \text{ kV};$$

$$\Delta P_2 = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} \cdot r_2 \cdot l_2 = \frac{2^2 + 1,5^2}{10^2} \cdot 0,65 \cdot 4 = 162,5 \text{ kW}.$$

Втор извод. Вод V3: $P_{\Sigma 3} = 4 \times 0,8 = 3,2$ MW; $\cos\varphi_3 = 0,95$; $Q_{\Sigma 3} = 1,052$ Mvar; $l_{\Sigma 3} = 3 + 3 \times 0,75 = 5,25$ km; $f_{p3} = (l_2 - n_3 \times a_3) / a_3 = 3$; $z_3 = (0,21 + j0,08)$ Ω/km; $M_3 = 4,268$ MW×km/%; $M'_3 = 42,68$ MW×km/kV.

$$\Delta U'_{3, \text{конц}} = \frac{P_{\Sigma 3} \cdot l_{\Sigma 3}}{M_3} = \frac{3,2 \cdot 5,25}{4,268} = 3,936\%; \quad k_{\Delta U 3} = \frac{2 f_{p3} + n_3 + 1}{2 \cdot (f_{p3} + n_3)} = 0,7143;$$

$$\Delta U_3 = k_{\Delta U 3} \cdot \Delta U'_{3, \text{конц}} = 0,7143 \cdot 3,936 = 2,81\%$$

$$\Delta U_3 = \frac{2,81}{10} \times 100 = 0,281 \text{ kV}; \quad U_4 = U_2 - \Delta U_3 = 9,719 \text{ kV},$$

$$\Delta P_{3,\text{конц}} = \frac{P_{\Sigma 3}^2 + Q_{\Sigma 3}^2}{U_n^2} \cdot r_3 \cdot l_3 = \frac{3,2^2 + 1,052^2}{10^2} \cdot 0,208 \cdot 5,25 = 123,9 \text{ kW};$$

$$k_{\Delta P 3} = \frac{1}{f_{p3} + n_3} \cdot \left[f_{p4} + \frac{(n_3 + 1) \cdot (2n_4 + 1)}{6 \cdot n_3^2} \right] = 0,49554;$$

$$\Delta P_3 = k_{\Delta P 3} \cdot \Delta P_{3,\text{конц}} = 0,49544 \cdot 123,9 = 61,4 \text{ kW}.$$

Третѝ извод. Вод V4: $P_{\Sigma 4} = 6 \times 0,6 = 3,6 \text{ MW}$; $\cos \varphi_4 = 0,95$; $Q_{\Sigma 4} = 1,183 \text{ Mvar}$; $l_{\Sigma 4} = 6 \times 0,5 = 3,0 \text{ km}$;
 $f_{p4} = (l_{\Sigma 4} - n_4 \times a_4) / a_4 = 0$; $z_4 = (0,21 + j0,08) \Omega/\text{km}$; $M_4 = 4,268 \text{ MW} \times \text{km}/\%$; $M'_4 = 42,68 \text{ MW} \times \text{km}/\text{kV}$.

$$\Delta U'_{4,\text{конц}} = \frac{P_{\Sigma 4} \cdot l_{\Sigma 4}}{M_4} = \frac{3,6 \cdot 3,0}{4,268} = 2,53\%; \quad k_{\Delta U 4} = \frac{n_4 + 1}{2 \cdot n_4} = 0,5833;$$

$$\Delta U_4 = k_{\Delta U 4} \cdot \Delta U'_{4,\text{конц}} = 0,5833 \cdot 2,53 = 1,476\%.$$

$$\Delta U_4 = \frac{1,476}{10} \times 100 = 0,1476 \text{ kV}; \quad U_5 = U_2 - \Delta U_4 = 9,824 \text{ kV},$$

$$\Delta P_{4,\text{конц}} = \frac{P_{\Sigma 4}^2 + Q_{\Sigma 4}^2}{U_n^2} \cdot r_4 \cdot l_{\Sigma 4} = \frac{3,6^2 + 1,183^2}{10^2} \cdot 0,208 \cdot 3,0 = 89,6 \text{ kW};$$

$$k_{\Delta P 4} = \frac{1}{f_{p4} + n_4} \cdot \left[f_{p4} + \frac{(n_4 + 1) \cdot (2n_4 + 1)}{6 \cdot n_4^2} \right] = 0,4213;$$

$$\Delta P_4 = k_{\Delta P 4} \cdot \Delta P_{4,\text{конц}} = 0,49544 \cdot 123,9 = 37,75 \text{ kW}.$$

Значи вкупните загуби $\Delta P_{\Sigma,\text{CH}}$ во СН мрежа ќе бидат:

$$\Delta P_{\Sigma,\text{CH}} = \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 = 162,5 + 61,4 + 37,75 = 261,65 \text{ kW}.$$

На сличен начин се добиваат и сумарните загуби на реактивна моќност $\Delta Q_{\Sigma,\text{CH}}$ во СН мрежа. Тие (приближно) изнесуваат:

$$\Delta Q_{\Sigma,\text{CH}} = \frac{X}{R} \cdot \Delta P_{\Sigma,\text{CH}} - b_2 \cdot l_{\Sigma 2} \cdot U_n^2 \approx 0.$$

Пресметка на загубаѝа на напон и загубаѝа на моќност во трансформаторот Т

Сведената вредност U'_2 на напонот U_2 ќе биде:

$$U'_2 = k_{Tn} \cdot U_2 = (110/10,5) \cdot 10,0 = 104,762 \text{ kV}.$$

Вкупното оптоварување $\underline{S}_T = (P_T + jQ_T)$ на трансформаторот Т ќе биде:

$$P_T = P_2 + P_{\Sigma 2} + P_{\Sigma 3} + P_{\Sigma 4} + \Delta P_{\Sigma,\text{CH}} = 24 + 2 + 3,2 + 3,6 + 0,262 = 33,062 \text{ MW};$$

$$Q_T = Q_2 + Q_{\Sigma 2} + Q_{\Sigma 3} + Q_{\Sigma 4} + \Delta Q_{\Sigma,\text{CH}} = 8 + 1,5 + 1,052 + 1,183 + 0 = 11,735 \text{ Mvar},$$

$$\underline{S}_T = (33,062 + j11,735) = 35,096 \cdot e^{j19,69^\circ} \text{ MVA}.$$

Сега можеме да ги пресметаме точните вредности на подолжната и попречната компонента на падот на напон во трансформаторот како и напонот U_1 на примарната страна. Како резултат се добива:

$$\Delta U_d = 4,223 \text{ kV}; \quad \Delta U_q = 10,227 \text{ kV}; \quad \underline{U}_1 = (U_2 + \Delta U_d) + j\Delta U_q = 109,464 \cdot e^{j5,36^\circ} \text{ kV}.$$

За загубите на моќност во трансформаторот добиваме:

$$\alpha = \frac{S_T}{S_n} = \frac{34,836}{40} = 0,871; \quad \Delta P_T = 212,5 \text{ kW}; \quad \Delta Q_T = 3817 \text{ kvar}.$$

Според тоа, моќноста што ќе ја влече трансформаторот Т од водот V1 ќе биде:

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_T + \Delta \underline{S}_T = (32,8 + j11,735) + (0,213 + j3,817) = (33,013 + j15,552) \text{ MVA};$$

$$U_1 = 109,964 \text{ kV}.$$

Остана да се реши уште водот V1. Тоа претставува класична задача на пресметка на загуба на напон и загуба на моќност во вод за којшто се познати приликите на крајот (видете ја задачата бр. 2.1). Со решавањето на овој проблем добиваме:

$$U_A = 115,421 \text{ kV}; \quad \underline{S}_A = (34,139 + j14,49) \text{ MVA};$$

$$\Delta P_{V1} = P_A - P_1 = 34,139 - 33,013 = 1,126 \text{ MW};$$

$$\Delta Q_{V1} = Q_A - Q_1 = 14,49 - 15,552 = -1,062 \text{ Mvar}.$$

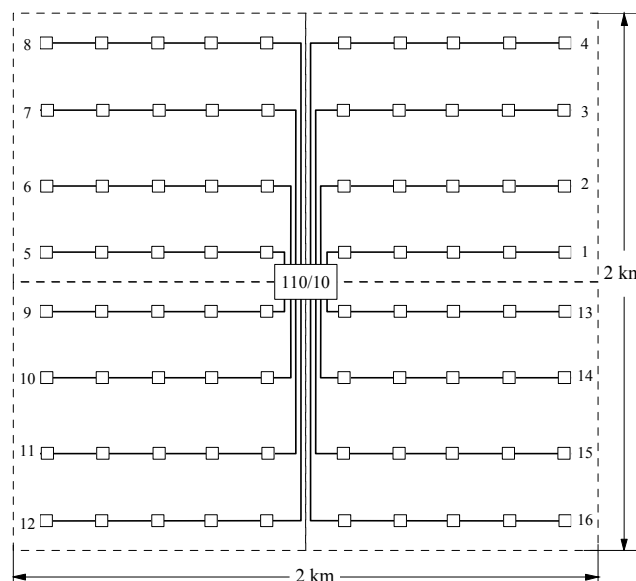
Вкупните загуби на активна моќност во системот ќе бидат:

$$\Delta P_\Sigma = \Delta P_{\Sigma, \text{CH}} + \Delta P_T + \Delta P_{V1} = 0,262 + 0,213 + 1,126 = 1,601 \text{ MW}.$$

□ □ □

Задача бр. 2.39*. Трансформаторска станица ТС 110/10 kV/kV напојува 10 kV кабелска мрежа. Сите кабли се од типот IPO 13 3x95 6/10 kV, и имаат подолжни параметри $r = 0,2 \text{ } \Omega/\text{km}$ и $x = 0,08 \text{ } \Omega/\text{km}$. Од ТС излегуваат 16 изводи и тие се разведуваат симетрично, во секој квадрант по 4, во конзумното подрачје кое претставува еден квадрат со страница $A = 2 \text{ km}$. На секој кабелски извод се приклучени по 5 трансформаторски станици ТС СН/НН 10/0,4 kV/kV. Меѓу секои две соседни ТС СН/НН растојанието изнесува $a = 200 \text{ m}$. Оптоварувањето на секоја од нив е приближно исто и изнесува 20% од вкупното оптоварување на изводот. Во режимот на максимално оптоварување секој од изводите е оптоварен со моќност од по $P_{\text{изв.}} = 2,25 \text{ MW}$ при $\cos \varphi = 0,95$ додека оптоварувањето на ТС 110/10 kV/kV во режимот на максимално оптоварување изнесува 36 MW.

Како што се гледа од самата слика, должините на изводите не се исти. Централните изводи бр. 1, 5, 9 и 13 се со должина по 1150 m, т.е. кај нив факторот на продолжување е $f_p = 0,75$. Изводите бр. 2, 6, 10, и 14 имаат должини по 1400 m и фактори $f_p = 2$. Изводите бр. 3, 7, 11 и 15 се со должини по 1650 m и фактори $f_p = 3,25$ и изводите бр. 4, 8, 12 и 16 се со должини по 1900 m и фактори $f_p = 4,5$. Вкупното количество енергија што ја испорачува ТС 110/10 на потрошувачите во прикажаната 10 kV мрежа изнесува 125.000 MWh годишно.



За посматраниот режим на максимално оптоварување да се пресметаат:

1) загубите на напон и загубите на моќност во секој од изводите на мрежата;

- 2) вкупните загуби на моќност во режимот на максималното оптоварување и
- 3) годишните загуби на енергија во целиот систем.

Осџананџи џодаџиоџи:

- Трансформатор ВН/СН: $S_n = 40 \text{ MVA}$ $110/10,5 \text{ kV/kV}$; $u_k\% = 16\%$; $P_{Fe} = 50 \text{ kW}$; $\Delta P_{Cun} = 240 \text{ kW}$.
- Трансформатори СН/СН: $S_n = 630 \text{ kVA}$ $10/0,4 \text{ kV/kV}$; $u_k\% = 4\%$; $P_{Fe} = 1,3 \text{ kW}$; $\Delta P_{Cun} = 5,2 \text{ kW}$.

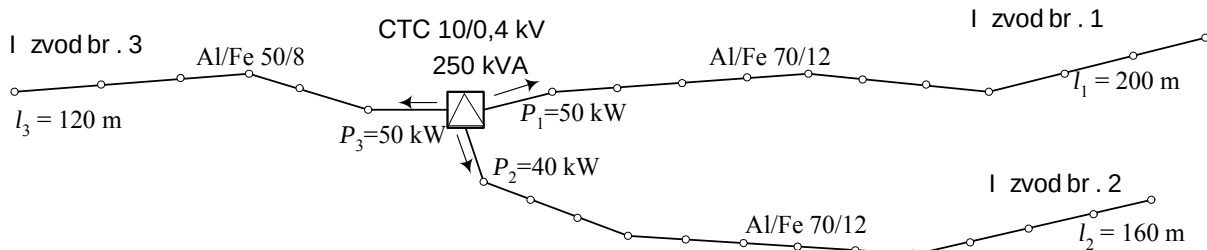
□ □ □

Задача 2.40. На сликата 2.40.1 е прикажана нисконапонска (НН) приградска дистрибутивна мрежа со три надземни изводи. Мрежата е напојувана од една столбна трансформаторска станица (СТС) со моќност 250 kVA. Познати се следните податоџи за мрежата и конзумот:

- извод бр. 1: $\text{Al}/\check{\text{C}} 70/12$ $z_1 = (0,465 + j0,31) \Omega/\text{km}$ $l_1 = 200 \text{ m}$ $P_{\Sigma 1} = 50 \text{ kW}$;
- извод бр. 2: $\text{Al}/\check{\text{C}} 70/12$ $z_2 = (0,465 + j0,31) \Omega/\text{km}$ $l_2 = 160 \text{ m}$ $P_{\Sigma 2} = 40 \text{ kW}$;
- извод бр. 3: $\text{Al}/\check{\text{C}} 50/8$ $z_3 = (0,625 + j0,32) \Omega/\text{km}$ $l_3 = 120 \text{ m}$ $P_{\Sigma 3} = 50 \text{ kW}$.

Сите потрошувачи во мрежата имаат ист фактор на моќност $\cos \varphi = 0,95$. Може да се смета дека потрошувачите од секој извод се рамномерно распределени по неговата должина. Податоџите за параметрите на разните типови водови се дадени во табелата 2.40.1. Да се процени:

- а) загубата на напон и загубата на моќност во секој од изводите;
- б) загубата на напон и вкупните загуби на моќност ΔP во мрежата.



Слика 2.40.1. НН приградска надземна мрежа

Решение:

Задачата ќе ја решиме приближно, третирајќи го товарот на секој извод како континуиран, рамномерно распределен. Во тој случај за загубите на напон и моќност во изводите ќе ги користиме релациите:

$$\Delta U = \frac{1}{2} \cdot \Delta U_{\text{конц}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{\Sigma} \cdot R + Q_{\Sigma} \cdot X}{U_n} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{\Sigma} \cdot l_{\Sigma}}{M'};$$

$$\Delta P = \frac{1}{3} \cdot \Delta P_{\text{конц}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{P_{\Sigma}^2 + Q_{\Sigma}^2}{U_n^2} \cdot R = \frac{1}{3} \cdot \frac{P_{\Sigma}^2}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi} \cdot R.$$

Во изразот за загуба на напон е воведена константата M' со помош на која е можно на едноставен начин да се пресмета загубата на напон во еден извод врз база на моментот на моќноста на потрошувачот(те). Таа се пресметува со помош на следната релација:

$$M' = \frac{U_n}{r + x \cdot \tan \varphi}. \quad (2.40.1)$$

Кога во формулата за загуба на напон ΔU моќноста P_{Σ} се задава во kW, должината l_{Σ} во km а подолжните параметри r и x во Ω/km , тогаш загубата на напон се добива во V.

Со помош на претходната релација (2.40.1) се пресметани вредностите на константата M' на некои почесто употребувани пресеци во НН дистрибутивни мрежи, за разни вредности на факторот на моќност $\cos\varphi$. Тие се приложни во следната табела.

Табела 2.40.1. Карактеристики на некои почесто употребувани НН надземни водови и кабли

ВОД ТИП	r , Ω/km	x , Ω/km	I_d , А	$I_{d, \text{зима}}$, А	S_d , kVA	$S_{d, \text{зима}}$, kVA	M' $\cos\varphi=0,9$	M' $\cos\varphi=0,95$	M' $\cos\varphi=1,0$
Al/Č 50/8	0,625	0,325	170	323	118	224	511,2	546,6	640,0
Al/Č 70/12	0,465	0,320	235	447	163	310	650,3	705,6	860,2
Al/Č 95/15	0,346	0,310	290	550	201	381	814,2	899,7	1156
X00-A 4x16	1,875	0,1	81	110	56	76	208,0	209,7	213,3
X00-A 4x35	0,930	0,1	131	203	91	141	408,8	415,4	430,1
X00-A 3x70+54,2	0,465	0,1	198	307	137	213	779,1	803,4	860,2

Леџенда: I_d и S_d – трајно дозволена струја и термичка моќност на водот за летни услови; $I_{d, \text{зима}}$ и $S_{d, \text{зима}}$ – трајно дозволена струја и термичка моќност за зимски услови; M' константа во kW×m/V.

За првиот извод ќе имаме:

$$P_{\Sigma 1} = P_1 = 50 \text{ kW}; \quad L_{\Sigma 1} = l_1 = 200 \text{ m}; \quad \cos\varphi_1 = 0,95; \quad M'_1 = 705,6 \text{ kW}\times\text{m/V};$$

$$\Delta U_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_1 \cdot l_1}{M_1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{50 \cdot 200}{705,6} = 7,1 \text{ V (1,77\%)}; \quad \Delta P_1 = \frac{1}{3} \cdot \frac{P_1^2 \cdot R_1}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi} = \frac{50^2 \cdot 0,093}{3 \cdot 0,4^2 \cdot 0,95^2} = 537 \text{ W}$$

На сличен начин постапуваме и за останатите два извода.

$$\text{Втор извод: } P_{\Sigma 2} = P_2 = 40 \text{ kW}; \quad L_{\Sigma 2} = l_2 = 160 \text{ m}; \quad \cos\varphi_1 = 0,95; \quad M'_2 = 705,6 \text{ kW}\times\text{m/V};$$

$$\Delta U_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_2 \cdot l_2}{M_2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{40 \cdot 160}{705,6} = 4,54 \text{ V (1,13\%)}; \quad \Delta P_2 = \frac{1}{3} \cdot \frac{P_2^2 \cdot R_2}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi} = \frac{40^2 \cdot 0,0744}{3 \cdot 0,4^2 \cdot 0,95^2} = 275 \text{ W}.$$

$$\text{Трет извод: } P_{\Sigma 3} = P_3 = 50 \text{ kW}; \quad L_{\Sigma 3} = l_3 = 120 \text{ m}; \quad \cos\varphi_1 = 0,95; \quad M'_3 = 546,6 \text{ kW}\times\text{m/V};$$

$$\Delta U_3 = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_3 \cdot l_3}{M_3} = \frac{1}{2} \cdot \frac{50 \cdot 120}{546,6} = 5,5 \text{ V (1,37\%)}; \quad \Delta P_3 = \frac{1}{3} \cdot \frac{P_3^2 \cdot R_3}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi} = \frac{50^2 \cdot 0,075}{3 \cdot 0,4^2 \cdot 0,95^2} = 433 \text{ W}.$$

Според тоа, загубата на напон во мрежата ќе биде $\Delta U = \Delta U_1 = 7,1 \text{ V}$, односно 1,77%, додека вкупната загуба на моќност во мрежата ќе биде:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 = 0,537 + 0,275 + 0,433 = 1,245 \text{ kW}.$$

□ □ □

Задача 2.41. Колкави е бидат загубите ΔU и ΔP во НН мрежа после 10 години ако потрошувачката во мрежата расте од година во година со стапка на пораст од 3% годишно.

Решение:

$$\Delta U = \text{ V (\%); } \quad \Delta P = \text{ kW (\%).}$$

□ □ □

Задача 2.42. Се посматра третиот извод од мрежата прикажана во задачата 2.40 за состојба во некоја идна година. Во режимот на максималното оптоварување сумарната потрошувачка на изводот изнесува $P_{3, \text{max}} = 80 \text{ kW}$; $\cos\varphi = 0,95$ и напонот на НН собирници од ТС (т.е. напонот на неговиот почеток) изнесува $U_{A, \text{max}} = 390 \text{ V}$. Во режимот на минималното оптоварување, пак, сумарната потрошувачка на изводот изнесува $P_{3, \text{min}} = 32 \text{ kW}$; $\cos\varphi = 0,95$ и напонот на неговиот

почеток изнесува $U_{A.min} = 400$ V. Да се пресмета во кој интервал ќе варира напонот на крајот од изводот во текот на денот.

Решение:

Во режимот на максимално оптоварување ќе имаме:

$$\Delta U_3 = \Delta U_{3.max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{3.max} \cdot l_3}{M'_3} = \frac{1}{2} \cdot \frac{80 \cdot 120}{546,6} = 9 \text{ V}.$$

Според тоа, напонот на крајот од изводот $U_{3.max}$ во овој режим ќе биде:

$$U_{3.max} = U_{A.max} - \Delta U_{3.max} = 390 - 9 = 381 \text{ V}.$$

На сличен начин, за режимот со минимално оптоварување се добива:

$$\Delta U_{3.min} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{3.min} \cdot l_3}{M'_3} = \frac{1}{2} \cdot \frac{32 \cdot 120}{546,6} = 3,5 \text{ V},$$

$$U_{3.min} = U_{A.min} - \Delta U_{3.min} = 400 - 3,5 = 396,5 \text{ V} \approx 397 \text{ V}.$$

Значи, во текот на денот, напонот на крајот од водот ќе варира во границите:

$$381 \leq U \leq 397 \text{ V}.$$

Заслужува да се спомене дека варијацијата на напонот во другите точки по должината на изводот ќе биде помала. Така, на пример, се покажува (видете ја задачата бр. 2.27) дека загубата на напон $\Delta U_{l/2}$ во средишната точка од изводот ќе биде:

– за режим со максимално оптоварување:

$$\Delta U_{(l/2).max} = 0,75 \cdot \Delta U_{3.max} = 6,6 \text{ V} \Rightarrow U_{(l/2).max} = U_{A.max} - \Delta U_{(l/2).max} = 390 - 6,6 = 383,4 \text{ V}, \text{ и}$$

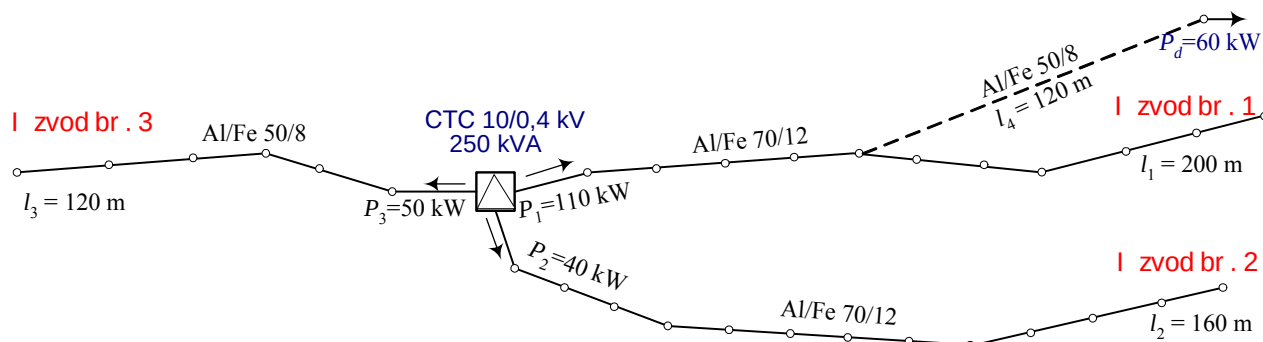
– за режим со минимално оптоварување:

$$\Delta U_{(l/2).min} = 0,75 \cdot \Delta U_{3.min} = 2,7 \text{ V} \Rightarrow U_{(l/2).min} = U_{A.min} - \Delta U_{(l/2).min} = 400 - 2,7 = 397,3 \approx 397 \text{ V}.$$

Значи, во точката што се наоѓа на $l/2 = 60$ m од почетокот на изводот, напонот ќе варира во текот на денот во интервалот $383 \leq U_{l/2} \leq 397$ V.

□ □ □

Задача 2.43. Се посматра мрежата од претходната задача 2.40. Во населбата се појавува нов потрошувач со моќност $P_d = 60$ kW, $\cos \varphi_d = 0,95$ ($Q_d = 19,7$ kvar) кој треба да се приклучи на средината од првиот извод преку надземен отцеп Al/Č 50/8 со должина $l_d = 120$ m и параметри ($\underline{Z}_d = \underline{Z}_4 = (0,625 + j0,32) \Omega/\text{km}$) (слика 2.43.1). Да се пресметаат загубата на напон и загубата на моќност во изводот по приклучувањето на новиот потрошувач.

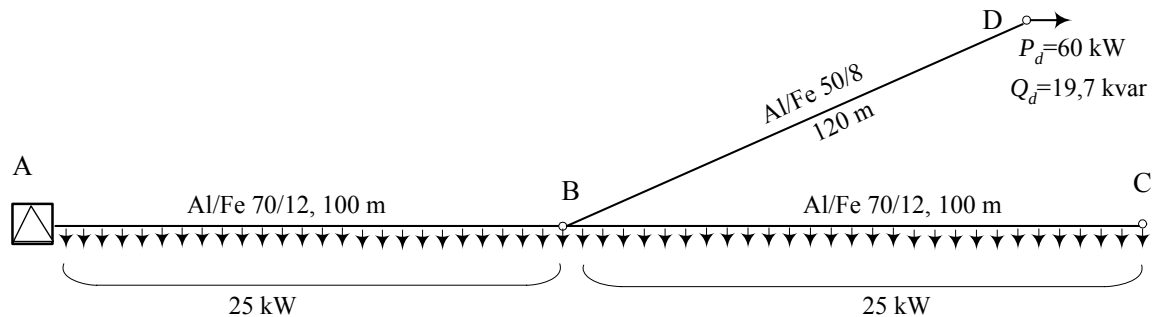


Слика 2.43.1. Приклучување на нов потрошувач во НН мрежа од задачата бр. 2.40

Решение:

Значи ќе се анализира само состојбата во засегнатиот извод бр. 1 бидејќи состојбата во останатите изводи нема да се промени.

При решавањето на оваа задача ќе ја примениме постапката изложена во задачата бр. 2.30, т.е. целиот извод бр. 1 ќе го поделиме на три сегмени (секции) како што е тоа прикажано на следната слика.



Слика 2.41.2. Поделба на изводот бр. 1 на три секции: А-В, В-С и В-Д

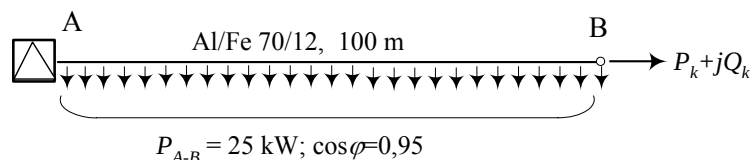
Најнапред ќе ги пресметаме загубите на напон и моќност во секциите В-С и В-Д (слика 2.43.2). За секцијата В-С која е оптоварена со рамномерно распределен товар со вкупна моќност $\underline{S}_{B-C} = (25 + j8,2) \text{ kVA}$ се добива:

$$\Delta U_{B-C} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{B-C} \cdot l_{B-C}}{M_{B-C}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{25 \cdot 100}{705,6} = 1,77 \text{ V}; \quad \Delta P_{B-C} = \frac{1}{3} \cdot \frac{P_{B-C}^2 \cdot R_{B-C}}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi} = \frac{25^2 \cdot 0,0465}{3 \cdot 0,4^2 \cdot 0,95^2} = 0,067 \text{ kW}$$

Бидејќи потрошувачот во секцијата В-Д е концентриран на нејзиниот крај, за неа важи:

$$\Delta U_{B-D} = \frac{P_d \cdot l_d}{M_{B-D}} = \frac{60 \cdot 120}{546,6} = 13,2 \text{ V}; \quad \Delta P_{B-D} = \frac{P_{B-D}^2 \cdot R_{B-D}}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi_{B-D}} = \frac{60^2 \cdot 0,625 \cdot 0,12}{0,4^2 \cdot 0,95^2} = 2,084 \text{ kW}$$

Секцијата А-В ќе ја решиме на тој начин што оптоварувањето од делницата В-С и од потрошувачот $\underline{S}_d = P_d + jQ_d$ ќе ги еквивалентираме со еден единствен концентриран потрошувач со моќност $\underline{S}_k = P_k + jQ_k$, поставен на крајот од оваа секција, како на следната слика:



Слика 2.43.3 Решавање на секцијата А-В од изводот бр. 1

Во тој случај ќе имаме:

$$P_k = P_{B-D} + P_d = 25 + 60 = 85 \text{ kW}$$

$$Q_k = Q_{B-D} + Q_d = 8,2 + 19,7 = 27,9 \text{ kvar}$$

$$\Delta U_{A-B} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{A-B} \cdot l_{A-B}}{M'} + \frac{P_k \cdot l_{A-B}}{M'} = \frac{25 \cdot 100}{2 \cdot 705,6} + \frac{85 \cdot 100}{705,6} = 1,77 + 12,05 = 13,82 \text{ V (3,45\%)}.$$

Доколку загубите на напон ΔU_{A-B} ги решаваме "класично", ќе го добиевме повторно истиот резултат:

$$\Delta U_{A-B} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{A-B} \cdot R_{A-B} + Q_{A-B} \cdot X_{A-B}}{U_n} + \frac{P_k \cdot R_{A-B} + Q_k \cdot X_{A-B}}{U_n}, \text{ или}$$

$$\Delta U_{A-B} = \frac{1}{2} \cdot \frac{25 \cdot 0,0465 + 8,2 \cdot 0,031}{0,4} + \frac{85 \cdot 0,0465 + 27,9 \cdot 0,031}{0,4} = 1,77 + 12,05 = 13,82 \text{ V (3,45\%)}.$$

За загубите на моќност во секцијата А–В ќе имаме:

$$\Delta P_{A-B} = \frac{1}{3} \cdot \frac{P_{A-B}^2 + Q_{A-B}^2}{U_n^2} \cdot R_{A-B} + \frac{P_k^2 + Q_k^2}{U_n^2} \cdot R_{A-B} + \frac{P_{A-B} \cdot P_k + Q_{A-B} \cdot Q_k}{U_n^2} \cdot R_{A-B}$$

$$\Delta P_{A-B} = \frac{1}{3} \cdot \frac{25^2 + 8,2^2}{0,4^2} \cdot 0,0465 + \frac{85^2 + 27,9^2}{0,4^2} \cdot 0,0465 + \frac{25 \cdot 85 + 8,2 \cdot 27,9}{0,4^2} \cdot 0,0465$$

$$\Delta P_{A-B} = 0,067 + 2,326 + 0,684 = 3,077 \text{ kW}.$$

Според тоа, по приклучувањето на новиот потрошувач, загубата на напон во првиот извод ќе биде најголема на релацијата А–В–D, и ќе изнесува:

$$\Delta U = \Delta U_{A-B} + \Delta U_{B-D} = 13,82 + 13,2 = 27 \text{ V} \text{ (6,75\%).}$$

Загубата на напонот до точката С ΔU_{A-C} во тој случај ќе биде:

$$\Delta U_{A-C} = \Delta U_{A-B} + \Delta U_{B-C} = 13,82 + 1,77 = 15,59 \text{ V} \text{ (3,9\%).}$$

Новите загуби на моќност во овој извод ќе бидат:

$$\Delta P = \Delta P_{A-B} + \Delta P_{B-C} + \Delta P_{B-D} = 3,077 + 0,067 + 2,084 = 5,268 \text{ kW}$$

што изнесува 4,8% од вкупното оптоварување на овој извод.

□ □ □

Задача 2.44^{*}. Да се пресмета колкава може да биде моќноста $P_d = ?$ на новиот потрошувач што смее да се приклучи во изводот бр. 1 во мрежата од претходната задача доколку загубата на напон до потрошувачот во точката D не смее да биде поголема од 5%. Колкави ќе бидат напоните U_B и U_C во тој случај, ако е $U_A = 400 \text{ V}$.

□ □ □

Задача 2.45. Оптоварувањето на домаќинствата се состои од два дела: дел којшто се должи на електричното греење и дел кој не зависи од начинот на загревањето. За група од n домаќинства, во наши услови, врвното оптоварување на целата група $P_{\max} = P_{\max}(n)$ може да се процени со помош на следната емпирирска релација:

$$P_{\max} = n \cdot P_{1.\text{inst}} \cdot (k_e + \frac{1-k_e}{\sqrt{n}}) + 2,86 \cdot n^{0,88} \cdot (1 + \frac{p\%}{100})^{(t-1990)}, \text{ kW} . \quad (2.45.1)$$

Одделните величини што фигурираат во овој израз го имаат следното значење:

$P_{1.\text{inst}}$ – просечна исталирана моќност по домаќинство во уредите за електрично греење со која секое домаќинство учествува во врвното едновременно оптоварување;

k_e – коефициент на едновременост на врвното годишно оптоварување за електрично затоплување на многу голем (теориски бесконечно голем) број домаќинства;

$p\%$ – просечна процентуална годишна стапка на пораст на годишното едновременно оптоварување на останатите електрични уреди во домаќинствата;

t – година за која се пресметува максималното едновременно оптоварување ($t \geq 1990$).

Населбите за кои ни во подалечна перспектива не се согледува можноста за воведување централно греење и во кои доминираат станбени објекти од ист или сличен тип, (нпр. приземни бараки, индивидуални куќи со спратност П, П+1, П+2 и слично), според техничката препорака ТП 14.6 на ЗЕПС [2], се означуваат како населби од типот 5. За нив се користат следните вредности за овие параметри:

$$P_{1.\text{inst}} = 3 \text{ kW/домаќинство}; \quad k_e = 0,55; \quad p\% = 1,5\%/годишно,$$

што значи дека едновремената врвна моќност на групата од n домаќинства за годината t може да се пресмета со помош на изразот:

$$P_{\max} = 3n \cdot (0,55 + \frac{0,45}{\sqrt{n}}) + 2,86 \cdot n^{0,88} \cdot 1,015^{(t-1990)} \quad (2.45.2)$$

На тој начин се доаѓа до следната табела.

Табела 2.45.1 Максимално оптоварување $P_{\max}(n)$ (kW) на станбена населба од типот 5

n	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
2000 г.	104	196	284	369	454	537	619	701	781	862	941	1021
2005 г.	109	204	295	384	472	558	643	728	812	895	977	1059
2010 г.	113	212	308	400	491	581	669	757	844	930	1016	1101

Се посматра НН извод изведен со СКС од типот X00/0-A 3x70+71,5+2x16, 1 kV со вкупна должина $l = 200$ m. Кабелот напојува 20 индивидуални станбени објекти од типот П+1 со вкупно $n = 40$ домаќинства кои се практично рамномерно распоредени по неговата должина. Факторот на моќност на конзументот е $\cos\varphi=0,95$. Да се пресмета:

- Загубата на напон и загубата на моќност за годината $t = 2010$.
- Кога оптоварувањето на кабелот I ќе ја достигне неговата зимска дозволена струја $I_{d,зима} = 307$ A? Колкава ќе биде тогаш загубата на напон во посматраниот извод.

Решение:

Со помош на дадениот израз (2.45.2) најнапред ќе го пресметаме врвното едновременно оптоварување $P_{\max}$ за групата од $n = 40$ домаќинства за $t=2010$ година.

$$P_{\max} = P_{\max}(40) = 40 \cdot 3 \cdot (0,55 + \frac{0,45}{\sqrt{40}}) + 2,86 \cdot 40^{0,88} \cdot 1,015^{(2010-1990)} = 173,5 \text{ kW}.$$

Приближна, но сепак доволно точна, вредност за $P_{\max}$ можеме да добиеме и со помош на табелата 2.45.1 применувајќи ја постапката на линеарна интерполација:

$$P_{\max} \approx 113 + \frac{212-113}{50-25} \cdot (40-25) = 172,4 \text{ kW} \Rightarrow I_{\max} = \frac{P_{\max}}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos\varphi} = \frac{173,5}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 0,95} = 264 \text{ A}$$

Сега можеме да ја пресметаме загубата на напон и загубата на моќност во изводот што ќе се има во 2010 год.

$$\Delta U = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{\max} \cdot l}{M} = \frac{1}{2} \cdot \frac{173,5 \cdot 200}{803,4} = 21,6 \text{ V (5,4\%)}.$$

$$\Delta P = \frac{1}{3} \cdot \frac{P_{\max}^2 \cdot r \cdot l}{U_n^2 \cdot \cos^2\varphi} = \frac{173,5^2 \cdot 0,465 \cdot 0,2}{3 \cdot 0,4^2 \cdot 0,95^2} = 6,462 \text{ kW}.$$

На трајно дозволена зимска струја $I_{d,зима} = 307$ A соодветствува привидна моќност $S_{d,зима} = \sqrt{3} U_n \cdot I_{d,зима} = 213 \text{ kVA}$ односно активна моќност $P_{d,зима} = S_{d,зима} \cdot \cos\varphi = 202 \text{ kW}$. Годишната t во која ќе се реализира оваа моќност ќе ја добиеме со решавање на равенката:

$$202 = 3 \cdot 40 \cdot (0,55 + \frac{0,45}{\sqrt{40}}) + 2,86 \cdot 40^{0,88} \cdot 1,015^{(t-1990)}$$

во која единствена непозната е бараната година t . Со логаритмирање се добива бараното решение: $t = 2027$ год. Загубата на напон во граничната година ќе биде:

$$\Delta U_{t=2027} = \frac{P_{dz} \cdot l}{2M} = \frac{202 \cdot 200}{2 \cdot 803,4} = 25 \text{ V (6,25\%)}.$$

□ □ □

Задача 2.46. Колкав е максималниот можен број домаќинства n што може да се приклучи на изводот разгледуван во претходната задача за годината $t = 2010$ со кој струјното оптоварување на изводот нема да ја надмине својата зимска термичка дозволена граница.

Решение:

Од табелата 2.40.1 отчитуваме дека зимската термички дозволена граница за самоносивиот кабел (СКС) тип X00/0-A 3x70+54,2 изнесува $S_{d,зима} = 213 \text{ kVA}$. На оваа привидна моќност и соодветствува активна моќност $P_{dz} = S_{d,зима} \cdot \cos\varphi = 202 \text{ kW}$. Од табелата 2.45.1 (задача 2.45) се гледа дека на оваа вредност соодветствува број на домаќинствата кој се движи во интервалот $25 < n < 50$ домаќинства. Користејќи ја оваа табела, со примена на постапката за линеарна интерполација се добива:

$$n = 25 + \frac{50 - 25}{212 - 113} \cdot (202 - 113) = 47,5 \Rightarrow n = 47 \text{ домаќинства}.$$

Значи, во $t = 2010$ година на овој извод не смеат да бидат приклучени повеќе од 47 домаќинства доколку сакаме тој да не биде термички преоптоварен.

□ □ □

Задача 2.47. Да се пресмета граничната должина l_{gran} на НН надземен фидер, изведен со спроводници Al/Č 70/12 ($z = (0,465 + j0,32) \Omega/\text{km}$; $M'_{0,95} = 701,5 \text{ kW} \times \text{m/V}$). Фидерот (изводот) треба да напојува група од $n=40$ домаќинства во градска станбена населба од типот 5. Станбените објекти се приближно рамномерно распоредени по должината на изводот и може да се третираат како контуиран, рамномерно распределен, товар. Факторот на моќност на товарот изнесува $\cos\varphi=0,95$. Дозволената загуба на напон во изводот изнесува $\Delta U_{doz} = 20 \text{ V}$ (5%). Пресметките да се направат за перспективната $t=2010$ година. Врвното оптоварување на групата да се пресмета со помош на формулата (2.45.2) од задачата 2.45.

Решение:

Помеѓу загубата на напон ΔU и "моментот на товарот", т.е. производот $P \cdot l$ на вод со континуиран товар постои следната релација:

$$\Delta U = \frac{P \cdot l}{2 \cdot M'} \quad (2.47.1)$$

Од оваа релација следи:

$$P \cdot l = 2M' \cdot \Delta U. \quad (2.47.2)$$

Бидејќи бројот на домаќинствата е познат и изнесува $n=40$, можеме да го пресметаме едновременото врвно оптоварување P_{max} . Во тој случај единствена непозната е должината l со која се постигнува зададената загуба на напон ΔU . Според тоа имаме:

$$l_{gran} = \frac{2M' \cdot \Delta U_{doz}}{P_{max}}. \quad (2.47.3)$$

Во конкретниот случај:

$$n = 40; P_{max} = 3 \cdot 40 \cdot \left[0,55 + \frac{0,45}{\sqrt{40}} \right] + 2,86 \cdot 40^{0,88} \cdot 1,015^{20} = 173,5 \text{ kW}. \quad (2.47.4)$$

$$l_{gran} = \frac{2 \cdot 701,5 \cdot 20}{173,5} = 162 \text{ m}. \quad (2.47.5)$$

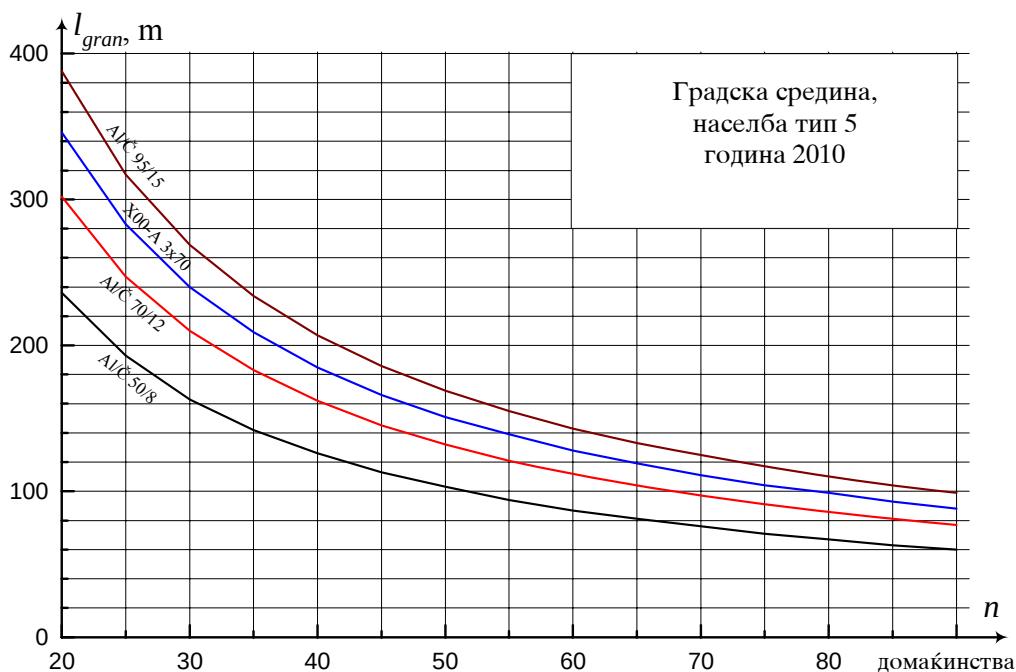
Применувајќи ја оваа постапка повеќе пати, за разни вредности на бројот на домаќинства n , можеме да ја добиеме зависноста $l_{gran} = f(n)$ во табеларна и во графичка форма. Ваква табела и дијаграми се изработени за четирите стандардни пресеци на НН надземни водови

коишто се користат за изведба на НН изводи. Тие се прикажани во табелата 2.47.1 и на сликата 2.47.1.

Со познатата зависност $l_{gran}(n)$ можат да се решаваат и обратно поставените задачи – за извод со познати карактеристики и позната должина l да се пресмета максималниот број домаќинства што смее да се приклучи на него а сè уште да биде задоволен напонскиот критериум $\Delta U \leq \Delta U_{doz}$.

Табела 2.47.1. Гранични должини (m) во зависност од бројот на приклучените домаќинства n .

Бр. на дом. n	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
P_{max} , (kW)	50	72	93	113	134	154	174	193	212	232	251	270	289	308	326	345	363
Al/Č 50/8	437	305	236	193	163	142	126	113	103	94	87	81	76	71	67	63	60
Al/Č 70/12	561	391	302	247	210	183	162	145	132	121	112	104	97	91	86	81	77
Al/Č 95/15	720	502	388	317	269	234	207	186	169	155	143	133	125	117	110	104	99
X00-A 3x70	643	448	346	283	240	209	185	166	151	139	128	119	111	104	99	93	88



Слика 2.47.1. Графички приказ на табелата 2.47.1

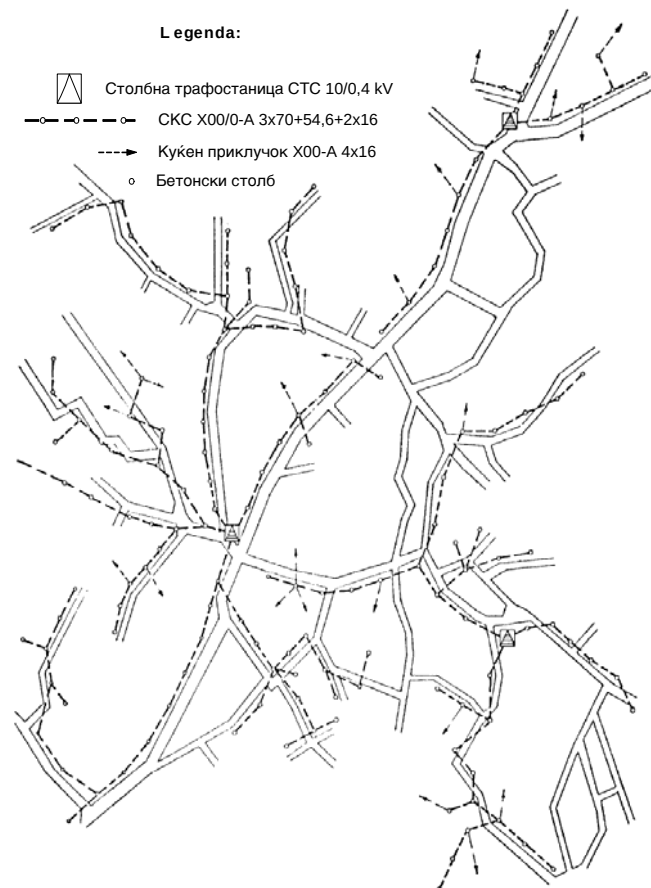
□ □ □

Задача 2.48. Пресметките од претходната задача да се повторат за случајот кога се работи за домаќинства во неурбанизирани селски (рурални) средини, со мала линиска густина на станбените објекти (средини од типот 7*, според ТП 14.6 на ЗЕПС [20]). Врвната едновремена моќност на групата од n домаќинства од овој тип, според техничката препорака ТП 146 на ЗЕП може да се пресмета со помош на следната емпириска релација:

$$P_{\max} = P_{1.\text{inst}} \cdot n \cdot \left(k_e + \frac{1-k_e}{\sqrt{n}} \right) + 2,86 \cdot n^{0,88} \text{ kW} \quad (2.48.1)$$

$$P_{1.\text{inst}} = 0,75 \text{ kW}; \quad k_e = 0,55$$

*) **Забелешка.** За овие населби е карактеристично тоа што нивните улици се без вистински раскрсници, со неправилен облик и распоред и со слаба пополнетост со објекти. Станбените објекти се главно стихиски и неплански градени, претежно со спратност П, П+1 и П+2. Греењето кај некои домаќинства е на струја, но притоа не се загреваат сите простории. Поголемиот дел од овие домаќинства применува друг начин на загревање на просториите (дрва, јаглен, масло за домаќинства и сл.). Потрошувачката на електрична енергија кај овој вид домаќинства стагнира, т.е. не расте со текот на времето.



Слика 2.48.1

Решение:

Табела 2.48.1. Гранични должини (m) на изводот во зависност од бројот на приклучените домаќинства n од типот 7 (неурбанизирани, рурални средини) за $\Delta U \leq 5\%$.

домаќинства n	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
$P_{\max}, \text{ (kW)}$	50	61	71	82	92	112	132	152	171	190	209	228	246	265	283	301	319	337	355
Al/Č 50/8	440	361	307	267	237	194	165	144	128	115	105	96	89	83	77	73	69	65	62
Al/Č 70/12	565	463	394	343	305	250	212	185	164	147	134	123	114	106	99	93	88	83	79
Al/Č 95/15	724	594	505	440	391	320	272	237	210	189	172	158	146	136	127	120	113	107	101
X00-A 4x35	334	274	233	203	180	148	126	109	97	87	79	73	67	63	59	55	52	49	47
X00-A 3x70	647	530	451	393	349	286	243	212	188	169	154	141	130	121	114	107	101	95	91

□ □ □

Задача 2.49. На сликата 2.49.1 се прикажани два полупрстени од една 10 kV кабелска градска мрежа (полупрстените се фидери кои заемно се резервираат). Обата напојуваат по $n=5$ трафостаници ТС 10/0,4 kV и имаат идентични карактеристики:

1 полупрстен: кабел тип ХНЕ 49-А 3х1х150, 6/10 kV; $z_1 = (0,206+j0,092) \Omega/\text{km}$; $l_1 = 2,1 \text{ km}$; $a = 300 \text{ m}$ (a е просечното растојание помеѓу две соседни ТС СН/НН од фидерот);

2 полупрстен тип: ХНЕ 49-А 3х1х150, 6/10 kV; $z_2 = (0,206+j0,092) \Omega/\text{km}$; $l_2 = 2,1 \text{ km}$; $a = 300 \text{ m}$

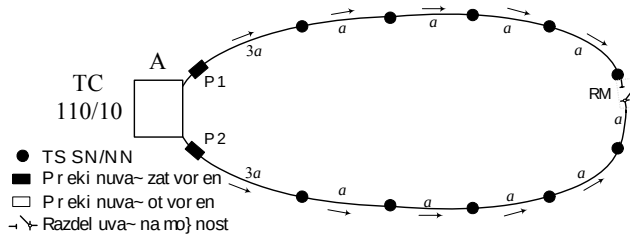
Во зимски услови вкупното струјно оптоварување на обата извода е исто $I_1 = I_2 = 150 \text{ A}$, $\cos\varphi=0,95$. Напонот во напојната точка А (СН собраници) изнесува $U_A = 10,3 \text{ kV}$.

Да се пресметаат загубите на напон и загубите на моќност во секој од изводите за следните два случаја:

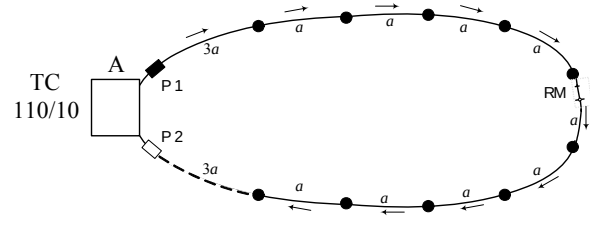
а) во нормален погон (слика 1а), кога П1 и П2 се вклучени, РМ е исклучен;

б) во режим на најтежок дефект (слика 1б) кога првата делница од вториот извод е исклучена поради дефект (П1 е вклучен, П2 е исклучен, РМ е вклучен).

Може да се смета дека оптоварувањата во секоја ТС СН/НН се приближно исти.



Слика 2.49.1



Слика 2.49.2

Решение:

а) Нормален режим на работа.

Сумарните оптоварувања $\underline{S}_{\Sigma 1}$ и $\underline{S}_{\Sigma 2}$ на секој од изводите во нормален режим на работа ќе бидат исти:

$$S_{\Sigma 1} = \sqrt{3} \cdot U_A \cdot I_1 = \sqrt{3} \cdot 10,3 \cdot 0,15 = 2,676 \text{ MVA};$$

$$P_{\Sigma 1} = S_{\Sigma 1} \cos \varphi_1 = 2,542 \text{ MW}; \quad Q_{\Sigma 1} = S_{\Sigma 1} \sin \varphi_1 = 0,836 \text{ Mvar}$$

$$\underline{S}_{\Sigma 1} = (2,542 + j0,836) \text{ MVA}; \quad \underline{S}_{\Sigma 2} = \underline{S}_{\Sigma 1}$$

Во задачата 2.24 е покажано дека загубата на напон и загубата на моќност во еден фидер, какви што се набљудуваните, можат да се пресметаат на следниот начин:

$$\Delta U = k_{\Delta U} \cdot \frac{P_{\Sigma} \cdot R + Q_{\Sigma} \cdot X}{U_n} = k_{\Delta U} \cdot \Delta U_{\text{конц}};$$

$$\Delta P = k_{\Delta P} \cdot \frac{P_{\Sigma}^2 + Q_{\Sigma}^2}{U_n^2} \cdot R = k_{\Delta P} \cdot \Delta P_{\text{конц}},$$

каде што се:

R, X - вкупна активна и реактивна отпорност на изводот, Ω ;

$$k_{\Delta U} = \frac{2f_p + n + 1}{2(f_p + n)}; \quad k_{\Delta P} = \frac{1}{f_p + n} \left[f_p + \frac{(n+1)(2n+1)}{6n} \right]; \quad f_p = \frac{l_p}{a} = \frac{l - n \cdot a}{a}$$

Во конкретниот случај, од причини на симетрија, приликите во обата извода ќе бидат исти. Затоа ќе ги анализираме само приликите во едниот извод, на пример во првиот. Тогаш ќе имаме:

$$f_p = f_{p1} = \frac{l_{p1}}{a_1} = \frac{l_1 - n_1 \cdot a_1}{a_1} = \frac{2,1 - 5 \cdot 0,3}{0,3} = 2;$$

$$k_{\Delta U} = \frac{2 \cdot 2 + 5 + 1}{2(2 + 5)} = 0,7143; \quad k_{\Delta P} = \frac{1}{2 + 5} \cdot \left[2 + \frac{(5+1)(10+1)}{6 \cdot 5} \right] = 0,6$$

$$R_1 = r_1 l_1 = 0,206 \cdot 2,1 = 0,433 \Omega; \quad X_1 = x_1 l_1 = 0,092 \cdot 2,1 = 0,193 \Omega$$

$$\Delta U_1 = 0,7143 \cdot \frac{2,542 \cdot 0,433 + 0,836 \cdot 0,193}{10} = 0,7143 \cdot 0,126 = 0,09 \text{ kV} \quad (0,9\%);$$

$$\Delta P_1 = 0,6 \cdot \frac{2,542^2 + 0,836^2}{10^2} \cdot 0,433 = 0,6 \cdot 0,031 = 0,0186 \text{ MW} \equiv 18,6 \text{ kW} (0,73\%).$$

Напълно исти ќе бидат приликите во другиот извод, т.е.:

$$\Delta U_2 = 0,09 \text{ kV}; \quad \Delta P_2 = 18,6 \text{ kW}.$$

Според тоа, вкупната загуба на напон и вкупните загуби на активна можност во мрежата ќе бидат:

$$\Delta U = \Delta U_1 = 0,09 \text{ kV} (0,9\%) \text{ и } \Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 = 37,2 \text{ kW}.$$

б) *Режим со најтежок дефект.*

Кога ќе настане дефект на првата делница од изводот бр. 2 прекинувачот П2 се исклучува, повредената делница се изолира од преостанатиот дел од фидерот а разделувачот на моќност (РМ) се вклучува, така што преостанатиот дел од вториот извод се закачува на првиот извод. Во тој случај се добива нов, вештачки, извод со скоро двојно поголема должина $l = l_1 + l_2 - l_{P2} + a = 3,6 \text{ km}$ и двојно поголемо оптоварување $\underline{S}_\Sigma = \underline{S}_{\Sigma 1} + \underline{S}_{\Sigma 2} = (5,082 + j1,672) \text{ MVA}$. Поради тоа вкупните загуби на напон ќе зголемат за приближно 4 пати, додека вкупните загуби на активна моќност ќе се зголемат за околу 8 пати, т.е.:

$$\Delta U = 4 \cdot \Delta U_1 = 0,36 \text{ kV} \equiv 3,6\%; \quad \Delta P = 8 \cdot \Delta P_1 = 148,8 \text{ kW}.$$

Како што гледаме загубата на напон во режимот со најтежок дефект е само 3,6%. За вакви режими, кои се ретки, инцидентни и со мало времетраење, се толерираат и значително поголеми загуби на напонот од редот на големина на 10%. Значи, од аспект на напонските прилики, ваквиот режим е сосема прифатлив. Останува уште да се провери дали изводот во ваквиот режим е термички преоптоварен.

Бидејќи сумарното струјно оптоварување на изводот во режимот со најтежок дефект ќе биде $I_{\Sigma 1} = 300 \text{ A}$ и тоа е помало од дозволеното зимско струјно оптоварување $I_d = 340 \text{ A}$ за летни услови (табела П.8 од прилогот), односно $I_{d, \text{зима}} = 1,105 \cdot I_d = 375 \text{ A}$ за зимски услови, произлегува заклучокот дека резервирањето на анализираните изводи е технички изводливо без никакви проблеми.

□ □ □

Задача 2.50. Да се направи анализа на загубите на напон и моќност во изводите од претходната задача 2.49 за нормален режим и режим со најтежок дефект за случајот кога просечното растојание помеѓу две соседни ТС 10/0,4 во изводот изнесува $a = 500 \text{ m}$.

□ □ □

Задача 2.51. Се посматра првиот извод од задачата 2.49 во анализираниот нормален режим на работа. Напонот во напојната точка во режимот на максимално оптоварување се држи на вредноста $U_A = 10,3 \text{ kV}$. На сликата 2.51.1 е прикажан целиот прв СН извод и дел од НН мрежа напојувана од последната ТС 10/0,4 kV/kV. Трансформаторот Т5 во последната трафостаница СН/НН напојува осум нисконапонски кабелски изводи. Сумарното оптоварување на трансформаторот изнесува 20% од сумарното оптоварување на СН извод, т.е. $\underline{S}_5 = \underline{S}_{\Sigma 1}/5 = (508 + j165) \text{ kVA}$. Најоптоварениот НН извод од оваа ТС презема 1/4 од оптоварувањето на трансформаторот Т5, т.е. $\underline{S}_{\Sigma \text{nn}} = (127 + j41) \text{ kVA}$ (слика 2.51.1). Може да се смета дека тоа е рамномерно распределено по неговата должина.

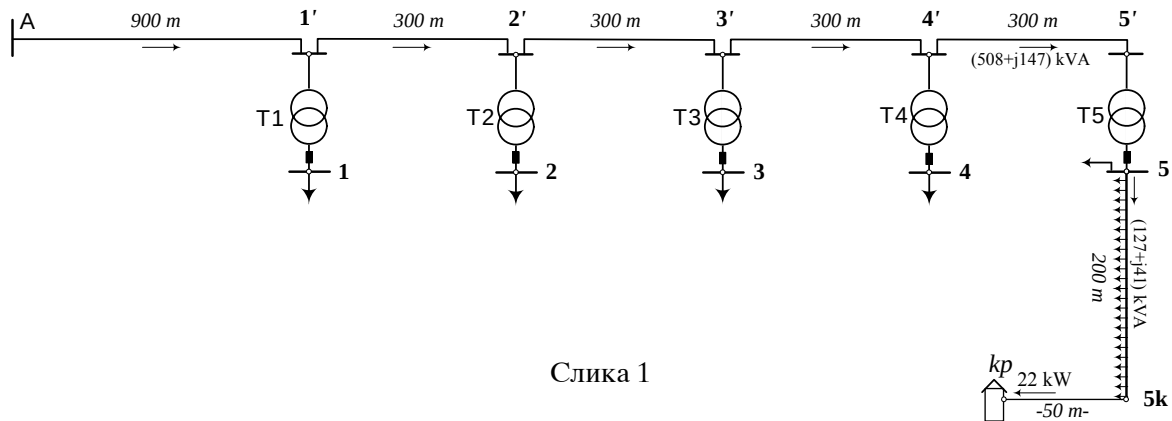
Да се пресмета вредноста на напонот на крајот од НН извод U_{5k} . Колкава е загубата на напон до крајниот потрошувач k_p на овој извод кој претставува индивидуален станбен објект со 4 домаќинства и кој во режимот на максимално оптоварување презема моќност $P_{kp} = 22 \text{ kW}$ $\cos \varphi = 0,95$. Колкави ќе бидат овие напони во режимот на минималното оптоварување ако е

познато дека напонот во напојната точка А во овој режим се одржува на вредноста $U_A = U_n = 10$ kV, а моќностите за тој режим се 3 пати помали од истите за максималниот режим.

Бројни податоци:

T5: 630 kVA; $(10+2 \times 2,5\%)/0,4$ kV/kV; $i_0\% = 1,8\%$; $u_k\% = 4\%$; $\Delta P_{Fe} = 1300$ W; $\Delta P_{Cun} = 6500$ W.

НН напоен кабел: изолација од PVC, тип PP00-A 4x150, 0,6/1 kV, $(z_{nn} = 0,2 + j0,06) \Omega/\text{km}$; $M'_{0,95-nn} = 1820,5$ kW×m/V), должина $l_{k-nn} = 200$ m. Приклучокот на последниот станбен објект е изведен со СКС кабел тип X00-A 4x16, 0,6/1 kV, долг $l_{kp} = 50$ m. $(z_{kp} = 1,875 + j0,1) \Omega/\text{km}$; $M'_{0,95-kp} = 209,7$ kW×m/V).



Слика 1

Слика 2.51.1. Приказ на СН извод и дел од НН мрежа

Решение:

Во претходната задача бр. 2.48 беше покажано дека загубата на напон во СН кабел изнесува $\Delta U = \Delta U_{A-5'} = 0,09$ kV = 0,9%. Значи напонот на крајот од СН кабел, кој е наедно и напон на примарната страна од трансформаторот Т5, изнесува:

$$U_{5'} = U_A - \Delta U_{A-5'} = 10,3 - 0,09 = 10,21 \text{ kV.}$$

Параметрите на редната гранка R_T и X_T на трансформаторот Т5 ќе бидат:

$$R_T = \Delta P_{Cun} \frac{U_n^2}{S_n^2} = 6,5 \cdot 10^{-3} \frac{10^2}{0,63^2} = 1,638 \Omega; Z_T = \frac{u_k\%}{100} \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{4}{100} \cdot \frac{10^2}{0,63} = 6,349 \Omega; X_T = 6,134 \Omega$$

Загубата на напон во трансформаторот Т5 во овој режим ќе биде:

$$\Delta U_d = \frac{P_T R_T + Q_T X_T}{U_n} = \frac{508 \cdot 1,638 + 165 \cdot 6,134}{10} = 184,4 \text{ V};$$

$$\Delta U_q = \frac{P_T X_T - Q_T R_T}{U_n} = \frac{508 \cdot 6,134 - 165 \cdot 1,638}{10} = 286,4 \text{ V};$$

$$\Delta U_T = \Delta U_d + \frac{\Delta U^2}{2U_n} = 184,4 + 4,1 = 188,5 \text{ V (1,89\%).}$$

Според тоа за напонот U_5 добиваме:

$$U_{5'} = U_{5'} - \Delta U_T = 10,21 - 0,189 = 10,021 \text{ kV}; U_5 = U_{5'} / k_T = 10,021 \cdot 0,4 / 10 = 400,8 \text{ V.}$$

Загубата на напон во НН кабел ќе биде:

$$\Delta U_{K-NN} = \frac{P_{K-NN} \cdot l_{K-NN}}{2M_{K-NN}} = \frac{127 \cdot 200}{2 \cdot 1820,5} = 7 \text{ V (1,75\%).}$$

Според тоа напонот U_{5k} на крајот од НН кабел ќе биде:

$$U_{5k} = U_5 - \Delta U_{K-NN} = 400,8 - 7 = 393,8 \text{ V}.$$

И конечно, загубата на напон ΔU_{kp} во приклучниот НН кабел ќе биде:

$$\Delta U_{kp} = \frac{P_{kp} \cdot l_{kp}}{M_{kp}} = \frac{22 \cdot 50}{210} = 5,2 \text{ V (1,31\%)} \Rightarrow U_{kp} = U_{5k} - \Delta U_{kp} = 393,8 - 5,2 = 388,6 \text{ V}.$$

Значи процентуалната загуба на напонот во мрежата од напојната точка А до крајниот потрошувач (а тоа е главната НН разводна табла од набљудуваниот станбен објект) ќе биде:

$$\Delta U\% = \Delta U_{K-SN} + \Delta U_{T5} + \Delta U_{K-NN} + \Delta U_{kp} = 0,9 + 1,89 + 1,75 + 1,31 = 5,85\%.$$

Напонски прилики во режимот на минимално оптоварување

Бидејќи моќностите во овој режим се за 3 пати помали од истите во претходниот, максимален, режим, произлегува дека загубите на напон сега ќе бидат за 3 пати помали. Значи, добиваме:

$$\Delta U_{A-5'} = \Delta U_{K-SN} = \frac{0,09}{3} = 0,03 \text{ kV}; U_{5'} = U_A - \Delta U_{K-SN} = 10,0 - 0,03 = 9,97 \text{ kV}.$$

$$\Delta U_T \approx \frac{188,5}{3} \approx 63 \text{ V} \Rightarrow U_5' = U_{5'} - \Delta U_T = 9,97 - 0,063 = 9,907 \text{ kV}; U_5 = U_5' / k_T = 396,3 \text{ V}.$$

$$\Delta U_{K-NN} = \frac{7}{3} \approx 2,3 \text{ V} \Rightarrow U_{5k} = U_5 - \Delta U_{K-NN} = 397,3 - 2,3 = 395 \text{ V}.$$

$$\Delta U_{kp} = \frac{5,24}{3} \approx 1,8 \text{ V} \Rightarrow U_{kp} = U_{5k} - \Delta U_{kp} = 394 - 1,8 = 392,2 \text{ V}.$$

Значи напонот U_{kp} кај крајниот потрошувач ќе варира во текот на денот во интервалот:

$$388,6 \text{ V} \leq U_{kp} \leq 392,2 \text{ V}.$$

И покрај тоа што вкупната загуба на напон изнесува 5,85%, сепак варијациите на напонот кај крајниот потрошувач kp се занемарливи (под 1%). Тоа се должи на фактот што регулациониот трансформатор ВН/СН, од кој што се напојува прикажаниот СН фидер, (точка А) врши "усогласена регулација" на напонот, т.е. во максималниот режим го подига напонот на собирниците А за 3% над номиналниот, додека во минималниот режим го спушта напонот на неговата номинална вредност и на тој начин во голема мера ги сузбива колебањата на напонот во сите точки од мрежата.

□ □ □

3 ДИМЕНЗИОНИРАЊЕ НА РАДИЈАЛНИТЕ МРЕЖИ

При проектирањето и димензионирањето на електричните мрежи, се води сметка за задоволувањето на извесни *технички критериуми*, кои секогаш треба безусловно да бидат исполнети.

Такви критериуми се на пример *термичкиот критериум*:

$$I < I_d,$$

и *напонскиот критериум*:

$$\Delta U < \Delta U_{doz},$$

со кои се ограничени (од горна страна) струите во било кој елемент од мрежата и загубата на напон во мрежата, што се јавуваат во режимот на максимално оптоварување.

Покрај овие два основни технички критериума, пред проектантите се поставуваат и *дојолниелни критериуми*, коишто најчесто имаат техничко-економски или пак чисто економски карактер.

Кога станува збор за димензионирање на радијални мрежи, пред проектантот обично се поставува задача за исполнување и на еден од следните три додатни критериуми:

- I *критериум на константен пресек* (којшто обезбедува наједноставна изведба и одржување на мрежата);
- II *критериум на константна густина на струја* во мрежата (којшто отприлика би обезбедил најмали загуби на моќност и енергија во мрежата);
- III *критериум на минимално количество на потрошен материјал* (кој што отприлика обезбедува најмали инвестициони вложувања во мрежата).

Кој од наведените три дополнителни критериуми ќе биде поставен при димензионирањето, во најголема мерка зависи од карактерот на потрошувачите и од типот на мрежата.

Мрежите димензионирани според критериумот на константен пресек (прв критериум) ќе бидат наједноставни за градба и за одржување.

Во мрежите, димензионирани според вториот критериум (константна густина на струјата), загубите на моќност и енергија ќе бидат најмали.

Мрежите димензионирани според третиот критериум ќе бидат најевтини.

Мрежите димензионирани според критериумот константен пресек (прв критериум), барем теоретски гледано, се најнецелесходни. Меѓутоа, ваквите мрежи се градат многу често, особено во оние случаи кога потрошувачите кои треба да бидат напојувани се густо распределени, концентрирани на релативно мал простор и се наоѓаат на мали меѓусебни растојанија (на пример градските дистрибутивни мрежи). Во тој случај е економски неоправдано, а и скоро технички неизводливо, пресекот на спроводниците (каблите) да се менува на секои неколку десетини метри, бидејќи тоа би ја зголемило цената на чинење на мрежата, би ја усложнило монтажата и изведбените работи, а подоцна и експлоатацијата на таквата мрежа. Затоа, во ваквите случаи, проблемите сврзани со изведба, монтажа и одржување на мрежата условуваат градење на мрежи со константен пресек.

Потрошувачите коишто имаат исполнет дневен дијаграм и преземаат во текот на денот и годината големо количество електрична енергија (какви што се, на пример, индустриските потрошувачи што работат во две или три смени) имаат големо употребно време, т.е. големо време на максимална моќност, T_M . Во мрежите што напојуваат такви потрошувачи загубите на електрична енергија ќе бидат големи и затоа тековните трошоци придружени кон овие загуби можат да бидат доминантен член во вкупните трошоци на работењето. Во тој случај намалувањето на загубите на електричната енергија во преносот значително ќе ги намали и вкупните трошоци за мрежата, сврзани со нејзината изградба и експлоатација. Затоа таквите мрежи ќе ги димензионираме според критериумот на константна густина на струјата.

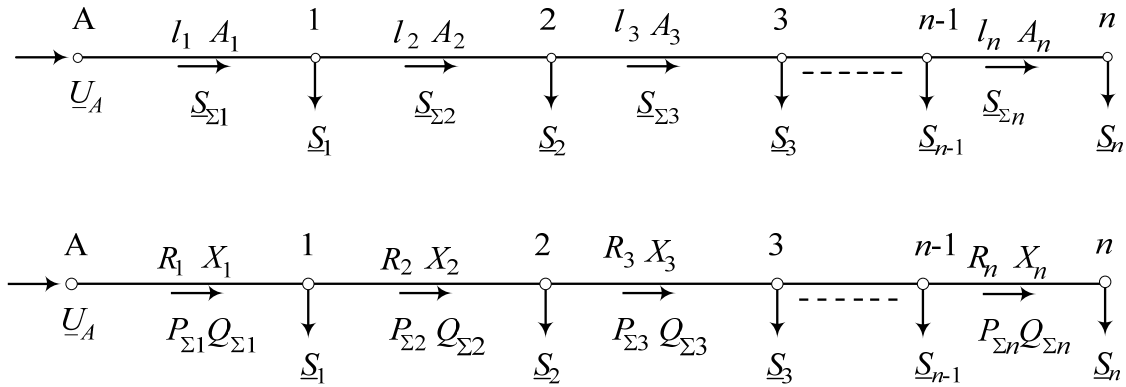
Значи во ваквите случаи одиме на соодветно зголемување на пресеците на спроводниците од водовите во мрежата, што од една страна доведува до зголемување на инвестиционите вложувања во мрежата, но од друга страна, пак, тоа доведува до намалување на

загубите на електрична енергија во мрежата, така што вкупните трошоци на мрежата (инвестициони трошоци + тековни трошоци на работењето) ќе бидат најмали.

Кога се работи за потрошувачи со мало време на максимална моќност T_M и со мала просторна густина (ретки и раштркани потрошувачи, како што е тоа карактеристично за селските и приградските среднонапонски дистрибутивни мрежи), тогаш најголем дел од трошоците, сврзани за експлоатацијата и погонот на мрежата отпаѓа на трошоците за одржување на мрежата. Ваквите мрежи се, исто така, поради нивната просторна димензија, (раштркани потрошувачи) релативно скапи. Затоа, во ваквите случаи, посматрано од економски аспект, најцелисходно е димензионирањето на мрежата по третиот критериум, што одговара на минимум на инвестиционите вложувања за градба на мрежата.

Во сите други случаи, пак, кога сме во недоумица кој од постојните критериуми за димензионирање да го примениме, ќе го избереме оној критериум којшто ветува најмали вкупни трошоци на мрежата. Овде, значи, од сите можни варијанти, кои ги задоволуваат поставените технички критериуми, ја избираме најповолната варијанта по пат на економски споредувања на вкупните трошоци на мрежата за секоја од нив.

Да ја посматраме сега прикажаната радијална мрежа. Кај оваа мрежа нека се познати оптоварувањата $\underline{S}_1, \underline{S}_2, \dots, \underline{S}_n$ на одделните потрошувачи и должините $l_1, l_2, \dots, l_n$ а потребно е да се одредат пресеците на одделните делници од мрежата $A_1, A_2, \dots, A_n$.



Слика 3.1. Магистрален вод оптоварен со n потрошувачи

Ако со $\underline{S}_{\Sigma i} = (P_{\Sigma i} + jQ_{\Sigma i})$ ја означиме моќноста што тече низ i -тата делница од мрежата, тогаш приближно ќе имаме:

$$\underline{S}_{\Sigma i} = \sum_{j=i}^n \underline{S}_j = \underline{S}_i + \underline{S}_{i+1} + \dots + \underline{S}_n \quad (3.1)$$

а загубата на напон ΔU во мрежата (приближно) ќе изнесува:

$$\Delta U = \sum_{i=1}^n \frac{P_{\Sigma i} \cdot R_i + Q_{\Sigma i} \cdot X_i}{U_n} = \sum_{i=1}^n \frac{P_{\Sigma i} \cdot R_i}{U_n} + \sum_{i=1}^n \frac{Q_{\Sigma i} \cdot X_i}{U_n} = \Delta U_a + \Delta U_r. \quad (3.2)$$

каде што:

$$\Delta U_a = \sum_{i=1}^n \frac{P_{\Sigma i} \cdot R_i}{U_n} \quad \text{и} \quad \Delta U_r = \sum_{i=1}^n \frac{Q_{\Sigma i} \cdot X_i}{U_n}$$

Реактанцијата по единица должина на водовите x , како што е познато, слабо зависи од пресекот на спроводниците. За надземните водови таа се движи обично во границите:

$$x = 0,33 - 0,42 \text{ } \Omega/\text{km},$$

додека за енергетските кабли таа најчесто се движи во интервалот:

$$x = 0,07 - 0,12 \text{ } \Omega/\text{km}.$$

Просечните вредности на подолжната реактанција на водовите, зависно од нивниот номинален напон, се дадени во наредната табела.

Табела 3.1. Просечни вредности на единечните реактанции кај надземните водови

Номинален напон U_n , kV	Реактанција x , Ω/km за надземните водови	Реактанција x , Ω/km за кабелските водови
до 1 kV	0,33	0,07
10	0,34	0,08
20	0,35	0,10
35	0,38	0,12
110	0,40	/

Имајќи го предвид фактот дека подолжната реактанција x малку зависи од пресекот на спроводниците и дека нејзината вредност со доволна точност можеме однапред да ја предвидиме (на пример со помош на приложената табела), за компонентата ΔU_r од загубата на напон, која се должи на течењето на реактивните моќности во мрежата, можеме приближно да ја напишеме:

$$\Delta U_r = \sum_{i=1}^n \frac{Q_{\Sigma i} \cdot X_i}{U_n} \approx x \cdot \sum_{i=1}^n \frac{Q_{\Sigma i} \cdot l_i}{U_n} \quad (3.3)$$

и на тој начин да ја одредиме нејзината приближна вредност.

За да биде задоволен напонскиот критериум:

$$\Delta U = \Delta U_a + \Delta U_r \leq \Delta U_{doz} \quad (3.4)$$

мора да биде:

$$\Delta U_a \leq (U_{doz} - \Delta U_r) = \Delta U_{a, doz} \quad (3.5)$$

За таа цел, пресекот A_j ($j = 1, 2, \dots, n$) на j -тата делница од мрежата, изразен во mm^2 , зависно од усвоениот критериум за димензионирање, го пресметуваме со помош на една од следните формули:

I. Според првиот критериум:

$$A_j = A \geq \frac{1000 \cdot \sum_{i=1}^n P_{\Sigma i} \cdot l_i}{\kappa \cdot U_n \cdot \Delta U_{a, doz}} = \text{const.}; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.6)$$

II. Според вториот критериум:

$$A_j \geq \frac{I_{\Sigma j}}{J_{const}} = \frac{I_{\Sigma j}}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot J_{const}}; \quad j=1, 2, \dots, n. \quad (3.7)$$

каде што е:

$$J_{const} = \frac{\kappa \cdot \Delta U_{a, doz}}{\sqrt{3} \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot \cos \varphi_{\Sigma i}} = \frac{\kappa \cdot (\Delta U_{doz} - \Delta U_r)}{\sqrt{3} \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot \cos \varphi_{\Sigma i}} \quad (3.7 \text{ a})$$

III. Според третиот критериум:

$$A_j \geq \frac{1000 \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot \sqrt{P_{\Sigma i}}}{\kappa \cdot U_n \cdot \Delta U_{a, doz}} \cdot \sqrt{P_{\Sigma j}} = k_P \cdot \sqrt{P_{\Sigma j}}; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.8)$$

каде што е:

$$k_P = \frac{1000 \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot \sqrt{P_{\Sigma i}}}{\kappa \cdot U_n \cdot \Delta U_{a, doz}} = \frac{1000 \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot \sqrt{P_{\Sigma i}}}{\kappa \cdot U_n \cdot (\Delta U_{doz} - \Delta U_r)} \quad (3.8a)$$

Во формулите (3.6) ÷ (3.8 a) со κ е означена специфичната спроводност на материјалот ($\kappa_{Al} = 32 \text{ S} \cdot \text{m}/\text{mm}^2$ и $\kappa_{Cu} = 54 \text{ S} \cdot \text{m}/\text{mm}^2$) од којшто се направени спроводниците од мрежата.

Од погоре изложеното произлегува дека од изборот на пресекот на одделните делници од мрежата зависат вкупните трошоци за изградбата и експлоатацијата на самата мрежа. Зголемувањето на пресеците ќе значи зголемување на трошоците за инвестиции и зголемување на делот од погонските трошоци за одржување и амортизација на мрежата, но во исто време ќе значи и намалување на трошоците за загуби на моќност и енергија – и обратно. Значи за секоја делница од мрежата постои пресек за којшто вкупните трошоци за мрежата ќе бидат најмали. Тој пресек се нарекува *економски пресек* на спроводниците A_{ek} . Густината на струјата што му соодветствува на економскиот пресек се нарекува *економска густина на струјата* j_{ek} . Овие две величини зависат на сложен начин од цените на материјалите, цената на капиталот, цената на електричната енергија, од големината на употребното време T_M и др. За тоа станува збор подетално во седмата глава од учебникот [1]. Овде само ќе бидат изложени вредностите на економските густини на струјата за надземните водови и за енергетските кабли со различни карактеристики, во зависност од големината на употребното време на дијаграмот на оптоварување T_M на самите водови (табела 3.2).

Иако цените на наведените категории трошоци се разликуваат од една до друга земја, нивните односи се насекаде блиски по својата големина. Поради тоа вредностите на економската густина на струјата од земја до земја малку се разликуваат. Во табелата 3.2 се прикажани економските густини на струјата за разните видови надземни водови и кабли коишто се применувале во бившиот Советски Сојуз, преземни од [18]. Може слободно да се каже дека вредностите изложени во табелата 3.2 ќе важат и за наши услови и можат да користат при димензионирањето на пресеците на водовите и во нашите мрежи.

Табела 3.2. Економски густини на струјата за надземните водови и енергетските кабли

С про вод н и к , ка б е л	Економска густина на струјата j_{ek} (A/mm ²) во зависност од времето на максимална моќност на товарот T_M (h/год.)		
	$1000 < T_M \leq 3000$	$3000 < T_M < 5000$	$T_M > 5000$
<i>Голи спроводници и собирници</i>			
– од бакар	2,5	2,1	1,8
– од алуминиум или Al и Al/Fe-јажиња	1,3	1,1	1,0
<i>Кабли со изолација од PVC и од импрегнирана хартија (IP, NP)</i>			
– спроводници од бакар	3,0	2,5	2,0
– спроводници од алуминиум	1,6	1,4	1,2
<i>Кабли со изолација од гума, полиетилен (PE) и вмрежен полиетилен (XLPE).</i>			
– спроводници од бакар	3,5	3,1	2,7
– спроводници од алуминиум	1,9	1,7	1,6

Ако со I_M ја означиме максималната вредност на струјата во некоја делница од мрежата, т.е. вредноста на струјата што се постигнува во режимот на максимално оптоварување, тогаш економскиот пресек за таа делница A_{ek} ќе биде:

$$A_{ek} = \frac{I_M}{j_{ek}} \quad (3.9)$$

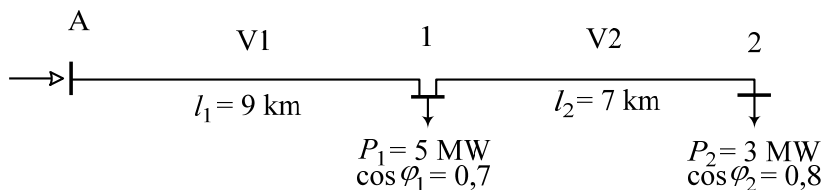
Ако сите делници од мрежата ги димензионираме во согласност со релацијата (3.9) тогаш може да се очекува дека вкупните трошоци за мрежата ќе бидат најмали. Затоа, во принцип, по извршеното димензионирање на мрежата според некој од претходно изложените три критериуми, се врши проверка на условот за економичност (3.9). Од овој принцип може и да се отстапи. Тоа се прави обично: при димензионирањето на НН индустриски мрежи за кои е $T_M < 4000$ h, при димензионирањето на отцепите во НН мрежи од јавната електрификација, при димензионирањето на собирниците во електраните, трансформаторските станици и др.

Задача 3.1: Да се определат пресеците A_1 и A_2 на водовите V1 и V2 од прикажаната 35 kV мрежа, според критериумот:

- а) на константна густина на струјата,
- б) на минимална потрошувачка на материјал,

ако дозволената загуба на напон во мрежата изнесува $\Delta U_{doz} = 5\%$.

Водовите да бидат изведени со Al/Č јажиња, поставени на челично-решетки столбови, за кои средногеометриското растојание изнесува $D_m = 3,0$ m.



Решение:

Моќностите $\underline{S}_1$ и $\underline{S}_2$ на поедините потрошувачи во мрежата изнесуваат:

$$P_1 = 5 \text{ MW}; \quad Q_1 = P_1 \cdot \tan \varphi_1 = 5 \cdot 1,02 = 5,1 \text{ Mvar}; \quad \underline{S}_1 = (5 + j5,1) \text{ MVA},$$

$$P_2 = 3 \text{ MW}; \quad Q_2 = P_2 \cdot \tan \varphi_2 = 3 \cdot 0,75 = 2,25 \text{ Mvar};$$

$$\underline{S}_2 = (3 + j2,25) \text{ MVA}$$

Моќностите што течат низ поедините водови се:

$$\underline{S}_{\Sigma 2} = \underline{S}_2 = (3 + j2,25) \text{ MVA} = 3,75 / 36,87^\circ \text{ MVA}$$

$$\underline{S}_{\Sigma 1} = \underline{S}_1 + \underline{S}_2 = (8 + j7,35) \text{ MVA} = 10,864 / 42,57^\circ \text{ MVA}$$

Дозволената загуба на напон ΔU_{doz} изразена во киловолти (kV) ќе биде:

$$\Delta U_{doz} = \Delta U_{doz} \% \cdot U_n / 100 = 5 \cdot 35 / 100 = 1,75 \text{ kV}.$$

Ако за подолжната реактанција x , приближно и за двата вода, усвоиме вредност $x = 0,4 \Omega/\text{km}$, тогаш за компонентата ΔU_r од загубата на напон ќе добиеме:

$$\Delta U_r = x \cdot \sum_{k=1}^n \frac{Q_{\Sigma k} \cdot l_k}{U_n} = x \cdot \frac{Q_{\Sigma 1} \cdot l_1 + Q_{\Sigma 2} \cdot l_2}{U_n};$$

$$\Delta U_r = 0,4 \frac{7,35 \cdot 9 + 2,25 \cdot 7}{35} = 0,936 \text{ kV}.$$

Следува: $\Delta U_{a, doz} = \Delta U_{doz} - \Delta U_r = 1,75 - 0,936 = 0,814 \text{ kV}.$

а) *Димензионирање според критериумот на константна густина на струјата*

Вредноста на густината на струјата J за која ќе биде исполнето $\Delta U = \Delta U_{doz}$ изнесува:

$$J = \frac{\kappa \cdot \Delta U_{a, doz}}{\sqrt{3} \cdot \sum_{i=1}^2 l_i \cdot \cos \varphi_{\Sigma i}}; \quad \Rightarrow \quad J = \frac{32 \cdot 0,814}{\sqrt{3} \cdot (9 \cdot \cos 42,57^\circ + 7 \cdot \cos 36,87^\circ)} = 1,23 \text{ A/mm}^2.$$

Добиената вредност на густината на струјата е поголема од економската густина на струјата J_{ek} која, во наши услови, за надземните водови се движи негде околу 1 A/mm^2 . Ако ја усвоиме вредноста $J_{ek} = 1 \text{ A/mm}^2$, тогаш за поедините пресеци би добиле:

$$A_1 = \frac{I_{\Sigma 1}}{J_e} = \frac{S_{\Sigma 1}}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot J_e} = \frac{10,864 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 35 \cdot 1} = 179 \text{ mm}^2 \quad \text{и} \quad A_2 = \frac{I_{\Sigma 2}}{J_e} = \frac{S_{\Sigma 2}}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot J_e} = \frac{3,75 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 35 \cdot 1} = 76 \text{ mm}^2.$$

Стандардните пресеци за Al/Č јажиња и нивните карактеристики, за разни вредности на меѓусебното растојание D_m се дадени во долната табела.

Табела 3.1.1: Карактеристики на Al/Č јажиња со разни номинални пресеци

A_n , mm ²	25/4	35/6	50/8	70/12	95/15	120/20	150/25	185/30	210/35	240/40
S_{Al} , mm ²	23,8	34,3	48,3	69,9	94,4	121,6	148,9	183,8	209,1	243,0
$d_p = 2r_p$, mm	6,8	8,1	9,6	11,7	13,6	15,5	17,1	19,0	20,3	21,9
I_d , A	125	145	170	235	290	345	400	455	490	530
r_{20} , Ω/km	1,203	0,835	0,595	0,413	0,306	0,237	0,194	0,157	0,138	0,119
$x_{Dm=1m}$, Ω/km	0,359	0,348	0,338	0,326	0,316	0,308				
$x_{Dm=2m}$, Ω/km	0,403	0,392	0,382	0,370	0,360	0,352				
$x_{Dm=3m}$, Ω/km	/	0,428	0,417	0,405	0,395	0,387	0,381	0,374	0,376	
$x_{Dm=4m}$, Ω/km	/	/	0,425	0,413	0,403	0,395	0,389	0,382	0,378	0,373
$x_{Dm=5m}$, Ω/km	/	/	/	0,427	0,417	0,409	0,403	0,396	0,392	0,387

Согласно со табелата, за втората делница ќе го усвоиме најблискиот стандарден пресек Al/Č 70/12 mm². За првата делница ќе треба, значи, да се одлучиме или за пресекот Al/Č 185/30 mm² или за наредниот поголем Al/Č 210/35 mm². Меѓутоа, во пракса 35 kV водови не се прават со толку големи пресеци и од економски и од технички причини. Во тој случај се оди на изградба или на два паралелни вода со исти пресеци, или пак се гради еден двосистемски (двоен) 35 kV далекувод, што е значително поефтино. (На пример, еден двосистемски далекувод е за 60% до 70% поскап од едносистемскиот далекувод со исти спроводници и ист номинален напон).

Јасно е дека двосистемскиот далекувод е поекономична варијанта и со оглед на тоа, за првата делница од мрежата ќе усвоиме спроводници 3×2Al/Č 95/15 mm². Во овој случај вистинскиот пресек на првата делница ќе биде $A_1 = 2 \times 94,4 = 188,8$ mm².

Според тоа, густината на струјата во првата делница ќе биде:

$$J_1 = \frac{I_{\Sigma 1}}{A_1} = \frac{S_{\Sigma 1}}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot A_1} = \frac{10,864 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 35 \cdot 188,8} = 0,95 \text{ A/mm}^2;$$

$$J_2 = \frac{I_{\Sigma 2}}{A_2} = \frac{S_{\Sigma 2}}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot A_2} = \frac{3,75 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 35 \cdot 69,9} = 0,89 \text{ A/mm}^2.$$

Со оглед на тоа што густината на струјата за која загубата на напон $\Delta U = \Delta U_{doz}$, изнесува 1,23 A/mm² и таа е многу поголема од вредностите J_1 и J_2 , се разбира дека нема да има потреба од проверка на усвоените пресеци според загуба на напон во мрежата.

б) *Димензионирање според критериумот на минимална потрошувачка на материјал*

Според овој критериум ќе имаме:

$$k_p = \frac{1000 \cdot \sum_{i=1}^2 l_i \cdot \sqrt{P_{\Sigma i}}}{\kappa \cdot U_n \cdot \Delta U_{a, doz}} = \frac{1000 \cdot (9 \cdot \sqrt{8} + 7 \cdot \sqrt{3})}{32 \cdot 35 \cdot 0,814} = 41,22$$

Понатаму се определуваат пресеките A_1 и A_2 на обете секции:

$$A_1 = k_p \cdot \sqrt{P_{\Sigma 1}} = 41,22 \cdot \sqrt{8} = 116,6 \text{ mm}^2; \quad A_2 = k_p \cdot \sqrt{P_{\Sigma 2}} = 41,22 \cdot \sqrt{3} = 71,4 \text{ mm}^2.$$

Во овој случај ги усвојуваме следните стандардни пресеци:

V1: Al/Č 120/20 mm² ($A_1 = 121,6$ mm²; $z_1 = (0,257 + j0,387)$ Ω/km;

V2: Al/Č 70/12 mm² ($A_2 = 69,9$ mm²; $z_2 = (0,447 + j0,405)$ Ω/km).

За усвоените пресеци вршме проверка на загубата на напон во мрежата:

$$\Delta U_{A-1} = \frac{P_{\Sigma 1} \cdot r_1 + Q_{\Sigma 1} \cdot x_1}{U_n} \cdot l_1 = \frac{8 \cdot 0,257 + 7,35 \cdot 0,387}{35} \cdot 9 = 1,26 \text{ kV};$$

$$\Delta U_{1-2} = \frac{P_{\Sigma 2} \cdot r_2 + Q_{\Sigma 2} \cdot x_2}{U_n} \cdot l_2 = \frac{3 \cdot 0,447 + 2,25 \cdot 0,405}{35} \cdot 7 = 0,45 \text{ kV}.$$

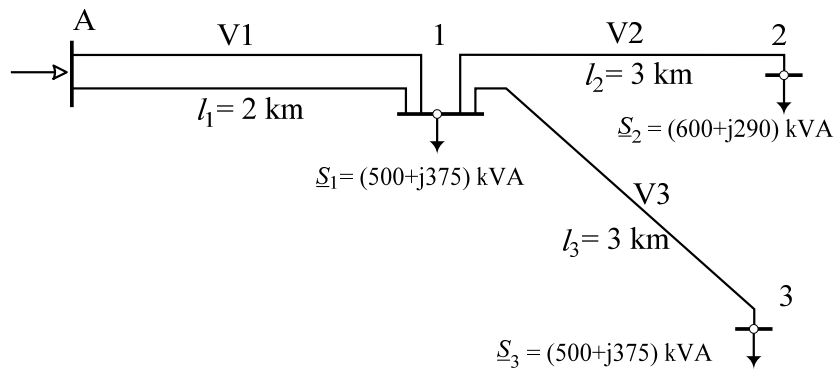
$$\Delta U = \Delta U_{A-1} + \Delta U_{1-2} = 1,26 + 0,45 = 1,71 \text{ kV} < 1,75 \text{ kV}.$$

Значи, усвоените пресеци задоволуваат во поглед на загубата на напон во мрежата.

□ □ □

Задача 3.2: На сликата е прикажана шемата на идна 10 kV надземна мрежа. Спроводниците од водовите треба да бидат Al/Č јажиња распоредени во темињата на триаголник со средногеометриско растојание $D_m = 1 \text{ m}$. Потребно е да се изберат пресеците на одделните водови според критериумот на:

- константна густина на струјата, водејќи притоа сметка дека економската густина на струјата е $j_{ek} = 1 \text{ A/mm}^2$,
- константен пресек на магистралниот дел A-1-2, ако дозволената загуба на напон во мрежата изнесува $\Delta U_d = 6\%$.



Решение:

Моќностите во поедините делници од мрежата ќе бидат:

$$\underline{S}_{\Sigma 2} = \underline{S}_2 = (600 + j290) \text{ kVA} = 666,4 \angle 25,8^\circ \text{ kVA};$$

$$I_{\Sigma 2} = S_{\Sigma 2} / \sqrt{3} \cdot U_n = 38,5 \text{ A}.$$

$$\underline{S}_{\Sigma 3} = \underline{S}_3 = (500 + j375) \text{ kVA} = 625,4 \angle 36,9^\circ \text{ kVA};$$

$$I_{\Sigma 3} = S_{\Sigma 3} / \sqrt{3} \cdot U_n = 36,1 \text{ A}.$$

$$\underline{S}_{\Sigma 1} = \underline{S}_1 + \underline{S}_2 + \underline{S}_3 = (1600 + j1040) \text{ kVA} = 1908 \angle 33^\circ \text{ kVA};$$

$$I_{\Sigma 1} = S_{\Sigma 1} / \sqrt{3} \cdot U_n = 110,2 \text{ A}.$$

Низ секој од водовите V1 ќе тече по половина од моќноста $\underline{S}_{\Sigma 1}$, односно струјата низ секој од нив ќе изнесува:

$$I_1 = 1/2 \cdot I_{\Sigma 1} = 55,1 \text{ A}.$$

а) Избор на пресеци според економската густина на струјајата

Економските пресеци на поедините водови ќе бидат:

$$A_1 = 0,5 \cdot I_{\Sigma 1} / j_{ek} = 55,1/1 = 55,1 \text{ mm}^2;$$

$$A_2 = I_2 / j_{ek} = 38,5/1 = 38,5 \text{ mm}^2;$$

$$A_3 = I_3 / j_{ek} = 36,1/1 = 36,1 \text{ mm}^2$$

Според тоа, заокружувајќи на најблиските стандардни пресеци, за поедините водови ги усвојуваме следните типови спроводници:

$$V1: \quad \text{Al/}\check{\text{C}} \text{ 50/8 mm}^2 \quad A_1 = 48,3 \text{ mm}^2; \quad \underline{z}_1 = (0,595 + j0,338) \Omega/\text{km};$$

$$V2: \quad \text{Al/}\check{\text{C}} \text{ 35/6 mm}^2 \quad A_2 = 34,3 \text{ mm}^2; \quad \underline{z}_2 = (0,835 + j0,348) \Omega/\text{km};$$

$$V3: \quad \text{Al/}\check{\text{C}} \text{ 35/6 mm}^2 \quad A_3 = 34,3 \text{ mm}^2; \quad \underline{z}_3 = (0,835 + j0,348) \Omega/\text{km};$$

Податоците за подолжните параметри r и x на водовите V1, V2 и V3 се отчитани од табелата Т.3.1.1, прикажана во претходната задача.

Бидејќи е $\Delta U_{1-2} > \Delta U_{1-3}$ очигледно е дека најголемата загуба на напон ќе се има во точката "2".

Густината на струјата J за која загубата на напон на потегот А-1-2 е точно еднаква на дозволената загуба на напон ќе ја пресметаме на следниот начин:

$$\Delta U_r = \frac{0,5 \cdot Q_{\Sigma 1} \cdot x_1 \cdot l_1}{U_n} + \frac{Q_{\Sigma 2} \cdot x_2 \cdot l_2}{U_n};$$

$$\Delta U_r = \frac{0,520 \cdot 0,338 \cdot 2}{10} + \frac{0,290 \cdot 0,348 \cdot 3}{10} = 0,065 \text{ kV}.$$

$$\Delta U_{a, doz} = \Delta U_{doz} - \Delta U_r = 0,6 - 0,065 = 0,535 \text{ kV},$$

$$\sum_{i=1}^2 l_i \cdot \cos \varphi_{\Sigma i} = 2 \cdot \cos 33^\circ + 3 \cdot \cos 25,8^\circ = 4,378 \text{ km};$$

$$J = \frac{\kappa \cdot \Delta U_{a, doz}}{\sqrt{3} \cdot \sum_{i=1}^2 l_i \cdot \cos \varphi_{\Sigma i}} = \frac{32 \cdot (0,535)}{\sqrt{3} \cdot 4,378} = 2,26 \text{ A/mm}^2.$$

Бидејќи граничната густина на струјата J (во поглед на загубата на напон ΔU) е значително поголема од економската густина на струјата, а економската густина на струјата е секогаш помала од термичката дозволена густина, произлегува дека за избраните пресеци не ќе треба да се врши контрола на загубата на напон во мрежата.

б) Избор на пресеци според критериумот на константен пресек на магистралниот дел А-1-2

За изборот на пресеките според овој критериум имаме:

$$A_1 = A_2 = A.$$

Подолжната индуктивност x на водовите ја проценуваме на вредност $x = 0,35 \Omega/\text{km}$. Според тоа ќе имаме:

$$\Delta U_r = \frac{0,5 \cdot Q_{\Sigma 1} \cdot x_1 \cdot l_1}{U_n} + \frac{Q_{\Sigma 2} \cdot x_2 \cdot l_2}{U_n} = \frac{0,520 \cdot 0,35 \cdot 2}{10} + \frac{0,290 \cdot 0,35 \cdot 3}{10} = 0,067 \text{ kV}.$$

$$\Delta U_{a, doz} = \Delta U_{doz} - \Delta U_r = 0,6 - 0,067 = 0,533 \text{ kV},$$

$$\sum_{i=1}^2 P_{\Sigma i} \cdot l_i = 0,800 \cdot 2 + 0,600 \cdot 3 = 3,4 \text{ MW} \cdot \text{km}$$

$$A_1 = A_2 = A = \frac{1000 \cdot \sum_{i=1}^n P_{\Sigma i} \cdot l_i}{\kappa \cdot U_n \cdot \Delta U_{a, doz}} = \frac{1000 \cdot 3,4}{32 \cdot 10 \cdot 0,537} = 19,9 \text{ mm}^2.$$

Првиот поголем стандарден пресек е Al/Č 25/4 mm². Според тоа усвојуваме:

V1: Al/Č 25/4 mm² A₁ = 23,8 mm²; z₁ = (1,313 + j0,359) Ω/km;

V2: Al/Č 25/4 mm² A₂ = 23,8 mm²; z₂ = (1,313 + j0,359) Ω/km.

За усвоените пресеци вршме контрола на загуба на напон во мрежата:

$$\Delta U_{A-1} = \frac{P_{\Sigma 1} \cdot r_1 + Q_{\Sigma 1} \cdot x_1}{U_n} \cdot l_1;$$

$$\Delta U_{A-1} = \frac{0,800 \cdot 1,313 + 0,520 \cdot 0,359}{10} \cdot 2 = 0,247 \text{ kV}$$

$$\Delta U_{1-2} = \frac{P_{\Sigma 2} \cdot r_2 + Q_{\Sigma 2} \cdot x_2}{U_n} \cdot l_2;$$

$$\Delta U_{1-2} = \frac{0,600 \cdot 1,313 + 0,290 \cdot 0,359}{10} \cdot 3 = 0,267 \text{ kV}.$$

$$\Delta U_{A-2} = \Delta U_{A-1} + \Delta U_{1-2} = 0,247 + 0,267 = 0,514 \text{ kV} < 0,6 \text{ kV}.$$

Значи, усвоените проводници Al/Č 25/4 mm² за магистралниот дел A-1-2, задоволуваат во поглед на загубата на напон.

Сега ни останува уште да избереме пресек и за водот V3. Него ќе го одредиме тргнувајќи од условот загубата на напон да биде $\Delta U_{A-3} < \Delta U_{doz} = 6\%$. Според тоа, загубата на напон во водот V3 не смее да ја надминува вредноста:

$$\Delta U_{1-3, doz} \leq \Delta U_{doz} - \Delta U_{A-1} = 0,6 - 0,247 = 0,353 \text{ kV}.$$

Ако за реактанцијата x (којашто засега не ни е позната) усвоиме вредност $x = 0,35 \text{ } \Omega/\text{km}$, тогаш компонентата $\Delta U_{1-3, r}$, предизвикана од течењето на реактивната моќност во водот V3 (помеѓу јазлите 2 и 3), ќе биде:

$$\Delta U_{1-3, r} = \frac{Q_{\Sigma 3} \cdot x \cdot l_3}{U_n} = \frac{0,375 \cdot 0,35 \cdot 3}{10} = 0,04 \text{ kV}$$

и следователно:

$$A_3 = \frac{1000 \cdot P_{\Sigma 3} \cdot l_3}{\kappa \cdot U_n \cdot (\Delta U_{1-3, doz} - \Delta U_{1-3, r})} = \frac{1000 \cdot 0,500 \cdot 3}{32 \cdot 10 \cdot 0,313} = 14,9 \text{ mm}^2$$

За водот V3 усвојуваме стандарден пресек Al/Č 16/2,5 mm². понатаму имаме:

V3: Al/Č 16/2,5 mm²; A₃ = 15,3 mm²; d_p = 2r_p = 5,4 mm; z₃ = (2,042 Ω/km + j0,384) Ω/km.

Следува контрола на загубата на напон на релацијата 1-3:

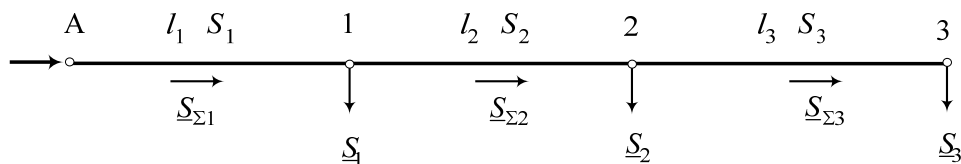
$$\Delta U_{1-3} = \frac{P_{\Sigma 3} \cdot r_3 + Q_{\Sigma 3} \cdot x_3}{U_n} \cdot l_3; \quad \Delta U_{1-3} = \frac{0,500 \cdot 2,042 + 0,375 \cdot 0,384}{10} \cdot 3 = 0,350 \text{ kV} < 0,353 \text{ kV}.$$

□ □ □

Задача 3.3[▼]: Прикажаната 10 kV мрежа да се димензионира според критериумот на константна густина на струјата. Дозволената загуба на напон во мрежата изнесува $\Delta U_{doz} = 6\%$. Спроводниците на водовите се Al/Č јажиња со средногеометриско растојание $D_m = 1\text{ m}$.

Осџананџи џодаџиоџи: l₁ = 3 km; l₂ = 2 km; l₃ = 1 km;

S₁ = (800+j600) kVA; S₂ = (450+j220) kVA; S₃ = (320 + j240) kVA



Слика 3.3.1. Димензионирање на 10 kV мрежа според критериумот $J = \text{const.}$

Решение:

Густијата на струјата $J_{\text{const}} = J$ за која се постига условот $\Delta U = \Delta U_{\text{doz}}$ ќе биде:

$$J = 1,65 \text{ A/mm}^2.$$

Оттука произлегува дека пресеците на поедините водови, во согласност со релацијата (3.7), ќе бидат:

$$A_1 = I_{\Sigma 1} / J = S_{\Sigma 1} / (\sqrt{3} \cdot U_n \cdot J) = 1900 / (\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 1,65) = 66,48 \text{ mm}^2,$$

$$A_2 = I_{\Sigma 2} / J = S_{\Sigma 2} / (\sqrt{3} \cdot U_n \cdot J) = 900 / (\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 1,65) = 31,5 \text{ mm}^2,$$

$$A_3 = I_{\Sigma 3} / J = S_{\Sigma 3} / (\sqrt{3} \cdot U_n \cdot J) = 400 / (\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 1,65) = 14,0 \text{ mm}^2.$$

За спроводниците од поедините делници ќе ги усвоиме следните стандардни пресеци:

$$V1: \text{ Al/}\checkmark\text{ 70/12 mm}^2; A_1 = 66,2 \text{ mm}^2; z_1 = (0,472 + j0,336) \Omega/\text{km};$$

$$V2: \text{ Al/}\checkmark\text{ 35/6 mm}^2; A_2 = 34,3 \text{ mm}^2; z_2 = (0,911 + j0,359) \Omega/\text{km};$$

$$V3: \text{ Al/}\checkmark\text{ 16/2,5 mm}^2; A_3 = 66,2 \text{ mm}^2; z_3 = (2,042 + j0,374) \Omega/\text{km}.$$

Контролата на загубата на напон во мрежата дава:

$$\Delta U = 0,576 \text{ kV} < \Delta U_{\text{doz}} = 0,6 \text{ kV}.$$

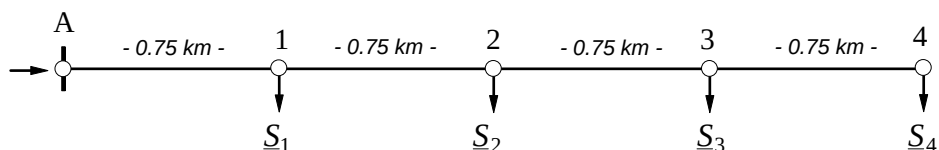
□ □ □

Задача 3.4*. На сликата 3.4.1 е прикажана 10 kV кабелски извод, кој треба да биде изведен со кабли од типот ХНР 48 А, 10 kV со спроводници од алуминиум ($\kappa = 32 \text{ Smm}^2/\text{km}$). Податоците за подолжните параметри r и x како и податоците за трајно дозволените струи I_d на овие кабли, во зависност од нивниот пресек A , се дадени во табелата 3.4.1. Да се изврши димензионирање на изводот според критериумите на: а) *константен пресек* и б) *константна густина на ситрујања*. Да се користат само пресеците што се дадени во табелата 3.4.1. Дозволената загуба на напон изнесува $\Delta U_{\text{doz}} = 3\%$.

Сите секции од мрежата (изводот) имаат иста должина $l = 0,75 \text{ km}$. Сите потрошувачи од мрежата имаат иста моќност: $\underline{S}_1 = \underline{S}_2 = \underline{S}_3 = \underline{S}_4 = \underline{S} = (600 + j250) \text{ kVA}$.

Табела 3.4.1. Податоци за подолжните параметри на предвидените кабелски водови.

$A, (\text{mm}^2)$	16	25	35	50	70	95	120	150
$r, (\Omega/\text{km})$	2,003	1,282	0,866	0,641	0,443	0,320	0,253	0,206
$x, (\Omega/\text{km})$	0,136	0,131	0,126	0,121	0,116	0,112	0,108	0,105
$I_d, (\text{A})$	85	130	155	180	225	270	305	340



Слика 3.4.1. Кабелски извод што треба да се димензионира

Решение:

Распределбата (приближна) на моќности во мрежата ќе биде:

$$S_{\Sigma 1} = 4 \cdot \underline{S} = (2,4 + j1,0) \text{ MVA} = 2,6 \angle 22,62^\circ \text{ MVA}; I_{\Sigma 1} = S_{\Sigma 1} / (\sqrt{3} \cdot U_n) = 150 \text{ A.}$$

$$S_{\Sigma 2} = 3 \cdot \underline{S} = (1,8 + j0,75) \text{ MVA} = 1,95 \angle 22,62^\circ \text{ MVA}; I_{\Sigma 2} = S_{\Sigma 2} / (\sqrt{3} \cdot U_n) = 112,5 \text{ A.}$$

$$S_{\Sigma 3} = 2 \cdot \underline{S} = (1,2 + j0,5) \text{ MVA} = 1,3 \angle 22,62^\circ \text{ MVA}; I_{\Sigma 3} = S_{\Sigma 3} / (\sqrt{3} \cdot U_n) = 75 \text{ A.}$$

$$S_{\Sigma 4} = \underline{S} = (0,6 + j0,25) \text{ MVA} = 0,65 \angle 22,62^\circ \text{ MVA}; I_{\Sigma 4} = S_{\Sigma 4} / (\sqrt{3} \cdot U_n) = 37,5 \text{ A.}$$

Дозволената загуба на напон во мрежата изнесува $\Delta U_{doz} = (3/100) \cdot U_n = 0,3 \text{ kV}$. Од табелата 3.4.1 гледаме дека реактанциите на каблите по единица должина се движат во границите $0,105 \leq x \leq 0,136 \text{ } \Omega/\text{km}$. Со оглед на тоа ќе усвоиме $x = 0,12 \text{ } \Omega/\text{km}$. Во тој случај вкупната загуба на напон ΔU_r што се должи на течењето на реактивните моќности во мрежата ќе биде:

$$\Delta U_r = \frac{x}{U_n} \cdot \sum_{i=1}^n Q_{\Sigma i} \cdot l_i = \frac{0,12}{10} \cdot (1,0 \cdot 0,75 + 0,75 \cdot 0,75 + 0,5 \cdot 0,75 + 0,25 \cdot 0,75) = 0,0225 \text{ kV.}$$

Дозволената загуба на напон поради течењето на активните моќности тогаш ќе биде:

$$\Delta U_{a, doz} = \Delta U_{doz} - \Delta U_r = 0,3 - 0,0225 = 0,2775 \text{ kV.}$$

а) Критериум на константен пресек

Потребниот пресек A на поедините делници од мрежата ќе биде:

$$A \geq \frac{\sum_{i=1}^4 P_{\Sigma i} \cdot l_i}{\sigma \cdot U_n \cdot \Delta U_{a, doz}} = \frac{(2,4 + 1,8 + 1,2 + 0,6) \cdot 0,75 \cdot 10^9}{32 \cdot 10 \cdot 0,2775 \cdot 10^6} = 50,7 \text{ mm}^2.$$

Усвојуваме $A = 50 \text{ mm}^2$. Подолжните параметри за овој пресек се: $\underline{z} = (r + jx) = (0,641 + j0,121) \text{ } \Omega/\text{km}$.

Пресметка на загубата на напон во водот и проверка на условот $\Delta U < \Delta U_{doz}$.

$$\Delta U = r \cdot \frac{\sum_{i=1}^4 P_{\Sigma i} \cdot l_i}{U_n} + x \cdot \frac{\sum_{i=1}^4 Q_{\Sigma i} \cdot l_i}{U_n} = 0,641 \cdot \frac{4,5}{10} + 0,121 \cdot \frac{1,875}{10} = 0,311 \text{ kV.}$$

Бидејќи е $\Delta U > \Delta U_{doz}$, потребна е корекција на пресекот. Го усвојуваме следниот поголем стандарден пресек $A = 70 \text{ mm}^2$. За него важи: $r = 0,443 \text{ } \Omega/\text{km}$, $x = 0,116 \text{ } \Omega/\text{km}$. Новата проверка дава $\Delta U = 0,221 \text{ kV} \leq \Delta U_{doz}$. Значи пресекот на магистралниот вод, добиен според овој критериум, ќе изнесува 70 mm^2 .

б) Критериум на константна густина на струја

Потребната густина на струјата $J_{const} = J$ за која ќе биде задоволен условот $\Delta U = \Delta U_{doz}$ изнесува:

$$J_{const} = \frac{\kappa \cdot \Delta U_{a, doz}}{\sqrt{3} \cdot \sum_{i=1}^4 l_i \cdot \cos \varphi_{\Sigma i}} = \frac{32 \cdot 0,2775}{\sqrt{3} \cdot 2,769} = 1,85 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

Притоа е:

$$\cos \varphi_{\Sigma i} = \cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{600}{\sqrt{600^2 + 250^2}} = 0,923; \quad \sum_{i=1}^4 l_i \cdot \cos \varphi_{\Sigma i} = 0,923 \cdot 3 = 2,769 \text{ km.}$$

Врз основа на релацијата $A_i = I_{\Sigma i} / J$; ($i = 1, 4$) ги добиваме следните потребни пресеци:

$$A_1 = \frac{I_{\Sigma 1}}{J} = \frac{150}{1,85} = 81 \text{ mm}^2;$$

$$A_2 = \frac{I_{\Sigma 2}}{J} = \frac{112,5}{1,85} = 69 \text{ mm}^2;$$

$$A_3 = \frac{I_{\Sigma 3}}{J} = \frac{75}{1,85} = 40,5 \text{ mm}^2;$$

$$A_4 = \frac{I_{\Sigma 4}}{J} = \frac{37,5}{1,85} = 20 \text{ mm}^2.$$

Добиените пресеци ќе треба да ги заокружине до најблиските стандардни пресеци. Заокружуваме на следниот начин:

- Прва делница: $A_1 = 95 \text{ mm}^2$; $r_1 = 0,320 \text{ } \Omega/\text{km}$; $x_1 = 0,112 \text{ } \Omega/\text{km}$.
- Втора делница: $A_2 = 50 \text{ mm}^2$; $r_2 = 0,641 \text{ } \Omega/\text{km}$; $x_2 = 0,121 \text{ } \Omega/\text{km}$.
- Трета делница: $A_3 = 35 \text{ mm}^2$; $r_3 = 0,866 \text{ } \Omega/\text{km}$; $x_3 = 0,126 \text{ } \Omega/\text{km}$.
- Четврта делница: $A_4 = 25 \text{ mm}^2$; $r_4 = 1,282 \text{ } \Omega/\text{km}$; $x_4 = 0,131 \text{ } \Omega/\text{km}$.

Се разбира дека се можни и други начини на заокружување. Во принцип, кога начинот на заокружување не е јасно видлив (како во овдешниот случај) правилно би било почетните делници да се заокружуваат нагоре додека последните делници да се заокружуваат надолу.

Пресметка на загубата на напон во водои и проверка на условиот $\Delta U < \Delta U_{\text{doz}}$.

$$\Delta U = \frac{\sum_{i=1}^4 (P_{\Sigma i} r_i + Q_{\Sigma i} x_i) \cdot l_i}{U_n} = 66 + 92 + 82 + 60 = 300 \text{ V} \equiv 3\%.$$

Значи усвоените пресеци задоволуваат. Доколку последниот услов не беше исполнет, тогаш вториот пресек, којшто беше заокружен надолу, ќе го зголемевме на 70 mm^2 .

□ □ □

Задача 3.5. На сликата 3.5.1 е прикажана 10 kV разгранета кабелска мрежа, која треба да биде изведена со кабли од типот IPO 13 A, 10 kV со спроводници од алуминиум ($\kappa = 32 \text{ Smm}^2/\text{km}$). Податоците за подолжните параметри r и x како и податоците за трајно дозволените струи I_d на овие кабли, во зависност од нивниот пресек A , се дадени во табелата 3.5.1. Да се изврши димензионирање на мрежата според критериумот на константен пресек. Да се користат само пресеците што се дадени во табелата 3.5.1. Дозволената загуба на напон изнесува $\Delta U_{\text{doz}} = 5\%$.

Должините на поедините секции од мрежата, изрзени во (km) се прикажани на самата слика 3.5.1. Моќностите на потрошувачите, изразени во (kVA), се како што следува:

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_2 = \underline{S}_3 = \underline{S}_4 = \underline{S}_7 = (600 + j250) \text{ kVA}; \quad \underline{S}_5 = \underline{S}_6 = (360 + j200) \text{ kVA}.$$

Табела 3.5.1. Податоци за подолжните параметри на предвидените кабелски водови тип IPO 13 A.

$A, (\text{mm}^2)$	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
$r, (\Omega/\text{km})$	2,003	1,282	0,866	0,641	0,443	0,320	0,253	0,206	0,169	0,130
$x, (\Omega/\text{km})$	0,109	0,103	0,098	0,093	0,088	0,085	0,082	0,080	0,078	0,076
$I_d, (\text{A})$	69	89	110	130	165	195	225	255	285	325
$S_d, (\text{kVA})$	1195	1542	1905	2252	2858	3377	3897	4417	4936	5629

точка е "електрички" најоддалечена од напојната точка "А". Но кога потрошувачите имаат ист (или приближно ист) фактор на моќност $\cos\phi$, како што е случај во разгледуваната задача, тогаш наместо со производите $l_i \cdot \underline{S}_i^*$ може да се оперира и со производите $l_i \cdot P_{\Sigma i}$.

На тој начин за трите можни магистрални на мрежата ќе имаме:

$$\Sigma_4 = P_{\Sigma 1} \cdot l_1 + P_{\Sigma 2} \cdot l_2 + P_{\Sigma 4} \cdot l_4 = 12870 \text{ kW} \times \text{km};$$

$$\Sigma_6 = P_{\Sigma 1} \cdot l_1 + P_{\Sigma 2} \cdot l_2 + P_{\Sigma 5} \cdot l_5 + P_{\Sigma 6} \cdot l_6 = 19650 \text{ kW} \times \text{km};$$

$$\Sigma_7 = P_{\Sigma 1} \cdot l_1 + P_{\Sigma 2} \cdot l_2 + P_{\Sigma 3} \cdot l_3 + P_{\Sigma 7} \cdot l_7 = 20040 \text{ kW} \times \text{km}.$$

Значи магистралата е дефинирана со множеството гранки $\omega_7 = \{1, 2, 3, 7\}$.

б) Димензионирање на магистралата на мрежата

Како што се бара во задачата, магистралата на мрежата треба да се димензионира според критериумот на константен пресек. За таа цел најнапред ќе ги пресметаме величините ΔU_{doz} , ΔU_r и $\Delta U_{a, doz}$. Врз основа на податоците од табелата 3.5.1 заклучуваме дека просечната вредност на реактанцијата по единица должина на каблите изнесува $x = 0,09 \Omega/\text{km}$.

Врз основа на изразот (3.3) добиваме:

$$\Delta U_r = \sum_{i \in \omega_r} \frac{Q_{\Sigma i} \cdot X_i}{U_n} \approx \frac{x}{U_n} \cdot \sum_{i \in \omega_r} Q_{\Sigma i} \cdot l_i;$$

$$\Delta U_r = \frac{0,09}{10} \cdot (1650 \cdot 2 + 1400 \cdot 1,5 + 900 \cdot 3,5 + 250 \cdot 2,0) = \frac{0,09}{10} \cdot 9050 = 81,5 \text{ V}.$$

$$\Delta U_{doz} = \frac{\Delta U_{doz} \%}{100} \cdot U_n = \frac{5}{100} \cdot 10 = 0,5 \text{ kV} \equiv 500 \text{ V}.$$

$$\Delta U_{a, doz} = \Delta U_{doz} - \Delta U_r = 500 - 81,5 = 418,5 \text{ V} = 0,4185 \text{ kV}.$$

Врз основа на изразот (3.6) ќе го определиме потребниот пресек A на магистралата:

$$A \geq \frac{1000 \cdot \sum_{i \in \omega_r} P_{\Sigma i} \cdot l_i}{\kappa \cdot U_n \cdot \Delta U_{a, doz}} = \frac{1000 \cdot 20040}{32 \cdot 10 \cdot 418,5} = 149,6 \text{ mm}^2.$$

Според тоа најблиску до добиената вредност е стандардниот пресек $A=150 \text{ mm}^2$ за кого од табелата 3.5.1 отчитуваме: $r = 0,206 \Omega/\text{km}$ и $x = 0,08 \Omega/\text{km}$. Проверката на загубата на напон до крајната точка 7 ќе даде:

$$\Delta U = \Delta U_{A-7} = \frac{r}{U_n} \cdot \sum_{i \in \omega_r} P_{\Sigma i} \cdot l_i + \frac{x}{U_n} \cdot \sum_{i \in \omega_r} Q_{\Sigma i} \cdot l_i = \frac{0,206}{10} \cdot 20040 + \frac{0,08}{10} \cdot 9050 = 485,2 \text{ V} < 500 \text{ V}.$$

в) Димензионирање на отцепите на мрежата

Пред да преминеме кон димензионирањето на отцепите од мрежата ќе биде потребно да ги пресметаме загубите на напон ΔU_{A-2} и ΔU_{A-3} до точките 2 и 3 коишто претставуваат почетни (напојни) точки за отцепите (2-4) и (3-5-6) а потоа да ги пресметаме остатоците од дозволената загуба на напон $\Delta U_{1,ost}$ и $\Delta U_{2,ost}$ за првиот и вториот отцеп.

$$\Delta U_{A-1} = \Delta U_1 = \frac{P_{\Sigma 1} \cdot r + Q_{\Sigma 1} \cdot x}{U_n} \cdot l_1 = \frac{3720 \cdot 0,206 + 1650 \cdot 0,08}{10} \cdot 2 = 180 \text{ V};$$

$$\Delta U_{1-2} = \Delta U_2 = \frac{P_{\Sigma 2} \cdot r + Q_{\Sigma 2} \cdot x}{U_n} \cdot l_2 = \frac{3120 \cdot 0,206 + 1400 \cdot 0,08}{10} \cdot 1,5 = 113 \text{ V}.$$

$$\Delta U_{2-3} = \Delta U_3 = \frac{P_{\Sigma 3} \cdot r + Q_{\Sigma 3} \cdot x}{U_n} \cdot l_3 = \frac{1920 \cdot 0,206 + 900 \cdot 0,08}{10} \cdot 3,5 = 164 \text{ V};$$

$$\Delta U_{A-2} = \Delta U_{A-1} + \Delta U_{1-2} = 180 + 113 = 293 \text{ V};$$

$$\Delta U_{A-3} = \Delta U_{A-1} + \Delta U_{1-2} + \Delta U_{2-3} = 180 + 113 + 164 = 457 \text{ V};$$

Според тоа дозволената загуба на напон за првиот отцеп ќе биде:

$$\Delta U_{1,\text{ost}} = \Delta U_{\text{doz}} - \Delta U_{A-2} = 500 - 293 = 207 \text{ V};$$

$$\Delta U_{2,\text{ost}} = \Delta U_{\text{doz}} - \Delta U_{A-3} = 500 - 457 = 43 \text{ V}.$$

Потребниот пресек за првиот отцеп ќе го добиеме со помош на релацијата (3.6):

$$\Delta U_{r,1} = \frac{l_4}{U_n} \cdot Q_{\Sigma 4} \cdot x = \frac{1,25}{10} \cdot 250 \cdot 0,09 = 2,8 \text{ V};$$

$$\Delta U_{1a,\text{doz}} = \Delta U_{1,\text{ost}} - \Delta U_{1,r} = 207 - 2,8 = 204,2 \text{ V};$$

$$A_4 \geq \frac{1000 \cdot (P_{\Sigma 4} \cdot l_4)}{\kappa \cdot U_n \cdot \Delta U_{a1,\text{doz}}} = \frac{1000 \cdot (600 \cdot 1,25)}{32 \cdot 10 \cdot 204,2} = 11,5 \text{ mm}^2.$$

Го усвојуваме првиот стандарден поголем пресек: $A_4 = 16 \text{ mm}^2$. (иако во практиката кај 10 kV мрежи не се усвојуваат толку мали пресеци). За овој пресек од табелата 3.5.1 отчитуваме: $z = (2,003 + j0,109) \Omega/\text{km}$.

Проверката на загубата на напон во водот 4 покажува дека е:

$$\Delta U_4 = \Delta U_{2-4} = \frac{P_{\Sigma 4} \cdot r + Q_{\Sigma 4} \cdot x}{U_n} \cdot l_4 = \frac{600 \cdot 2,003 + 250 \cdot 0,109}{10} \cdot 1,25 = 192 \text{ V} < 204,2 \text{ V}.$$

На сличен начин се постапува и за вториот отцеп (3-5-6). Лесно се добива дека минималниот пресек на делниците 3-5 и 5-6 за којшто загубата на напон во отцепот не е поголема од дозволените 39,4 V изнесува:

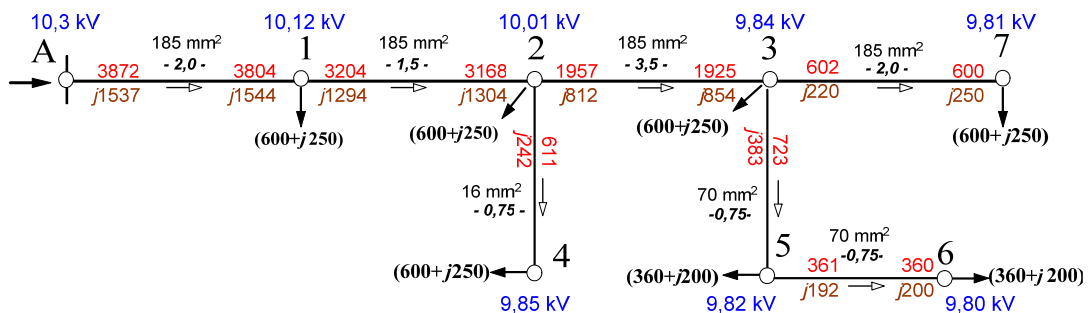
$A_5 = A_6 = 70 \text{ mm}^2$ [$z = (0,443 + j0,088) \Omega/\text{km}$]. За овој пресек се добиваат следните загуби на напон во поедините делници од овој отцеп:

$$\Delta U_{3-5} = \Delta U_5 = 26,6 \text{ V};$$

$$\Delta U_{5-6} = \Delta U_6 = 13,3 \text{ V};$$

$$\Delta U_{3-6} = \Delta U_{3-5} + \Delta U_{5-6} = 26,6 + 13,3 = 39,9 \text{ V} \approx 39,4 \text{ V}.$$

Ако усвоиме дека напонот во напојната точка изнедува $U_A = 10,3 \text{ kV}$ тогаш точните пресметки на напонските прилики во мрежата димензионирана на прикажаниот начин ги даваат следните вредности на напоните во јазлите и струите низ гранките од мрежата:



Слика 3.5.3. Распределба на моќности во мрежата

Резултатите прикажани на сликата 3.5.3 покажуваат дека усвоените пресеци задоволуваат како во поглед на загубата на напон (исполнет е напонскиот критериум бидејќи загубата на напон во мрежата е точно 5%), така и во поглед на дозволените струјни оптоварувања на каблите (исполнет е и термички критериум бидејќи струите/моќностите ноз гранките од мрежата се помали од дозволените според табелата 3.5.1).

□ □ □

Задача 3.6*. Да се изврши избор на пресеците на мрежата од сликата 3.5.1 така што магистралниот дел од мрежата да се димензионира според критериумот на константна густина на струјата додека останатите нејзини делови (отцепите) да се димензионираат според критериумот на константен пресек. Повторно да се користат само пресеците што се дадени во табелата 3.5.1. Дозволената загуба на напон изнесува $\Delta U_{doz} = 5\%$.

Решение:

□ □ □

4. РЕШАВАЊЕ НА ЈАМКАСТИ И СЛОЖЕНО-ЗАТВОРЕНИ МРЕЖИ

Општо

Затворена е онаа мрежа која што содржи барем една затворена контура. Во таквите мрежи повеќето потрошувачи можат да се напојуваат со електрична енергија од најмалку две страни. Затворените мрежи кои се состојат од повеќе контури се викаат сложено-затворени мрежи. Сложено-затворените мрежи можат да се напојуваат и од повеќе напојни точки.



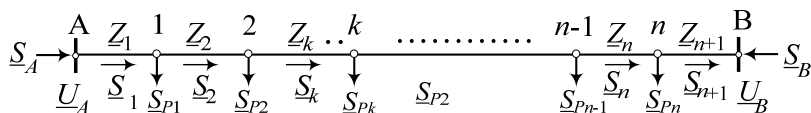
Слика 4.1. Разни видови на затворени мрежи

Под решавање на затворена мрежа подразбираме пресметковна постапка со која се врши одредување на распределбата на моќности низ гранките од мрежата и одредување на напоните во поедините нејзини јазли. Притоа, моќностите на потрошувачите и параметрите на елементите од мрежата се сметаат за познати.

Проблемот на егзактно решавање на затворените мрежи е многу потежок од решавањето на радијалните мрежи, со кое се сретнавме во претходниот дел. Затоа, овде најчесто ќе применуваме некои приближни постапки за решавање на мрежите кои, за практични цели, даваат доволно точни резултати.

Приближните методи, што ќе ги користиме овде, базираат на истите упростувања што беа правени и порано. На пример, при решавањето на состојбата во мрежата често ќе работиме со номиналниот напон место со вистинските напони кои не се однапред познати. Освен тоа, за одредување на распределбата на моќности во мрежата, најчесто загубите на моќност ΔS_j во одделните гранки ќе ги занемаруваме, односно ќе сметаме дека моќностите на влезот и моќностите на излезот од елементите на мрежата се исти.

Откако ќе ја определиме (приближно) распределбата на моќности и напоните во мрежата, можеме да извршиме дополнителни корекции на добиените резултати, со цел да добиеме поточна претстава за состојбата во мрежата (што во најголем број случаи не е неопходно). Корекциите ги вршиме уважувајќи ги вистинските напони (добиени како резултат на приближните пресметки) и загубите на моќност во гранките на мрежата.



Слика 4.2. Двострано напојувана мрежа со произволен број потрошувачи

Најпроста затворена мрежа е двострано напојуваната мрежа (сл.4.2). Распределбата на моќности кај двострано напојуваната мрежа ја определуваме со следните приближни формули:

$$S_A = S_{ur} + \sum_{j=1}^n S_{Pj} \left(\frac{Z_{jB}}{Z_{AB}} \right)^* ; \quad S_B = \sum_{j=1}^n S_{Pj} - S_A \quad (4.1)$$

$$S_1 = S_A ; \quad S_2 = S_1 - S_{P1} ; \quad \dots ; \quad S_n = S_{n-1} - S_{P_{n-1}} ,$$

каде што се воведени следните означувања:

$$\underline{S}_{ur} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot \underline{I}_{ur}^* = U_n \cdot \left(\frac{\underline{U}_A - \underline{U}_B}{\underline{Z}_{AB}} \right)^*; \quad \underline{U}_A = \underline{U}_B \Rightarrow \underline{S}_{ur} = 0. \quad (4.2)$$

$$\underline{Z}_{jB} = \underline{Z}_{j+1} + \underline{Z}_{j+2} + \dots + \underline{Z}_n + \underline{Z}_{n+1} = \sum_j^B \underline{Z}_j; \quad \underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \dots + \underline{Z}_{n+1} = \sum_A^B \underline{Z}_j. \quad (4.3)$$

Доколку сите водови од мрежата имаат исти подолжни параметри $\underline{z}$, тогаш ќе имаме:

$$\underline{Z}_{jB} = \underline{z} \cdot (l_{j+1} + l_{j+2} + \dots + l_{n+1}) = \underline{z} \cdot l_{jB}; \quad \underline{Z}_{AB} = \underline{z} \cdot l_{AB} \Rightarrow \left(\frac{\underline{Z}_{jB}}{\underline{Z}_{AB}} \right)^* = \frac{l_{jB}}{l_{AB}}. \quad (4.4)$$

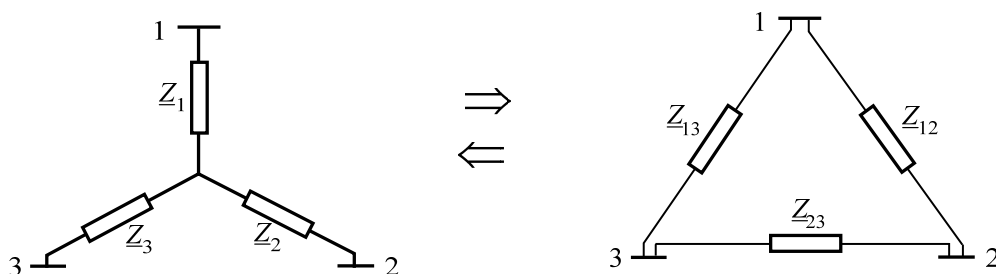
Во тој случај проблемот е значително упростен, бидејќи место со импеданции, ќе работиме со должините на одделните водови.

Прстенестата мрежа (сл.4.1.a) ја решаваме на тој начин што ја "расекуваме" во напојната точка "A" и ја претвораме во двострано напојувана мрежа (сл.4.1.б). Моќноста $\underline{S}_A$ што ја добиваме со гореспоменатата формула сега ќе биде всушност моќноста низ водот A-1 од сликата 4.1.a, додека $\underline{S}_B = \underline{S}_2 - \underline{S}_A$ ќе биде моќноста низ водот A-3.

За приближно решавање на сложено-затворените мрежи постојат повеќе методи, меѓу кои ние ќе издвоиме и ќе се запознаеме со два: методот на трансфигурација и методот на контурни струи (моќности).

Методот на трансфигурација се користи за упростување на сложените мрежи т.е. за намалување на бројот на јазлите и контурите во мрежите, по пат на разни трансформации и трансфигурации. Упростената мрежа, потоа, може да се реши полесно и побрзо, на пример, со методот на контурни моќности.

Често пати при решавањето на сложените мрежи се служиме и со познатите трансфигурации "триаголник" во "свезда" и "свезда" во "триаголник". Секој триаголник на импеданции $\underline{Z}_{12}$, $\underline{Z}_{13}$ и $\underline{Z}_{23}$ (слика 4.4) може да се трансформира во еквивалентна свезда, со импеданции $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$ и $\underline{Z}_3$ и обратно. Трансформацијата се врши со помош на следните релации, кои се во согласност со прикажаната слика:



Слика 4.4. Трансфигурација "свезда – триаголник" и "триаголник – свезда"

Триаголник – свезда

$$\underline{Z}_1 = \frac{\underline{Z}_{12} \underline{Z}_{13}}{\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{13} + \underline{Z}_{23}}$$

$$\underline{Z}_2 = \frac{\underline{Z}_{12} \underline{Z}_{23}}{\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{13} + \underline{Z}_{23}}$$

$$\underline{Z}_3 = \frac{\underline{Z}_{13} \underline{Z}_{23}}{\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{13} + \underline{Z}_{23}}$$

Свезда – триаголник

$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_3}$$

$$\underline{Z}_{13} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_3 + \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2}$$

$$\underline{Z}_{23} = \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 + \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_1}$$

(4.5)

Методот на контурни моќности се користи за приближно одредување на распределбата на моќности во сложените мрежи со поголем број контури. Овој метод е базиран на примената на II Кирхофов закон за напони, кој вели дека сумата на падови на напони во една затворена контура, во која нема ЕМС, е еднаква на нула, т.е:

$$\sum_k \underline{Z}_k \underline{I}_k = 0 \Rightarrow \sqrt{3} \cdot U_n \left(\sum_k \underline{Z}_k \underline{I}_k \right)^* \approx 0 \Rightarrow \sum_k \underline{Z}_k^* \underline{S}_k = 0. \quad (4.6)$$

Ако мрежата има m независни контури и ако за секоја од нив напишеме по една ваква равенка, ќе добиеме систем од m комплексни равенки, во кои непознатите се контурните моќности $S_1, S_2, \dots, S_m$.

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{11}^* \cdot \underline{S}_1 + \underline{Z}_{12}^* \cdot \underline{S}_2 + \dots + \underline{Z}_{1m}^* \cdot \underline{S}_m &= \underline{A}_1 \\ \underline{Z}_{21}^* \cdot \underline{S}_1 + \underline{Z}_{22}^* \cdot \underline{S}_2 + \dots + \underline{Z}_{2m}^* \cdot \underline{S}_m &= \underline{A}_2 \\ \vdots &\vdots \\ \underline{Z}_{m1}^* \cdot \underline{S}_1 + \underline{Z}_{m2}^* \cdot \underline{S}_2 + \dots + \underline{Z}_{mm}^* \cdot \underline{S}_m &= \underline{A}_m \end{aligned} \quad (4.7)$$

или во матричен облик:

$$[Z_K]^* \times [S] = [A] \quad (4.8)$$

каде што е:

$$[\underline{Z}_K] = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} & \underline{Z}_{13} & \cdots & \underline{Z}_{1m} \\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22} & \underline{Z}_{23} & \cdots & \underline{Z}_{2m} \\ \underline{Z}_{31} & \underline{Z}_{32} & \underline{Z}_{33} & \cdots & \underline{Z}_{3m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \underline{Z}_{m1} & \underline{Z}_{m2} & \underline{Z}_{m3} & \cdots & \underline{Z}_{mm} \end{bmatrix}; \quad [\underline{A}] = \begin{bmatrix} \underline{A}_1 \\ \underline{A}_2 \\ \cdots \\ \underline{A}_m \end{bmatrix}; \quad [\underline{S}] = \begin{bmatrix} \underline{S}_1 \\ \underline{S}_2 \\ \cdots \\ \underline{S}_m \end{bmatrix}.$$

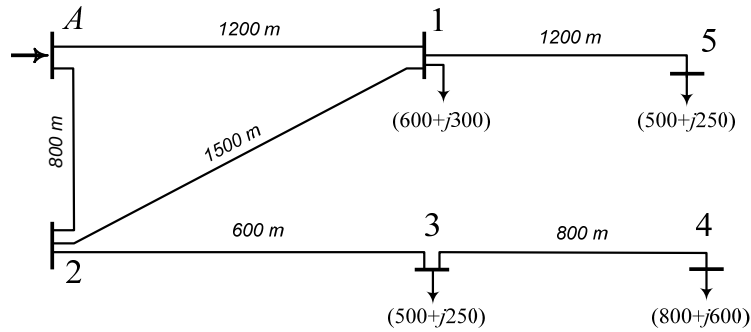
Во матричната релација (4.8) $[Z_K]$ е матрица на импеданции на независните контури, која е квадратна и симетрична. Матрицата $[A]$ што фигурира на десната страна од последната матрична равенка, зависи од оптоварувањата во мрежата и импеданциите на гранките на мрежата и таа е секогаш позната. На тој начин решавањето на една мрежа со помош на овој метод се сведува на решавање на еден систем комплексни равенки. Понатаму таквиот систем равенки може да се реши со некоја од познатите нумерички постапки, на пример со инверзија на матрицата на импеданции на независните контури, или, пак, со помош на некаков готов софтверски алат (MathCad, Matlab и др.).

Специјален случај на методот на контурни моќности е методот на раздвојување. Овој метод служи за решавање на таканаречените "хомогени" мрежи. Тоа се оние мрежи кај кои односот $X/R = \xi$ за секоја гранка е константен. Тука, на пример, спаѓаат мрежите чишто водови имаат ист пресек, или пак, нисконапонските мрежи за кои е $X \ll R$ па е $X/R = \xi \approx 0$. Кај овие мрежи, за секоја контура, место комплексната равенка $\sum \underline{Z}_k^* \cdot \underline{S}_k = 0$ добиваме две алгебарски равенки $\sum P_k \cdot X_k = 0$ и $\sum Q_k \cdot R_k = 0$ за секоја независна контура. Со други зборови, комплексниот систем од m равенки се распаѓа на два алгебарски система од по m равенки, што претставува големо олеснување при пресметките.

Задача 4.1. Да се определи распределбата на моќности и загубата на напон ΔU во прикажаната 10 kV мрежа (слика 4.1.1):

- а) за нормален режим на работа;
- б) за режим на најтежок дефект во мрежата.

Оптоварувањата изразени во MVA и должините на одделните водови, изразени во m, се прикажани на самата слика. Напонот во напојната точка "А" изнесува $\underline{U}_A = 10 \cdot e^{j0}$ kV.

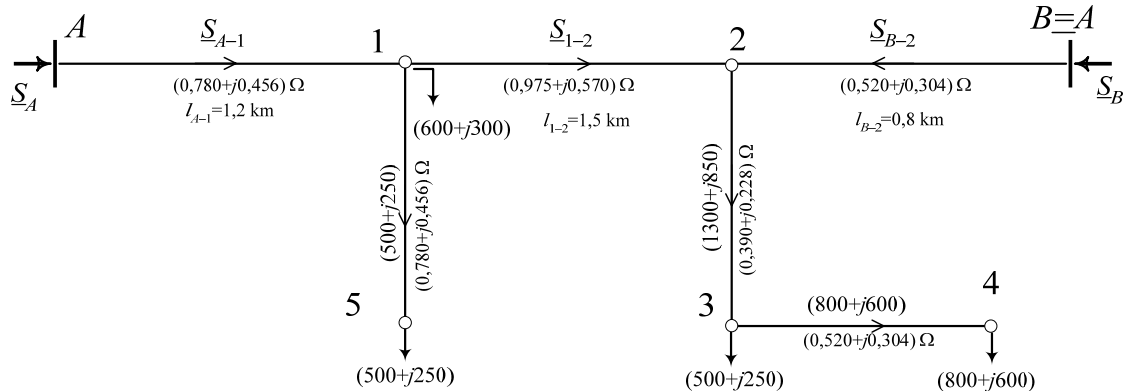


Слика 4.1.1. 10 kV надземна мрежа со една контура

Решение

а) Пресметка на мрежата во нормален режим на работа

Во нормален режим на работа сите елементи од мрежата се исправни и се во погон. Во таквиот работен режим во мрежата има една контура, како што е тоа прикажано на сликата 4.1.1. Мрежата ќе ја решиме на тој начин што прстенот А–1–2 ќе го расечеме во напојната точка А и ќе го отвориме (развиеме) како што е тоа прикажано на сликата 4.1.2.



Слика 4.1.2. Нормален режим на работа на мрежата.

Најнапред ќе ја одредиме (приближно) распределбата на моќности во магистралниот дел од мрежата А–1–2–В. За таа цел ќе ги занемариме загубите на моќност во водовите 2–3, 3–4 и 1–5, и привремено, моќноста $\underline{S}_5$ ќе ја пренесеме во јазелот "1", додека моќностите $\underline{S}_3$ и $\underline{S}_4$ ќе ги пренесеме во јазелот "2". Во тој случај, за еквивалентните оптоварувањата $\underline{S}'_1$ и $\underline{S}'_2$ во јазлите "1" и "2" ќе добиеме:

$$\underline{S}'_1 = \underline{S}_1 + \underline{S}_5 = (1100 + j550) \text{ kVA}; \quad \underline{S}'_2 = \underline{S}_3 + \underline{S}_4 = (1300 + j850) \text{ kVA}.$$

Понатаму, во согласност со изразите (4.1), за моќностите $\underline{S}_A$ и $\underline{S}_B$ што се инјектираат во јазлите А и В од мрежата, ќе добиеме:

$$\underline{S}_A = \underline{S}'_1 \cdot \left(\frac{\underline{Z}_{1B}}{\underline{Z}_{AB}} \right)^* + \underline{S}'_2 \cdot \left(\frac{\underline{Z}_{2B}}{\underline{Z}_{AB}} \right)^* = \underline{S}'_1 \cdot \frac{l_{1-B}}{l_{A-B}} + \underline{S}'_2 \cdot \frac{l_{2-B}}{l_{A-B}} = (1020 + j556) \text{ kVA};$$

$$\underline{S}_B = \underline{S}'_1 \cdot \left(\frac{\underline{Z}_{1A}}{\underline{Z}_{AB}} \right)^* + \underline{S}'_2 \cdot \left(\frac{\underline{Z}_{2A}}{\underline{Z}_{AB}} \right)^* = \underline{S}'_1 \cdot \frac{l_{1-A}}{l_{A-B}} + \underline{S}'_2 \cdot \frac{l_{2-A}}{l_{A-B}} = (1380 + j844) \text{ kVA}.$$

Како проверка на точноста на решението ќе ни послужи контролата:

$$\underline{S}_A + \underline{S}_B = \Sigma \underline{S} = (600 + j300) + (500 + j250) + (800 + j600) + (500 + j250) = (2400 + j1400) \text{ kVA}.$$

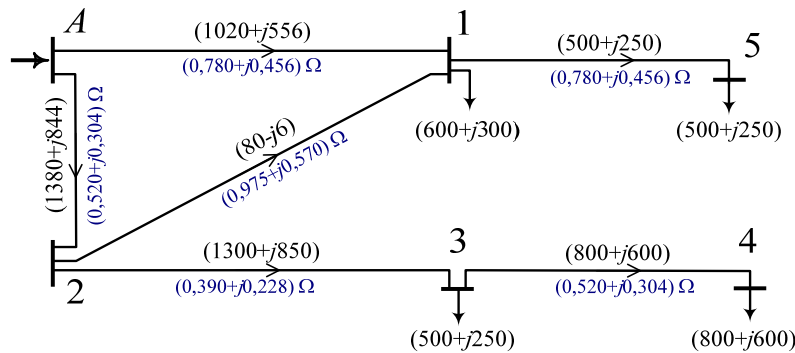
И навистина од добиените решенија за $\underline{S}_A$ и $\underline{S}_B$ произлегува:

$$\underline{S}_A + \underline{S}_B = \Sigma \underline{S} = (1020 + j556) + (1380 + j844) = (2400 + j1400) \text{ kVA}.$$

За моќноста што тече низ водот 1-2 ќе добиеме:

$$\underline{S}_{1-2} = \underline{S}_A - \underline{S}'_1 = (1020 + j556) - (1100 + j550) = (-80 + j6) \text{ kVA}.$$

На тој начин ја добиваме следната приближна распределба на моќности во мрежата, прикажана на сликата 4.1.3.



Слика 4.1.3. Распределба на моќности во нормален режим на работа на мрежата.

Сега можеме да ги пресметаме и загубите на напон во поедините делници од мрежата, како и напоните во јазлите од мрежата:

$$\Delta U_{A-1} = \frac{1020 \cdot 0,78 + 556 \cdot 0,456}{10} = 105 \text{ V};$$

$$U_1 = U_A - \Delta U_{A-1} = 9,895 \text{ kV}$$

$$\Delta U_{1-5} = \frac{500 \cdot 0,78 + 250 \cdot 0,456}{10} = 50 \text{ V};$$

$$U_5 = U_1 - \Delta U_{1-5} = 9,845 \text{ kV}$$

$$\Delta U_{A-2} = \frac{1380 \cdot 0,52 + 844 \cdot 0,304}{10} = 97 \text{ V};$$

$$U_2 = U_A - \Delta U_{A-2} = 9,903 \text{ kV}$$

$$\Delta U_{2-3} = \frac{1300 \cdot 0,39 + 850 \cdot 0,228}{10} = 70 \text{ V};$$

$$U_3 = U_2 - \Delta U_{2-3} = 9,833 \text{ kV}$$

$$\Delta U_{3-4} = \frac{800 \cdot 0,52 + 600 \cdot 0,304}{10} = 60 \text{ V};$$

$$U_4 = U_3 - \Delta U_{3-4} = 9,773 \text{ kV}.$$

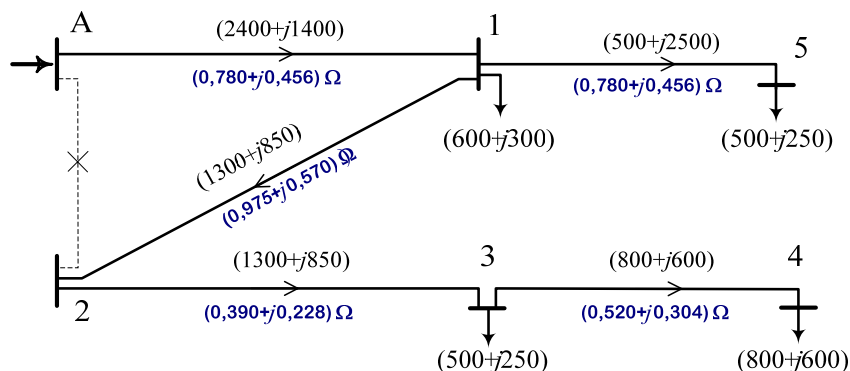
Загубата на напон во мрежата претставува разлика помеѓу напонот во напојната точка А и точката со најнизок напон, во случајов јазелот 4, т.е.:

$$\Delta U = U_A - U_4 = 10 - 9,773 = 0,227 \text{ kV или } \Delta U\% = 2,27\%.$$

б) Пресметка на мрежата во режим на најтешок дефект

Режим на најголем дефект ќе имаме тогаш кога водот којшто пренесува најголема моќност излезе од погон. Во тој случај, сите потрошувачи ќе се снабдуваат со електрична енергија само од една страна (од еден извор).

Во нашиот пример, делницата А-2 е оној вод којшто пренесува најголема моќност. Со неговото испаѓање од погон ќе ја имаме состојбата во мрежата, претставена на сликата 4.1.4.



Слика 4.1.4. Распределба на моќности во режим со најтежок дефект.

Во овој случај, распределбата на моќности се одредува сосема едноставно, со примена на првиот кирхофов Закон за струи (моќности), т.е со нивно просто сумирање. Резултатите од пресметките на приближните вредности на моќностите во мрежата за овој режим се прикажани на самата слика 4.1.4. Загубите на напон во поедините делници од мрежата како и напоните во јазлите од мрежата сега ќе бидат:

$$\Delta U_{A-1} = \frac{2400 \cdot 0,78 + 1400 \cdot 0,456}{10} = 251 \text{ V}; \quad U_1 = U_A - \Delta U_{A-1} = 9,749 \text{ kV};$$

$$\Delta U_{1-5} = \frac{500 \cdot 0,78 + 250 \cdot 0,456}{10} = 50 \text{ V}; \quad U_5 = U_1 - \Delta U_{1-5} = 9,845 \text{ kV}$$

$$\Delta U_{1-2} = \frac{1300 \cdot 0,975 + 850 \cdot 0,228}{10} = 146 \text{ V}; \quad U_2 = U_1 - \Delta U_{1-2} = 9,603 \text{ kV}$$

$$\Delta U_{2-3} = \frac{1300 \cdot 0,39 + 850 \cdot 0,228}{10} = 70 \text{ V}; \quad U_3 = U_2 - \Delta U_{2-3} = 9,533 \text{ kV}$$

$$\Delta U_{3-4} = \frac{800 \cdot 0,52 + 60 \cdot 0,304}{10} = 60 \text{ V}; \quad U_4 = U_3 - \Delta U_{3-4} = 9,473 \text{ kV}.$$

Јасно е дека и во овој режим најголемата загуба на напон ќе се има повторно до точката "4", односно загубата на напон во мрежата сега ќе биде:

$$\Delta U = U_A - U_4 = 10 - 9,473 = 0,527 \text{ kV}$$

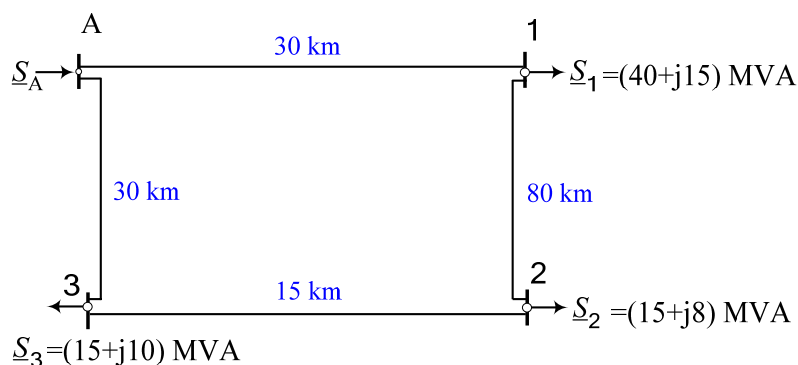
или

$$\Delta U\% = 5,27\%.$$

□ □ □

Задача 4.2: На сликата 4.2.1 е прикажана една прстенеста 110 kV мрежа. Сите водови од мрежата се изведени на челично-решеткасти столбови, со средно-геометриско растојание $D_m = 5 \text{ m}$ и со спроводници $Al/\wedge 185/30 \text{ mm}^2$ ($r = 0,17 \text{ } \Omega/\text{km}$; $x = 0,41 \text{ } \Omega/\text{km}$). Поедините оптоварувања (во MVA) и должини на водовите (во km) се прикажани на шемата. Напонот во напојната точка "A" се држи на константна вредност $U_A = 115 \text{ kV}$.

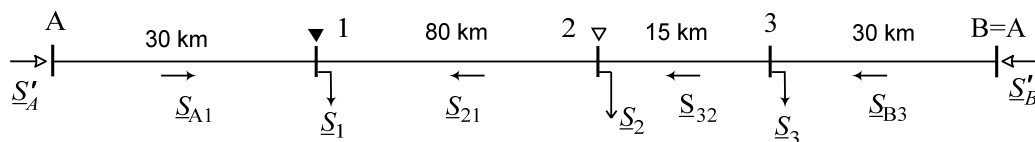
Потребно е да се одреди распределбата на моќности во мрежата, уважувајќи ги загубите на моќности и фактичките напони во јазлите. Заради упростување, генерираните реактивни моќности од водовите во пресметките да се занемарат.



Слика 4.2.1. 110 kV прстенеста мрежа.

Решение

Дадената прстенеста мрежа најнапред ќе ја расечеме во напојната точка "А" и на тој начин ќе ја добиеме двострано напојувана мрежа, прикажана на сликата 4.2.2. Оваа мрежа потоа лесно ја решаваме со помош на познатите равенки (4.1).



Слика 4.2.2. 110 kV мрежа од слика 4.2.1 во развиена форма.

Бидејќи сите водови од мрежата имаат исти подолжни параметри, за одредувањето на моќностите $\underline{S}_{A-1}$, $\underline{S}_{2-1}$, $\underline{S}_{3-2}$ и $\underline{S}_{B-3}$, наместо со импеданциите, ќе работиме со должини:

$$\underline{S}'_A \equiv \underline{S}_{A-1} = \underline{S}_1 \cdot \frac{l_{1B}}{l_{AB}} + \underline{S}_2 \cdot \frac{l_{2B}}{l_{AB}} + \underline{S}_3 \cdot \frac{l_{3B}}{l_{AB}};$$

$$\underline{S}'_A \equiv \underline{S}_{A-1} = (40 + j15) \cdot \frac{125}{155} + (15 + j8) \cdot \frac{45}{155} + (15 + j10) \cdot \frac{30}{155} = (39,5 + j16,3) \text{ MVA}$$

$$\underline{S}'_B \equiv \underline{S}_{B-3} = (\underline{S}_1 + \underline{S}_2 + \underline{S}_3) - \underline{S}'_A = (30,5 + j16,3) \text{ MVA},$$

$$\underline{S}_{32} = \underline{S}_{B-3} - \underline{S}_3 = (15,5 + j6,7) \text{ MVA},$$

$$\underline{S}_{21} = \underline{S}_{3-2} - \underline{S}_2 = (0,5 + j1,3) \text{ MVA}.$$

Значи, разделната точка за активни моќности е јазелот 1, додека за реактивни моќности е јазелот "2". Понатаму загубите на моќност $\Delta \underline{S}$ во поедините водови ќе бидат:

$$\Delta \underline{S}_i = \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_n^2} \cdot l_i \cdot (r + jx); \quad i = 1, \dots, 4;$$

$$\Delta \underline{S}_{A-1} = \frac{39,5^2 + 16,3^2}{110^2} \cdot 30 \cdot (0,17 + j0,41) = (0,77 + j1,85) \text{ MVA}.$$

Со оглед на фактот дека моќноста $\underline{S}_{A1}$ тече од јазелот "А" кон јазелот "1", јасно е дека загубите во делницата А-1 ќе ги покрива изворот во точката "А", односно, моќноста на почетокот од водот А-1 ќе изнесува:

$$\underline{S}'_{A-1} = \underline{S}_{A-1} + \Delta \underline{S}_{A-1} = (40,27 + j18,15) \text{ MVA}.$$

Моќноста $\underline{S}_{2-1}$ низ водот 2-1 е многу мала, па загубите $\Delta \underline{S}_{1-2}$ во овој вод, кои изнесуваат,

$$\Delta \underline{S}_{1-2} = \frac{0,5^2 + 1,3^2}{110^2} \cdot 80 \cdot (0,17 + j0,41) = (0,002 + j0,005) \text{ MVA},$$

можеме да ги занемариме т.е. ќе сметаме дека е приближно:

$$\underline{S}'_{2-1} = \underline{S}''_{2-1} = \underline{S}_{2-1}.$$

Загубите $\Delta \underline{S}_{2-3}$ во водот 2-3 ќе бидат:

$$\Delta \underline{S}_{2-3} = \frac{15,5^2 + 6,7^2}{110^2} \cdot 15 \cdot (0,17 + j0,41) = (0,06 + j0,145) \text{ MVA}.$$

Моќноста на почетокот од водот 2-3 ќе биде:

$$\underline{S}'_{3-2} = \underline{S}''_{3-2} + \Delta \underline{S}_{2-3} = \underline{S}_3 + \Delta \underline{S}_{2-3} = (15,56 + j6,71) \text{ MVA}.$$

Моќноста $\underline{S}''_{4-3}$ на крајот од водот 3-4 сега ќе биде:

$$\underline{S}''_{4-3} = \underline{S}'_{3-2} + \underline{S}_3 = (30,56 + j16,71) \text{ MVA}.$$

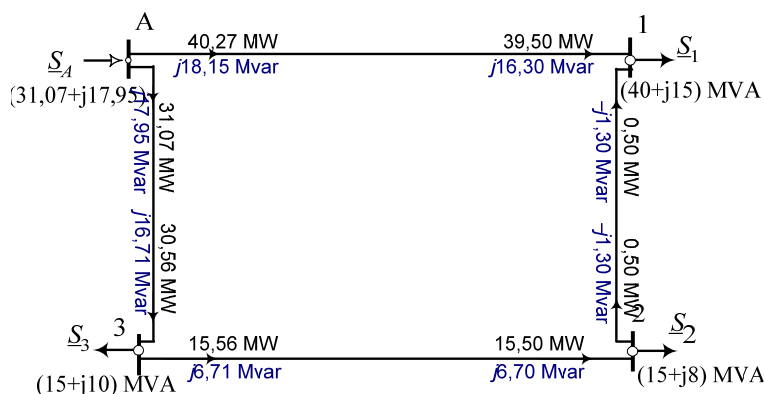
Загубите $\Delta \underline{S}_{3-4}$ во водот 3-4 ќе бидат:

$$\Delta \underline{S}_{3-4} = \frac{30,56^2 + 16,71^2}{110^2} \cdot 30 \cdot (0,17 + j0,41); \quad \Delta \underline{S}_{3-4} = (0,515 + j1,24) \text{ MVA}$$

и конечно:

$$\underline{S}'_{4-3} = \underline{S}''_{4-3} + \Delta \underline{S}_{3-4} = (31,07 + j17,95) \text{ MVA}.$$

Конечната распределба на моќности во мрежата, прикажана е на сликата 4.2.3:



Слика 4.2.3. Текови на моќности мрежа.

Сега лесно можеме да ги одредиме напоните во јазлите од мрежата:

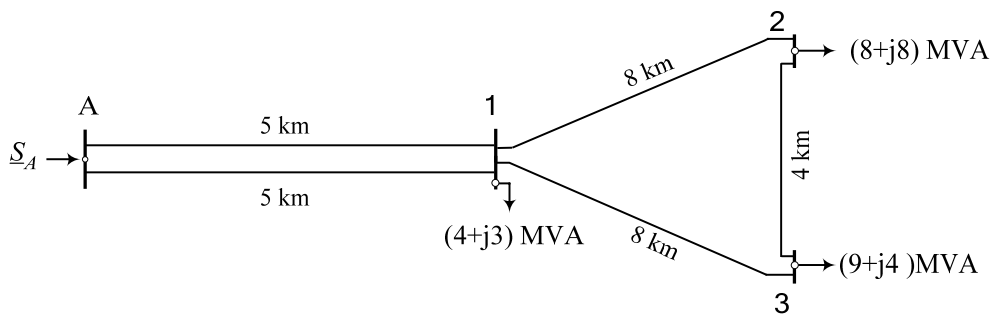
$$U_1 = U_A - \frac{P'_{A-1} \cdot r \cdot l_{A-1} + Q'_{A-1} \cdot x \cdot l_{A-1}}{U_A}; \quad U_1 = 115 - \frac{40,27 \cdot 5,1 + 18,15 \cdot 12,3}{115} = 111,27 \text{ kV};$$

$$U_3 = U_A - \frac{P'_{A-3} \cdot r \cdot l_{A-3} + Q'_{A-3} \cdot x \cdot l_{A-3}}{U_A}; \quad U_3 = 115 - \frac{31,57 \cdot 5,1 + 17,95 \cdot 12,3}{115} = 111,71 \text{ kV}$$

$$U_2 = U_3 - \frac{P'_{3-2} \cdot r \cdot l_{2-3} + Q'_{3-2} \cdot x \cdot l_{2-3}}{U_3}; \quad U_2 = 111,71 - \frac{15,56 \cdot 2,55 + 6,71 \cdot 6,15}{111,71} = 110,98 \text{ kV}.$$

□ □ □

Задача 4.3. Дадена е 35 kV мрежа. Оптоварувањата во јазлите (во MVA) и должините на водовите (во km) се наведени на сликата. Сите водови од мрежата имаат ист пресек Al/Č 120/20 mm² ($r = 0,27 \text{ } \Omega/\text{km}$ и $x = 0,405 \text{ } \Omega/\text{km}$). Приближно да се одреди распределбата на моќности и загубата на напон ΔU , во мрежата. Генерираните моќности од поедините водови во пресметките можат да се занемарат.



Слика 4.3.1. 35 kV прстенеста мрежа.

Решение

Вод	Моќност низ вод	Загуба на напон
$(A-1)_1$	$\underline{S}_{(A-1)_1} = (10+j7,5) \text{ MVA}$	$\Delta U_{A-1} = 0,84 \text{ kV}$
$(A-1)_2$	$\underline{S}_{(A-1)_2} = (10+j7,5) \text{ MVA}$	$\Delta U_{A-1} = 0,84 \text{ kV}$
1-2	$\underline{S}_{1-2} = (8,4+j6,4) \text{ MVA}$	$\Delta U_{1-2} = 1,11 \text{ kV}$
1-3	$\underline{S}_{1-3} = (8,6+j5,6) \text{ MVA}$	$\Delta U_{1-3} = 1,05 \text{ kV}$
2-3	$\underline{S}_{2-3} = (0,4-j1,6) \text{ MVA}$	$\Delta U_{2-3} = 0,06 \text{ kV}$

Од резултатите заклучуваме дека напонот во точката 2 е најнизок ($\Delta U_{1-2} > \Delta U_{3-2}$). Значи, загубата на напон во мрежата ќе изнесува:

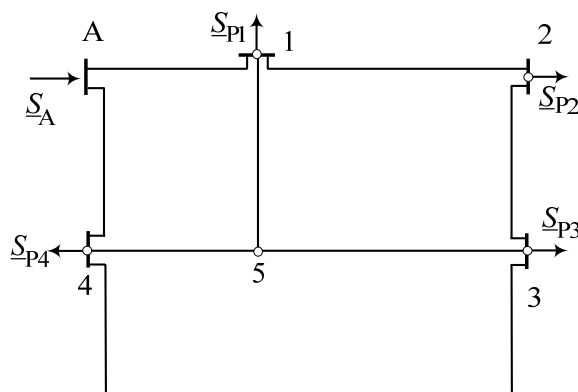
$$\Delta U = \Delta U_{A-2} = \Delta U_{A-1} + \Delta U_{1-2} = 0,84 + 1,11 = 1,95 \text{ kV},$$

или

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100 = \frac{1,95}{35} \cdot 100 = 5,6\%.$$

□ □ □

Задача 4.4: За прикажаната сложено-затворена мрежа да се напишат контурните равенки.



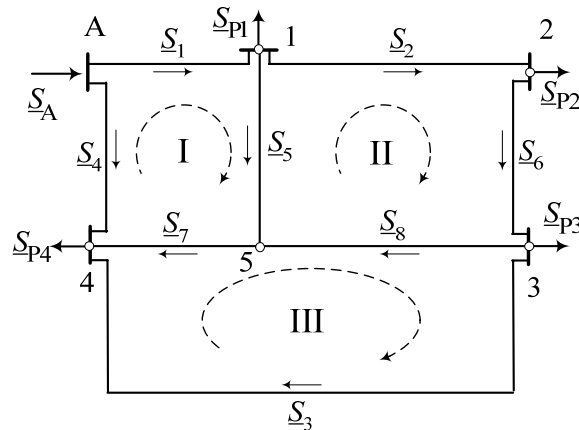
Решение

Прикажаната мрежа има вкупно $n_j = n = 6$ јазли (A, 1, 2, 3, 4 и 5) и $n_g = b = 8$ гранки (A-1, 1-2, 2-3, 3-4, A-4, 1-5, 2-3, 5-4 и 3-5). Бројот на независните контури $n_k = m$ на мрежата изнесува:

$$m = b - n + 1.$$

Значи, во нашиот случај ќе имаме $m = 8 - 6 + 1 = 3$ независни контури. Значи системот контурни равенки со кој се опишува состојбата во мрежата ќе биде од трети ред.

Сега ќе ги дефинираме трите независни контури и ќе ги усвоиме нивните насоки. Нека А-1-5-4-А биде првата контура, понатаму 1-2-3-5-1 биде втората и нека третата контура биде 3-4-5-3. Позитивните насоки на независните контури нека бидат како на сликата што следи. Во тој случај, гранката А-1 припаѓа само на првата контура, гранката 1-2 припаѓа само на втората контура, а гранката 3-4 припаѓа само на третата контура. Сега со $\underline{S}_1$, $\underline{S}_2$ и $\underline{S}_3$ ќе ги означиме моќностите низ овие гранки и притоа нивните насоки ќе ги усогласиме со позитивните насоки на соодветните независни контури. Нумерацијата на останатите моќности низ гранките од мрежата и усвојувањето на нивните насоки е произволна. Притоа со $\underline{Z}_i$ ќе ја означиме редната импеданција на i -тата гранка. На таков начин ја добиваме следната слика:



Слика 4.4.1. Сложено-затворена мрежа со три независни контури.

Понатаму, тргнувајќи од условот дека сумата на падови на напони во една затворена контура е еднаков на нула (II Кирхофов закон), за секоја од независните контури пишуваме по една таква равенка. На тој начин ги добиваме контурните равенки на мрежата:

$$\underline{S}_1 \cdot \underline{Z}_1^* + \underline{S}_5 \cdot \underline{Z}_5^* + \underline{S}_7 \cdot \underline{Z}_7^* - \underline{S}_4 \cdot \underline{Z}_4^* = 0,$$

$$\underline{S}_2 \cdot \underline{Z}_2^* + \underline{S}_6 \cdot \underline{Z}_6^* + \underline{S}_8 \cdot \underline{Z}_8^* - \underline{S}_5 \cdot \underline{Z}_5^* = 0,$$

$$\underline{S}_3 \cdot \underline{Z}_3^* - \underline{S}_7 \cdot \underline{Z}_7^* - \underline{S}_8 \cdot \underline{Z}_8^* = 0.$$

Во овој систем равенки непознати се само контурните моќности $\underline{S}_1$, $\underline{S}_2$ и $\underline{S}_3$ бидејќи моќностите $\underline{S}_4$, $\underline{S}_5$ $\underline{S}_8$ низ останатите гранки од мрежата можат да се изразат преку нив и преку познатите моќности на оптоварувањата $\underline{S}_{P1}$ $\underline{S}_{P4}$. Имено, со примена на I Кирхофов закон за моќности во јазлите 1, 2, 3, 5 и 4, добиваме:

$$\underline{S}_5 = \underline{S}_1 - \underline{S}_2 - \underline{S}_{P1};$$

$$\underline{S}_6 = \underline{S}_2 - \underline{S}_{P2};$$

$$\underline{S}_8 = \underline{S}_6 - \underline{S}_3 - \underline{S}_{P3} = \underline{S}_2 - \underline{S}_3 - (\underline{S}_{P2} + \underline{S}_{P3});$$

$$\underline{S}_7 = \underline{S}_8 + \underline{S}_5 = \underline{S}_1 - \underline{S}_3 - (\underline{S}_{P1} + \underline{S}_{P2} + \underline{S}_{P3});$$

$$\underline{S}_4 = \underline{S}_{P4} - \underline{S}_7 - \underline{S}_3 = -\underline{S}_1 + (\underline{S}_{P1} + \underline{S}_{P2} + \underline{S}_{P3} + \underline{S}_{P4})$$

Ако во системот контурни равенки на мрежата моќностите $\underline{S}_4$, $\underline{S}_5$ $\underline{S}_8$ ги изразиме преку контурните моќности $\underline{S}_1$, $\underline{S}_2$ и $\underline{S}_3$ и моќностите на потрошувачите $\underline{S}_{P1}$ $\underline{S}_{P4}$, ќе го добиеме конечниот облик на системот контурни равенки, кој после средувањето гласи:

$$\underline{Z}_{11}^* \cdot \underline{S}_1 + \underline{Z}_{12}^* \cdot \underline{S}_2 + \underline{Z}_{13}^* \cdot \underline{S}_3 = \underline{A}_1;$$

$$\underline{Z}_{21}^* \cdot \underline{S}_1 + \underline{Z}_{22}^* \cdot \underline{S}_2 + \underline{Z}_{23}^* \cdot \underline{S}_3 = \underline{A}_2;$$

$$\underline{Z}_{31}^* \cdot \underline{S}_1 + \underline{Z}_{32}^* \cdot \underline{S}_2 + \underline{Z}_{33}^* \cdot \underline{S}_3 = \underline{A}_3.$$

каде што се:

$$\begin{aligned}
\underline{A}_1 &= \underline{S}_{P1} \cdot (\underline{Z}_4 + \underline{Z}_5 + \underline{Z}_7)^* + (\underline{S}_{P2} + \underline{S}_{P3}) \cdot (\underline{Z}_4 + \underline{Z}_7)^* + \underline{S}_{P4} \cdot \underline{Z}_7^*; \\
\underline{A}_2 &= -\underline{S}_{P1} \cdot \underline{Z}_5^* + \underline{S}_{P2} \cdot (\underline{Z}_6 + \underline{Z}_8)^* + \underline{S}_{P3} \cdot \underline{Z}_5^*; \\
\underline{A}_3 &= -\underline{S}_{P1} \cdot \underline{Z}_7^* + (\underline{S}_{P2} + \underline{S}_{P3}) \cdot (\underline{Z}_7 + \underline{Z}_8)^*; \\
\underline{Z}_{11} &= \underline{Z}_1 + \underline{Z}_5 + \underline{Z}_7 + \underline{Z}_4; \\
\underline{Z}_{12} &= \underline{Z}_{21} = -\underline{Z}_5; \\
\underline{Z}_{22} &= \underline{Z}_2 + \underline{Z}_6 + \underline{Z}_8 + \underline{Z}_5; \\
\underline{Z}_{13} &= \underline{Z}_{31} = -\underline{Z}_7; \\
\underline{Z}_{33} &= \underline{Z}_3 + \underline{Z}_7 + \underline{Z}_8; \\
\underline{Z}_{23} &= \underline{Z}_{32} = -\underline{Z}_6.
\end{aligned}$$

□ □ □

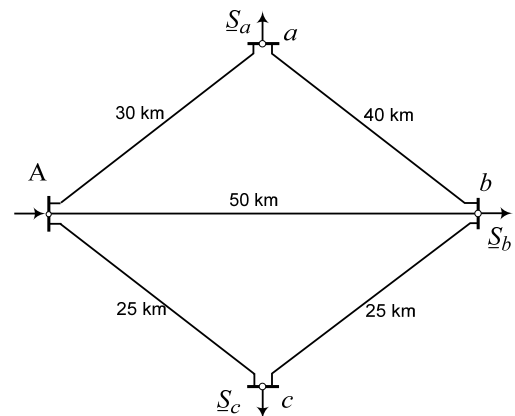
Задача 4.5: На сликата 4.5.1 е прикажан графот на една затворена 110 kV мрежа. Сите водови од мрежата имаат исти подолжни параметри $\underline{z} = (r+jx) = (0,13+j0,40) \Omega/\text{km}$. Должините на водовите, изразени во km, се прикажани на самата слика. *Потребно е:*

- да се избере стебло на мрежата и да се изврши соодветна нумерација на гранките и јазлите на стеблото во согласност со методот на ориентирано подредување од [2];
- за така избраното стебло да се определат главните контури како и елементите од матрицата на импеданции на независните контури $[\underline{Z}_K]$;
- со примена на методот на контурни струи да се напишат релациите за пресметување на струите $\underline{I}_{K1}$ и $\underline{I}_{K2}$ во главните контури, а потоа да се определат самите струи $\underline{I}_{K1}$ и $\underline{I}_{K2}$ за случајот кога напонот во напојната точка е $U_A = 10 \text{ kV}$ а потрошувачите можат да се претстават со соодветни идеални струјни генератори чиешто струи се:

$$\underline{J}_a = (157,5 - j52,5) \text{ A} = 166,02 \cdot e^{-18,44^\circ} \text{ A};$$

$$\underline{J}_b = (105 - j52,5) \text{ A} = 117,39 \cdot e^{-26,57^\circ} \text{ A};$$

$$\underline{J}_c = (52,5 - j52,5) \text{ A} = 74,25 \cdot e^{-45^\circ} \text{ A}.$$



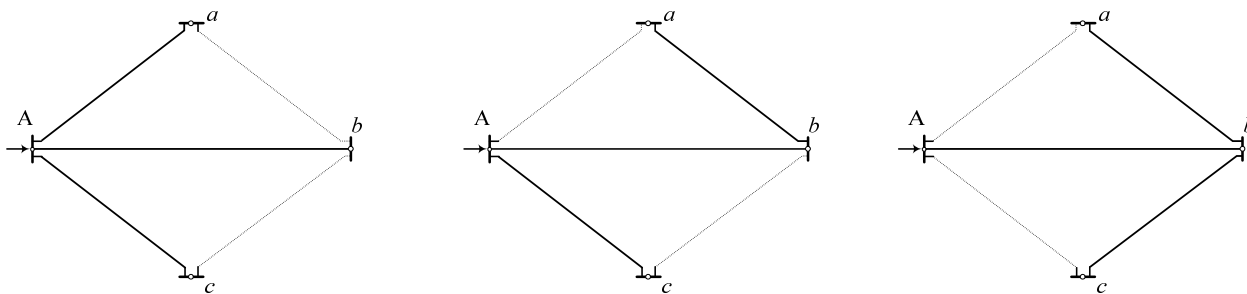
Слика 4.5.1. Сложено-затворена мрежа со две независни контури

Решение

а) Избор на стебло на мрежата

Стеблото на еден граф претставува множество од заемно поврзани гранки со кои се опфатени сите јазли од мрежата но притоа не се формира ниту една контура. За секој граф постојат повеќе можности за избор на стебло. За мрежата чијшто граф е прикажан на сликата 4.5.1 постојат исто така повеќе такви можни стебла. Три од нив се прикажани на сликата 4.5.2.

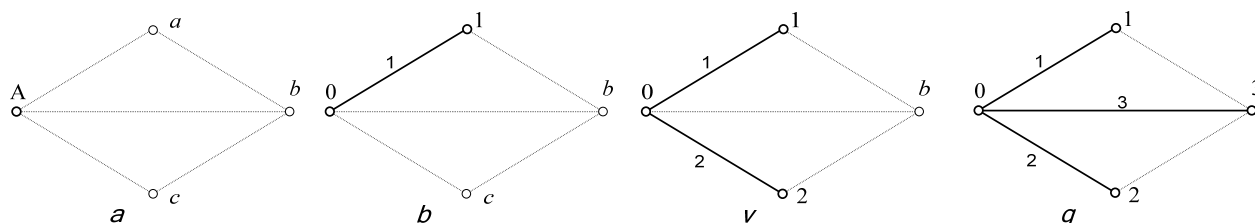
Нека понатаму во задачата го избереме првото стебло прикажано на сликата 4.5.2. Ќе извршиме ориентирано подредување на гранките од стеблото и соодветно на тоа и нумерација (индексирање) на јазлите од мрежата. На напојниот јазел (точката А) секогаш ќе му го доделуваме редниот број 0. Во тој случај секоја гранка ќе има реден број кој почнува од 1 а завршува до n_g , каде што n_g е вкупниот број на гранки во мрежата.



Слика 4.5.2. Три можни стебла за графот од мрежата од слика 4.5.1

Ако со $n_j = n$ го означиме вкупниот број на јазли во мрежата, тогаш првите $n-1$ гранки ќе бидат гранки на стеблото, додека преостанатите n_k гранки [$n_k = n_g - (n_j - 1)$] се т.н. *спојници*. Според методот на ориентирано подредување се усвојува редниот број на гранката од стеблото да се совпадне со редниот број на нејзиниот краен јазел. Ориентацијата на сите гранки во мрежата се усвојува да биде секогаш од јазелот со помал, кон јазелот со поголем индекс.

Најдобро е стеблото на графот да се формира постапно. Се започнува со напојниот јазел А, како прв јазел на стеблото. Се избира една од гранките која е врзана за јазелот А (нпр. гранката А-а) и таа се придодава на стеблото. Натамошниот тек на градење на стеблото се врши постапно додавајќи една по една од гранките на мрежата и водејќи притоа сметка со додавањето на било која нова гранка да не се формира ниту една контура. Процесот на градењето на стеблото, заедно со соодветниот процес на нумерација на гранките и јазлите од стеблото е илустриран на сликата 4.5.2.

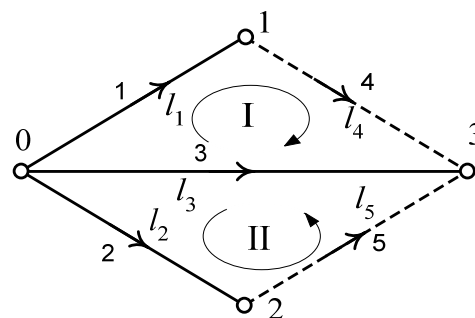


Слика 4.5.2. Постапно градење на стеблото од графот на мрежата

Нумерацијата на гранките/јазлите од стеблото на мрежата се врши исто така постапно, една по една гранка. Секоја нова гранка што се додава на стеблото мора да може да се закачи на претходно формираното стебло, т.е. мора еден од јазлите од гранката веќе да е воведен во дотогаш делумно изграденото стебло. Со додавањето на гранката на стеблото веднаш се врши и нејзина нумерација.

б) Формирање на матрицата на независните контури $[Z_K]$ на мрежата

Секоја спојница од мрежата заедно со дел од стеблото на мрежата формира по една *независна контура*. За ориентацијата на спојниците важи истото правило: од јазелот со помал, кон јазелот со поголем индекс. Мрежата ќе има онолку независни контури колку што во неа има спојници. Во разгледуваната мрежа има вкупно $n_k = m = n_g - n_j + 1 = 5 - 3 + 1 = 2$ независни контури, т.е. $m = 2$. Нека за прва спојница ја прогласиме гранката а-б (односно гранката 1-3 на сл. 4.5.2.г) а за втора гранката c-б (односно гранката 2-3 на сл. 4.5.2.г). Тогаш првата независна контура, придружена кон првата спојница (1-3) ќе биде формирана од гранките: 1-3, 3-0 и 0-1.



Слика 4.5.3. Ориентиран граф на мрежата и дефинирање на главните контури.

Позитивната насока на секоја контура се совпаѓа со насоката (ориентацијата) на нејзината спојница. Според тоа позитивната насока на првата контура ќе се совпаѓа со насоката (ориентацијата) на нејзината спојница (1–3), како што е тоа прикажано на сликата 4.5.3. Слично, втората контура е составена од гранките 2–3, 3–0 и 0–2 со насока (ориентација) што се совпаѓа со ориентацијата на втората спојница 2–3.

Според методот на контурни струи, струите $\underline{I}_{K1}$ и $\underline{I}_{K2}$ на главните контури, кои се истовремено и струи што ќе течат низ соодветните спојници во мрежата, се добиваат како решение на следниот систем равенки:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{11} \cdot \underline{I}_{K1} + \underline{Z}_{12} \cdot \underline{I}_{K2} &= \Delta E_1 \\ \underline{Z}_{21} \cdot \underline{I}_{K1} + \underline{Z}_{22} \cdot \underline{I}_{K2} &= \Delta E_2.\end{aligned}\quad (4.5.1)$$

или напишани во матрична форма:

$$\begin{bmatrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} \\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \underline{I}_{K1} \\ \underline{I}_{K2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta E_1 \\ \Delta E_2 \end{bmatrix}.\quad (4.5.2)$$

Елементот $\underline{Z}_{11}$ од матрицата на импеданции на независните контури $[\underline{Z}_K]$ се добива со просто сумирање на импеданциите од сите гранки што ја образуваат првата независна контура, т.е.:

$$\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_3 + \underline{Z}_4.$$

Слично, за елементот $\underline{Z}_{22}$ од матрицата $[\underline{Z}_K]$ ќе имаме:

$$\underline{Z}_{22} = \underline{Z}_2 + \underline{Z}_5 + \underline{Z}_3.$$

И конечно, елементот $\underline{Z}_{12}$ ќе биде еднаков на импеданцијата на гранката од мрежата којашто во исто време припаѓа и на обете контури, со знак + кога се работи за усогласени насоки на контурите низ таа гранка или со знак – во спротивниот случај. Значи добиваме:

$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21} = \underline{Z}_3.$$

Со замена на бројните вредности за импеданциите на поедините гранки од мрежата ќе добијеме:

$$\underline{Z}_1 = \underline{z} \cdot l_1 = (0,13 + j0,40) \cdot 30 = (3,9 + j12) \Omega;$$

$$\underline{Z}_2 = \underline{z} \cdot l_2 = (0,13 + j0,40) \cdot 25 = (3,25 + j10) \Omega;$$

$$\underline{Z}_3 = \underline{z} \cdot l_1 = (0,13 + j0,40) \cdot 50 = (6,5 + j20) \Omega;$$

$$\underline{Z}_4 = \underline{z} \cdot l_4 = (0,13 + j0,40) \cdot 40 = (4,2 + j16) \Omega;$$

$$\underline{Z}_5 = \underline{z} \cdot l_5 = (0,13 + j0,40) \cdot 25 = (3,25 + j10) \Omega.$$

$$[\underline{Z}_K] = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} \\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_1 + \underline{Z}_3 + \underline{Z}_4 & \underline{Z}_3 \\ \underline{Z}_3 & \underline{Z}_2 + \underline{Z}_5 + \underline{Z}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 15,6 + j48 & 6,5 + j20 \\ 6,5 + j20 & 13 + j40 \end{bmatrix} \Omega.$$

в) Пресметка на контурните струи $\underline{I}_{K1}$ и $\underline{I}_{K2}$.

Бараните вредности на струите низ спојниците $\underline{I}_{K1}$ и $\underline{I}_{K2}$ ќе се добијат како решение на следниот линеарен систем комплексни равенки:

$$\begin{bmatrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} \\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \underline{I}_{K1} \\ \underline{I}_{K2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta E_1 \\ \Delta E_2 \end{bmatrix}$$

На десната страна од системот контурни равенки фигурираат величините ΔE_1 и ΔE_2 , кои се дефинирани на сликата 4.5.4. На сликата 4.5.4 претставен е ориентирираниот граф од сликата 4.5.3, со таа разлика што сега контурите се отворени со што графот станува радијален. Отворањето на контурите се врши кај обете спојници. Така, на пример, спојницата 1-3 е исклучена на својот крај, кај јазелот 3. Нејзиниот крај сега ќе претставува нов јазел, означен како јазел бр. 4, па на тој начин оваа спојница е претворена во гранка на стеблото. На сликата 4.5.4 таа е прикажана како гранка 1-4.

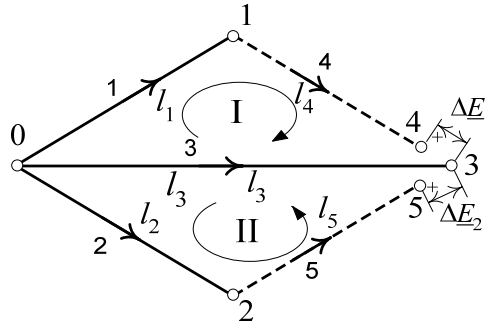
На сличен начин спојницата 2-3 е прекината на својот крај, воведен е јазелот бр. 5 и таа спојница е преквалификувана во гранка на стеблото, означена како гранка 2-5.

Величините $\Delta \underline{E}_1$ и $\Delta \underline{E}_2$ што фигурираат во последниот матричен систем равенки претставуваат разлики на потенцијалите помеѓу новите јазли 4 и 5 и јазелот 3 во кој завршуваа спојниците пред да ги отвориме. Според тоа, за овие две величини ќе добиеме:

$$\Delta \underline{E}_1 = \underline{U}'_{4f} - \underline{U}'_{3f} = (\underline{U}'_4 - \underline{U}'_3) / \sqrt{3};$$

$$\Delta \underline{E}_2 = \underline{U}'_{5f} - \underline{U}'_{3f} = (\underline{U}'_5 - \underline{U}'_3) / \sqrt{3}.$$

Во последните релации со апостроф (') се означени напоните на јазлите во режимот кога мрежата работи како отворена, со спојници преквалификувани во гранки од стеблото (слика 4.5.4). Струите низ гранките во мрежата од сл. 4.5.4 исто така ќе бидат означени со (').



Слика 4.5.4. Отворање на спојниците и дефинирање на величините $\Delta \underline{E}_1$ и $\Delta \underline{E}_2$

Според избраното нумерирање на јазлите во мрежата за струите на потрошувачите можеме да напишеме:

$$\underline{J}_{P1} = \underline{J}_a = (0,1575 - j0,0255) \text{ kA};$$

$$\underline{J}_{P2} = \underline{J}_c = (0,0525 - j0,0525) \text{ kA} \text{ и}$$

$$\underline{J}_{P3} = \underline{J}_b = (0,105 - j0,0525) \text{ kA}.$$

Со сумирање на струи (во овој случај практично нема никакво сумирање, затоа што струјата во секоја гранка е од само еден потрошувач), за струите во гранките добиваме:

$$\underline{I}'_1 = \underline{J}_{P1} = (0,1575 - j0,0255) \text{ kA};$$

$$\underline{I}'_2 = \underline{J}_{P2} = (0,0525 - j0,0525) \text{ kA} \text{ и}$$

$$\underline{I}'_3 = \underline{J}_{P3} = (0,105 - j0,0525) \text{ kA}.$$

За струите во спојниците важи:

$$\underline{I}'_4 = 0 \text{ A} \text{ и } \underline{I}'_5 = 0 \text{ A}.$$

Притоа, слично како и во претходниот случај со апостроф (') се означени струите во гранките од мрежата кога спојниците се отворени.

Напонот на крајниот јазел i на гранката i го пресметуваме со следниот израз:

$$\underline{U}'_i = \underline{U}'_k - \sqrt{3} \cdot \underline{Z}_i \cdot \underline{I}'_i; \quad (4.5.3)$$

каде што k е индекс на почетниот јазел на гранката i .

Според тоа добиваме:

$$\underline{U}'_1 = \underline{U}_0 - \sqrt{3} \cdot \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}'_1 = 112 - \sqrt{3} \cdot (3,9 + j12) \cdot (0,1575 - j0,0255) = (110,4061 - j3,1013) \text{ kV};$$

$$\underline{U}'_2 = \underline{U}_0 - \sqrt{3} \cdot \underline{Z}_2 \cdot \underline{I}'_2 = 112 - \sqrt{3} \cdot (3,25 + j10) \cdot (0,0525 - j0,0525) = (110,7951 - j0,6138) \text{ kV};$$

$$\underline{U}'_3 = \underline{U}_0 - \sqrt{3} \cdot \underline{Z}_3 \cdot \underline{I}'_3 = 112 - \sqrt{3} \cdot (6,5 + j20) \cdot (0,1050 - j0,0525) = (108,9992 - j3,0462) \text{ kV}.$$

Бидејќи струите во гранките 4 и 5 се еднакви на нула, напоните на крајните јазли на тие гранки ќе бидат еднакви со напоните на на вивните почетни јазли, т.е.:

$$\underline{U}'_4 = \underline{U}'_1 = (110,4061 - j3,1013) \text{ kV};$$

$$\underline{U}'_5 = \underline{U}'_2 = (110,7951 - j0,6138) \text{ kV}.$$

Напоните на отворените спојници изнесуваат:

$$\Delta E_1 = \frac{\underline{U}'_4 - \underline{U}'_3}{\sqrt{3}} = \frac{(110,4061 - j3,1013) - (108,9992 - j3,0462)}{\sqrt{3}} = (0,8123 - j0,0318) \text{ kV};$$

$$\Delta E_2 = \frac{\underline{U}'_5 - \underline{U}'_3}{\sqrt{3}} = \frac{(110,7951 - j0,6138) - (108,9992 - j3,0462)}{\sqrt{3}} = (1,0369 + j1,4044) \text{ kV}.$$

Бараните вредности на струите низ спојниците $\underline{I}_{K1}$ и $\underline{I}_{K2}$ ќе се добијат како решение на следниот линеарен систем комплексни равенки:

$$\begin{bmatrix} 16,4 + j48 & 6,5 + j20 \\ 6,5 + j20 & 13 + j40 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \underline{I}_{K1} \\ \underline{I}_{K2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,8123 - j0,0318 \\ 1,0369 + j1,4044 \end{bmatrix};$$

чие решение е:

$$\underline{I}_{K1} = (-0,0156 - j0,0124) \text{ kA}; \quad \underline{I}_{K2} = (0,0472 - j0,0069) \text{ kA}.$$

□ □ □

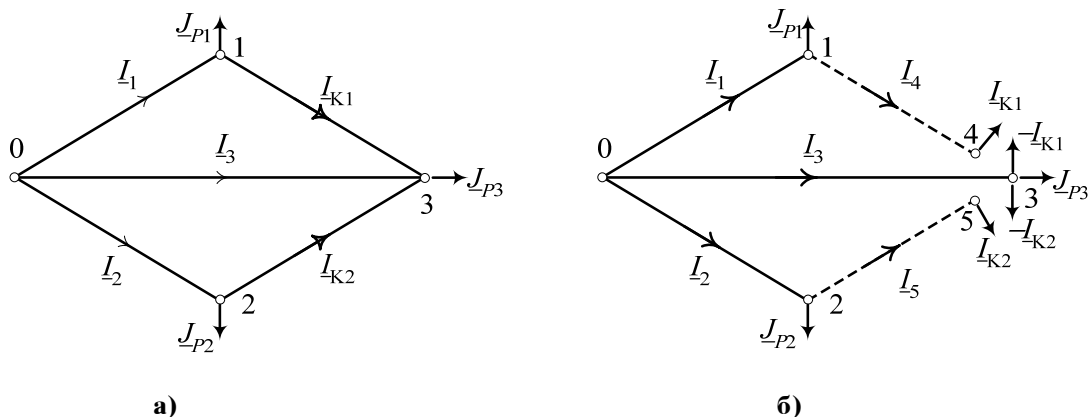
Задача 4.6: Користејќи ги пресметаните вредности на контурните струи од задачата 4.5 да се пресметаат напоните на јазлите 1, 2 и 3 за случајот кога спојниците се затворени што одговара на состојбата на мрежата прикажана на сликата 4.5.1. Колкави се привидните моќности на потрошувачите во тој случај?

Решение

а) Пресметка на напоните

Затворените спојници може да се симулираат со струјни инјекции како што тоа е прикажано на сликата 4.6.1. Контурната струја $\underline{I}_{K1}$, според усвоената конвенција за насоките од задачата 4.5, тече од јазелот 1 кон јазелот 4 и понатаму кога спојницата не би била прекината би се влеала во јазелот 3. Тоа можеме да го моделираме со две струјни инјекции со вредност $\underline{I}_{K1}$, при што едната од нив излегува од јазелот 4, а другата влегува во јазелот 3. На сличен начин е постапено и со контурната струја $\underline{I}_{K2}$ само што во тој случај струјните инјекции со вредност $\pm \underline{I}_{K2}$ се поставени во јазлите 5 и 3.

Струите на четирите струјните инјекции кои ги додадовме во мрежата кај секоја прекината спојница можеме да ги третираме исто како и струите на потрошувачите. Бидејќи струите на потрошувачите излегуваат од јазлите, згодно е и сите струјни инјекции да имаат такви насоки. Доколку насоките на струјните инјекции $\underline{I}_{K1}$ и $\underline{I}_{K2}$ во јазелот 3 ги промениме и истовремено износите на струите ги помножимо со -1 во електричен поглед во колото нема ништо да се промени. На таков начин е добиена еквивалентната шема од сликата 4.6.1б. Бидејќи јазлите 4 и 5 се вештачки и таму нема потрошувачи целокупната струја низ гранките 4 и 5 ќе биде еднаква само на струјата на струјната инјекција, додека кај јазелот 3 струите на струјните инјекции ќе треба да ги додадеме на струјата на потрошувачот $\underline{I}_{P3}$.



Слика 4.6.1. Симулација на спојниците со струјни инјекции

Имајќи ги предвид струите на потрошувачите и пресметаните контурни струи од задачата 4.5, во согласност со сликата 4.6.1б за "инјектираните" струи, т.е. за струите што излегуваат од јазлите 1-5 можеме да напишеме:

$$\underline{J}_1 = \underline{J}_{P1} = (0,1575 - j0,0255) \text{ kA};$$

$$\underline{J}_2 = \underline{J}_{P2} = (0,0525 - j0,0525) \text{ kA}$$

$$\underline{J}_3 = \underline{J}_{P3} - \underline{I}_{K1} - \underline{I}_{K2} = \underline{J}_{3(\text{задача 4.5})} - \underline{I}_{K1} - \underline{I}_{K2} = (0,0734 - j0,0332) \text{ kA};$$

$$\underline{J}_4 = \underline{I}_{K1} = (-0,0156 - j0,0124) \text{ kA};$$

$$\underline{J}_5 = \underline{I}_{K2} = (0,0472 - j0,0069) \text{ kA};$$

Понатаму, врз основа на I Кирхофов Закон за струи, за струите во гранките можеме да пишуваме:

$$\underline{I}_1 = \underline{J}_{P1} + \underline{J}_4 = (0,1419 - j0,0379) \text{ kA};$$

$$\underline{I}_2 = \underline{J}_{P2} + \underline{J}_5 = (0,0997 - j0,0594) \text{ kA};$$

$$\underline{I}_3 = \underline{J}_{P3} = (0,0734 - j0,0332) \text{ kA};$$

$$\underline{I}_4 = \underline{J}_4 = (-0,0156 - j0,0124) \text{ kA};$$

$$\underline{I}_5 = \underline{J}_5 = (0,0472 - j0,0069) \text{ kA}.$$

Следејќи ја постапката за пресметка на напоните на јазлите објаснета во задачата 4.5, но користејќи ги горните вредности за струите во гранките за напоните на јазлите се добива:

$$\underline{U}_1 = (110,2539 - j2,6931) \text{ kV};$$

$$\underline{U}_2 = (110,4096 - j1,3920) \text{ kV};$$

$$\underline{U}_3 = (110,0240 - j2,1702) \text{ kV};$$

$$\underline{U}_4 = (110,0240 - j2,1702) \text{ kV};$$

$$\underline{U}_5 = (110,0240 - j2,1702) \text{ kV}.$$

Од резултатите се забележува дека напоните на јазлите 4 и 5 се еднакви со напонот на јазелот 3, што во потполност одговара на приликите во мрежата, бидејќи во првобитно зададената мрежа (слика 4.5.3) тие јазли се поклопуваат со јазелот 3.

б) Пресметка на моќносите на потрошувачите

Привидната моќност на потрошувачите може да се пресмета со изразот:

$$\underline{S}_{Pi} = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_i \cdot \underline{J}_{Pi}^* ; i \in \{1, 2, 3\} .$$

На тој начин за одделните моќности на потрошувачите се добива:

$$\underline{S}_{P1} = \sqrt{3} \cdot (110,2539 - j2,6931) \cdot (0,1575 + j0,0255) = (30,196 + j4,135) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{P2} = (10,166 + j9,913) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{P3} = (20,207 + j9,610) \text{ MVA}.$$

□ □ □

Задача 4.7: Се разгледува мрежата од задачата 4.5. Нека потрошувачите во јазлите a , b и c се зададени со своите привидни моќности: $\underline{S}_a = (30 + j5) \text{ MVA}$, $\underline{S}_b = (20 + j10) \text{ MVA}$ и $\underline{S}_c = (10 + j10) \text{ MVA}$. Користејќи го методот на контурни струи да се пресметаат напоните во јазлите, моќностите во гранките како и загубите на моќност во мрежата.

Решение

а) Пресметка на напоните

За разлика од задачата 4.5, во овој случај не ни се познати струите на потрошувачите. Затоа сега во процедурата изложена во задачата 4.5 ќе треба да вметнеме уште еден чекор во кој ќе ги пресметуваме тие струи. За струјата на потрошувачот во јазелот i можеме да напишеме:

$$\underline{I}_{Pi} = \left(\frac{\underline{S}_{Pi}}{\sqrt{3} \cdot \underline{U}_i} \right)^* ; \quad (4.7.1)$$

но, повторно се соочуваме со проблем поради тоа што ниту напонот на јазелот $\underline{U}_i$ не ни е познат.

Поради тоа, примената на методот на контурни струи мора да биде итеративна. На почетокот ќе претпоставиме дека напоните на сите јазли се еднакви на номиналниот и со таквата претпоставка се пресметуваат струите на потрошувачите. Потоа со повеќекратно повторување на операциите изведени во задачата 4.5 се врши уточнување на вредностите на напоните на јазлит и струите на потрошувачите. Како критериум за конвергенција на итеративниот процес може да се усвои следниот: итеративниот процес ќе се смета за завршен тогаш кога најголемата релативна разлика (прираст) на напонот во било кој јазел од мрежата, по апсолутен износ, нема да биде поголем од некоја однапред зададена позитивна, но доволно мала вредност ε . Последниот лингвистички исказ напишан со математички јазик изгледа вака:

$$\max_i \left\{ \Delta U_i = \frac{|\underline{U}_i^{(k)} - \underline{U}_i^{(k-1)}|}{|\underline{U}_i^{(k-1)}|} \right\} < \varepsilon; \quad i \in \{1, 2, 3\}.$$

Во последниот израз се воведени следните означувања: $\underline{U}_i^{(k)}$ е напонот на јазелот i во итерацијата k , а со $\underline{U}_i^{(k-1)}$ е означен напонот на јазелот i во претходната итерацијата $k-1$. Вообичаено е да се работи со вредности за толеранцијата $\varepsilon = 0,001$ (т.е. $\varepsilon\% = 0,1\%$).

Нулта итерација

Тргувајќи од претпоставката дека напоните во мрежата се еднакви на номиналниот ($U_i = U_n$; $i = 1, n$), врз основа на изразот (4.7.1) за струите на потрошувачите $\underline{I}_{Pi}$ можеме да пишуваме:

$$\underline{I}_{P1} = \frac{\underline{S}_{P1}^*}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{(30 + j5)^*}{\sqrt{3} \cdot 110} = (0,1575 - j0,0262) \text{ kA};$$

$$\underline{I}_{P2} = \frac{\underline{S}_{P2}^*}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{(10 + j10)^*}{\sqrt{3} \cdot 110} = (0,0525 - j0,0525) \text{ kA};$$

$$\underline{J}_{P3} = \frac{\underline{S}_{P3}^*}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{(20 + j10)^*}{\sqrt{3} \cdot 110} = (0,1050 - j0,0525) \text{ kA}.$$

Понатаму за струите во гранките добиваме:

$$\underline{I}_1 = \underline{J}_{P1} = (0,1575 - j0,0262) \text{ kA};$$

$$\underline{I}_2 = \underline{J}_{P2} = (0,0525 - j0,0525) \text{ kA и}$$

$$\underline{I}_3 = \underline{J}_{P3} = (0,105 - j0,0525) \text{ kA};$$

додека за струите во спојниците важи:

$$\underline{I}_4 = 0 \text{ A и } \underline{I}_5 = 0 \text{ A}.$$

Со примена на релацијата (4.5.3) за напоните на јазлите добиваме:

$$\underline{U}_1 = (110,3909 - j3,0955) \text{ kV};$$

$$\underline{U}_2 = (110,7954 - j0,6136) \text{ kV};$$

$$\underline{U}_3 = (109,0000 - j3,0455) \text{ kV};$$

$$\underline{U}_4 = (110,3909 - j3,0955) \text{ kV};$$

$$\underline{U}_5 = (110,7954 - j0,6136) \text{ kV}.$$

Напоните на отворените спојници изнесуваат

$$\Delta E_1 = [\underline{U}_4 - \underline{U}_3] / \sqrt{3} = (0,8030 - j0,0289) \text{ kV};$$

$$\Delta E_2 = [\underline{U}_5 - \underline{U}_3] / \sqrt{3} = (1,0366 + j1,4040) \text{ kV}.$$

Приближните (почетните) вредности на струите низ спојниците $\underline{I}_{K1}$ и $\underline{I}_{K2}$ ќе се добијат како решение на системот линеарни комплексни равенки (4.5.2) и изнесуваат:

$$\underline{I}_{K1} = (-0,0156 - j0,0122) \text{ kA};$$

$$\underline{I}_{K2} = (0,0472 - j0,0070) \text{ kA}.$$

Прва итерација

Со напоните пресметани во нултата итерација правиме уточнување на вредностите на струите на потрошувачите:

$$\underline{J}_1 = \frac{(30 + j5)^*}{\sqrt{3}(110,3909 - j3,0955)^*} = (0,1560 - j0,0305) \text{ kA};$$

$$\underline{J}_2 = \frac{(10 + j10)^*}{\sqrt{3}(110,7954 - j0,6136)^*} = (0,0518 - j0,0524) \text{ kA};$$

$$\underline{J}_3 = \frac{(20 + j10)^*}{\sqrt{3}(109,0000 - j3,0455)^*} = (0,1044 - j0,0559) \text{ kA}.$$

Понатаму, користејќи го изнесеното во задачата 4.6 во врска со симулацијата на спојниците со струјни инјекции (слика 4.6.1a) за струите кои излегуваат од јазлите 1-5 добиваме:

$$\underline{J}_1 = \underline{J}_{P1} = (0,1560 - j0,0305) \text{ kA};$$

$$\underline{J}_2 = \underline{J}_{P2} = (0,0518 - j0,0524) \text{ kA};$$

$$\underline{J}_3 = \underline{J}_{P3} - \underline{I}_{K1} - \underline{I}_{K2} = (0,0728 - j0,0367) \text{ kA};$$

$$\underline{J}_4 = \underline{I}_{K1} = (-0,0156 - j0,0122) \text{ kA};$$

$$\underline{J}_5 = \underline{I}_{K2} = (0,0472 - j0,0070) \text{ kA}.$$

За струите во гранките можеме да напишеме:

$$\underline{I}_1 = \underline{J}_1 + \underline{J}_4 = (0,1404 - j0,0427) \text{ kA};$$

$$\underline{I}_2 = \underline{J}_2 + \underline{J}_5 = (0,0990 - j0,0594) \text{ kA};$$

$$\underline{I}_3 = \underline{J}_3 = (0,0728 - j0,0367) \text{ kA};$$

$$\underline{I}_4 = \underline{J}_4 = (-0,0156 - j0,0122) \text{ kA};$$

$$\underline{I}_5 = \underline{J}_5 = (0,0472 - j0,0070) \text{ kA}.$$

Понатаму, за напоните на јазлите добиваме:

$$\underline{U}_1 = (110,1642 - j2,6307) \text{ kV};$$

$$\underline{U}_2 = (110,4132 - j1,3799) \text{ kV};$$

$$\underline{U}_3 = (109,9094 - j2,1092) \text{ kV};$$

$$\underline{U}_4 = (109,9409 - j2,1099) \text{ kV};$$

$$\underline{U}_5 = (110,0257 - j2,1572) \text{ kV}.$$

При тоа релативните прирасти (разлики) на напоните, по апсолутен износ, во однос на пресметаните од нултата итерација изнесуваат: $\Delta U_1 = 0,0047$; $\Delta U_2 = 0,0077$; $\Delta U_3 = 0,0120$; $\Delta U_4 = 0,0098$; $\Delta U_5 = 0,0156$. Најголемата разлика изнесува 0,0156 и е поголема од дозволената толеранција ε , така што е потребно да се продолжи со уточнување на напоните во следната итерација.

Но пред да се продолжи со наредната итерација, потребно е да се уточнат и контурните струи. Со новопресметаните напони на јазлите за напоните на отворените спојници се добива:

$$\Delta \underline{E}_1 = (0,0182 - j0,0004) \text{ kV}; \Delta \underline{E}_2 = (0,0671 - j0,0277) \text{ kV};$$

а потоа со решавање на системот равенки (4.5.1) се добиваат прирасти на вредностите на контурните струи:

$$\Delta \underline{I}_{K1} = (0,0002 - j0,0005) \text{ kA}; \Delta \underline{I}_{K2} = (-0,0002 - j0,0020) \text{ kA}.$$

Прирастите на контурните струи ги додаваме на старите вредности на контурните струи (од претходната итерација), така што добиваме:

$$\underline{I}_{K1} = \underline{I}_{K1(\text{старо})} + \Delta \underline{I}_{K1} = (-0,0154 - j0,0117) \text{ kA};$$

$$\underline{I}_{K2} = \underline{I}_{K2(\text{старо})} + \Delta \underline{I}_{K2} = (-0,0469 - j0,0090) \text{ kA}.$$

Најамошни итерации

Повторувајќи ја целата постапка како во претходната итерација по четири итерации ги добиваме конечните вредности за напоните на јазлите:

$$\underline{U}_1 = (110,1859 - j2,6461) \text{ kV}; \underline{U}_2 = (110,3859 - j1,3621) \text{ kV}; \underline{U}_3 = (109,9786 - j2,1287) \text{ kV};$$

$$\underline{U}_4 = (109,9796 - j2,1278) \text{ kV}; \underline{U}_5 = (109,9795 - j2,1277) \text{ kV};$$

и струите во гранките:

$$\underline{I}_1 = (0,1408 - j0,0415) \text{ kA}; \underline{I}_2 = (0,0985 - j0,0612) \text{ kA}; \underline{I}_3 = (0,0727 - j0,0347) \text{ kA};$$

$$\underline{I}_4 = (-0,0157 - j0,0116) \text{ kA}; \underline{I}_5 = (0,0469 - j0,0082) \text{ kA}.$$

б) Текови на моќносии и загуби на моќносии во гранките од мрежата

Нека во општ случај со k го означиме редниот број на гранката од мрежата што ги сврзува јазлите i и j , а со $\underline{Z}_k$ и $\underline{I}_k$ ги означиме нејзината импеданција и струјата во таа гранка. Тогаш знаејќи ги напоните $\underline{U}_i$ и $\underline{U}_j$ на крајните јазли на гранката k ($i-j$) и струјата $\underline{I}_k$ во неа, привидните моќности $\underline{S}'_k$ и $\underline{S}''_k$ на почетокот и на крајот во гранката k можеме да ги пресметаме на следниот начин:

$$\underline{S}'_k = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_i \cdot \underline{I}_k^* - \text{привидна моќност на почетокот на гранката,}$$

$$\underline{S}''_k = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_j \cdot \underline{I}_k^* - \text{привидна моќност на крајот на гранката,}$$

каде што согласно со правилата за ориентирано подредување од задачата 4.5 крајниот јазел на гранката j е јазлот j , додека нејзиниот почетен јазел е означен со i . На пример за гранката со реден број $k = 1$ што ги поврзува јазлите $i = 0$ и $j = 1$, ќе имаме (слика 4.6.1a):

$$\underline{S}'_1 = \sqrt{3} \underline{U}_0 \underline{I}_1^* \text{ и } \underline{S}''_1 = \sqrt{3} \underline{U}_1 \underline{I}_1^*.$$

Загубите на моќност во мрежата ги добиваме како сума на загубите на моќност во одделните гранки кои се разлика од моќностите на двата краја на гранките:

$$\Delta \underline{S} = \sum_{k=1}^{n_g} (\underline{S}'_k - \underline{S}''_k) = \sum_{k=1}^{n_g} \Delta \underline{S}_k.$$

Со примена на горните релации ги добиваме следните вредности:

Гранка (k)	$\underline{S}'_k$ (MVA)	$\underline{S}''_k$ (MVA)	$\Delta \underline{S}_k$ (MVA)
1	27,315 + j8,054	27,063 + j7,278	0,252 + j0,776
2	19,112 + j11,867	18,981 + j11,463	0,131 + j0,403
3	14,110 + j6,734	13,983 + j6,345	0,127 + j0,390
4	-2,938 + j2,278	-2,942 + j2,260	0,005 + j0,018
5	8,981 + j1,463	8,959 + j1,395	0,022 + j0,068
Вкупно			0,537 + j1,655

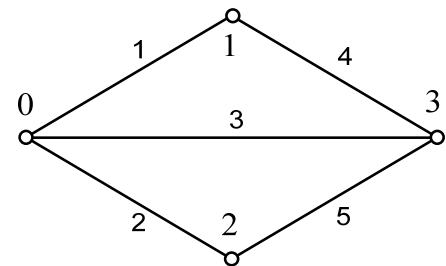
□ □ □

Задача 4.8. Да се реши задачата 4.7 со примена на методот на јазлови потенцијали.

Решение

Индексите (нумерацијата) на јазлите и гранките ги задржуваме исти како во задачата 4.5. Но сега гранките на мрежата ема да ги делиме на гранки на стебло и на спојници (слика 4.8.1).

Според методот на јазлови потенцијали за мрежата од сликата 4.8.1 можеме да го напишеме следната матрична релација:



Слика 4.8.1. Граф на мрежата.

$$\begin{pmatrix} \underline{Y}_{00} & \underline{Y}_{01} & \underline{Y}_{02} & \underline{Y}_{03} \\ \underline{Y}_{10} & \underline{Y}_{11} & 0 & \underline{Y}_{13} \\ \underline{Y}_{20} & 0 & \underline{Y}_{22} & \underline{Y}_{23} \\ \underline{Y}_{30} & \underline{Y}_{31} & \underline{Y}_{32} & \underline{Y}_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{V}_0 \\ \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \\ \underline{V}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{J}_0 \\ \underline{J}_1 \\ \underline{J}_2 \\ \underline{J}_3 \end{pmatrix}. \quad (4.8.1)$$

Релацијата (4.8.1) всушност претставува систем комплексни равенки кој ја дава врска помеѓу фазните напони на јазлите $\underline{V}$, ($V_j = U_j/\sqrt{3}$; $j = 1, n$), инјектираните струи во јазлите $\underline{J}$ и елементите на матрицата на адмитанции на мрежата $\underline{Y}$:

кој ни дава врска помеѓу фазните напони на јазлите и инјектираните струи во нив.

Како што е познато за елементите на матрицата на адмитанции на јазлите $\underline{Y}$ важат следните правила:

- дијагоналниот елемент во редицата i е еднаков на сумата на адмитанциите на сите гранки кои го содржат јазелот i (во таа сума треба да се сметаат и адмитанциите на напречните гранки од еквивалентните шеми на водовите и трансформаторите доколку ги има);
- вондијагоналниот елемент во редицата i и колоната j е еднаков на негативната сума на адмитанциите на сите гранки кои едновременно ги содржат јазлите i и j (директни врски меѓу јазлите i и j).

На пример, според горните правила за одделни елементи од матрицата $\underline{Y}$ можеме да напишеме:

$$\underline{Y}_{00} = \frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2} + \frac{1}{\underline{Z}_3} = (0,069 - j0,211)\text{S}; \quad \underline{Y}_{01} = -\frac{1}{\underline{Z}_1} = (-0,024 + j0,075)\text{S}.$$

Применувајќи ја истата постапка за останатите елементи, за матрицата $\underline{Y}$ добиваме:

$$\underline{Y} = \begin{pmatrix} 0,069 - j0,211 & -0,024 + j0,075 & -0,029 + j0,090 & -0,015 + j0,045 \\ -0,024 + j0,075 & 0,040 - j0,134 & 0 & -0,015 + j0,058 \\ -0,029 + j0,090 & 0 & 0,059 - j0,181 & -0,029 + j0,090 \\ -0,015 + j0,045 & -0,015 + j0,058 & -0,029 + j0,090 & 0,059 - j0,194 \end{pmatrix} \text{S}.$$

Бидејќи напонот $U_0 = \sqrt{3} \cdot V_0$ во јазелот 0 е познат, нултата редица од системот равенки (4.8.1) можеме да ја испуштиме, а во останатите три равенки познатата вредност на напонот $\underline{V}_0$ ја префрламе на десната страна на равенките со што го добиваме следниот систем равенки:

$$\begin{pmatrix} \underline{Y}_{11} & 0 & \underline{Y}_{13} \\ 0 & \underline{Y}_{22} & \underline{Y}_{23} \\ \underline{Y}_{31} & \underline{Y}_{32} & \underline{Y}_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \\ \underline{V}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{J}_1 - \underline{V}_0 \underline{Y}_{10} \\ \underline{J}_2 - \underline{V}_0 \underline{Y}_{20} \\ \underline{J}_3 - \underline{V}_0 \underline{Y}_{30} \end{pmatrix}. \quad (4.8.2)$$

Инјектираната струја во јазелот i можеме да ја пресметаме со зададената моќност на потрошувачот во тој јазел и неговиот фазен напон:

$$\underline{J}_i = -\underline{J}_{Pi} = \frac{\underline{S}_{Pi}^*}{3 \cdot \underline{V}_i^*} = \frac{P_{Pi} - jQ_{Pi}}{3 \cdot \underline{V}_i^*}, \quad (4.8.3)$$

при што знакот минус е поради тоа што струјата не се инјектира во јазелот i туку излегува од него.

Заменувајќи ја релацијата (4.8.3) во (4.8.2) го добиваме следниот систем нелинеарни равенки:

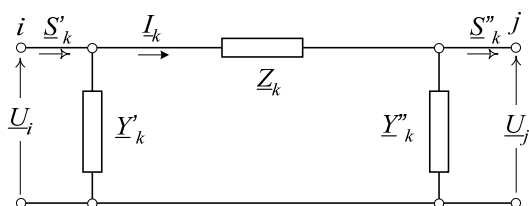
$$\begin{pmatrix} \underline{Y}_{11} & 0 & \underline{Y}_{13} \\ 0 & \underline{Y}_{22} & \underline{Y}_{23} \\ \underline{Y}_{31} & \underline{Y}_{32} & \underline{Y}_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \\ \underline{V}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{P_{P1} - jQ_{P1}}{3 \cdot \underline{V}_1^*} - \underline{V}_0 \underline{Y}_{10} \\ -\frac{P_{P2} - jQ_{P2}}{3 \cdot \underline{V}_2^*} - \underline{V}_0 \underline{Y}_{20} \\ -\frac{P_{P3} - jQ_{P3}}{3 \cdot \underline{V}_3^*} - \underline{V}_0 \underline{Y}_{30} \end{pmatrix}, \quad (4.8.4)$$

каде што непознати величини се напоните на јазлите со потрошувачите $\underline{V}_1$, $\underline{V}_2$ и $\underline{V}_3$, додека за фазниот напон на напојниот јазел имаме $\underline{V}_0 = \frac{\underline{U}_0}{\sqrt{3}} = \frac{112}{\sqrt{3}} \text{ kV}$.

Системот равенки (4.8.4) може да се реши со примена на готови математички софтверски пакети како што е на пример Mathcad, Matlab и сл. Притоа се добива следното решение:

$$\underline{U}_1 = (110,1858 - j2,6463) \text{ kV}; \quad \underline{U}_2 = (110,3857 - j1,3623) \text{ kV} \text{ и } \underline{U}_3 = (109,9791 - j2,1281) \text{ kV}.$$

Познавајќи ги напоните во сите јазли, тековите на моќност се пресметуваат идентично како во задачата 4.7. Ако гранката $k (i - j)$ што ги поврзува јазлите i и j можеме, во општ случај, да ја претставиме со една π -заменска шема како на сликата 4.8.2, тогаш можеме да пишуваме:



$$\underline{I}_k = \frac{\underline{V}_i - \underline{V}_j}{\underline{Z}_k} = \frac{\underline{U}_i - \underline{U}_j}{\sqrt{3} \cdot \underline{Z}_k}. \quad (4.8.4)$$

Слика 4.8.2. π – заменска шема на гранка

$$\underline{S}'_k = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_i \cdot (\underline{I}_k + \underline{Y}'_k \cdot \underline{U}_i)^*; \quad (4.8.5)$$

$$\underline{S}''_k = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_j \cdot (\underline{I}_k + \underline{Y}''_k \cdot \underline{U}_j)^*. \quad (4.8.6)$$

каде што со $\underline{I}_k$ е означена струјата во редната гранка, со $\underline{S}'_k$ и $\underline{S}''_k$ се означени привидните моќности на почетокот и на крајот на гранката, додека $\underline{Z}_k$, $\underline{Y}'_k$ и $\underline{Y}''_k$ се редната импеданција и напречните адмитанции на почетокот и крајот од π -еквивалентната шема на гранката, во согласност со сликата 4.8.2.

Применувајќи ги релациите (4.8.4) ÷ (4.8.6), при што напречните адмитанции се нули, добиваме практично исти резултати како во задачата 4.7.

□ □ □

Задача 4.9: Со методот на контурни моќности да се одреди приближната распределбата на моќности во прикажаната мрежа. Познати се следните податоци:

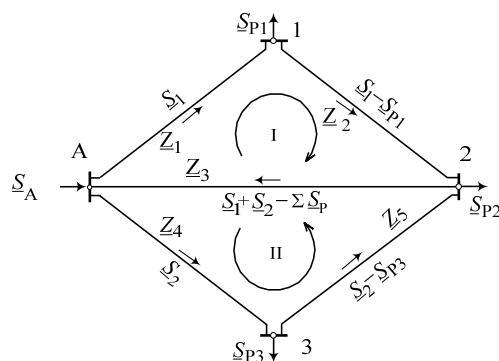
$$\underline{Z}_1 = (6 + j6) \Omega; \quad \underline{Z}_2 = (10 + j12) \Omega;$$

$$\underline{Z}_3 = (10 + j15) \Omega; \quad \underline{Z}_4 = (8 + j10) \Omega;$$

$$\underline{Z}_5 = (15 + j20) \Omega;$$

$$\underline{S}_{P1} = (30 + j10) \text{ MVA}; \quad \underline{S}_{P2} = (10 + j10) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{P3} = (20 + j10) \text{ MVA}; \quad \Sigma \underline{S}_P = (60 + j30) \text{ MVA}.$$



Решение

Слика 4.9.1. Ориентиран граф на мрежата

Прикажаната мрежа има две независни контури, па според тоа ќе има и две контурни моќности $\underline{S}_1$ и $\underline{S}_2$. За двете контури од мрежата можеме да ги напишеме следните равенки:

$$\underline{Z}_1^* \cdot \underline{S}_1 + \underline{Z}_2^* \cdot (\underline{S}_1 - \underline{S}_{P1}) + \underline{Z}_3^* \cdot (\underline{S}_1 + \underline{S}_2 - \Sigma \underline{S}_P) = 0;$$

$$\underline{Z}_4^* \cdot \underline{S}_2 + \underline{Z}_5^* \cdot (\underline{S}_2 - \underline{S}_{P3}) + \underline{Z}_3^* \cdot (\underline{S}_1 + \underline{S}_2 - \Sigma \underline{S}_P) = 0;$$

или:

$$\underline{Z}_{11}^* \cdot \underline{S}_1 + \underline{Z}_{12}^* \cdot \underline{S}_2 = \underline{A}_1 = \underline{S}_{P1} \cdot \underline{Z}_2^* + \sum \underline{S}_P \cdot \underline{Z}_3^*;$$

$$\underline{Z}_{12}^* \cdot \underline{S}_1 + \underline{Z}_{22}^* \cdot \underline{S}_2 = \underline{A}_2 = \underline{S}_{P3} \cdot \underline{Z}_5^* + \sum \underline{S}_P \cdot \underline{Z}_3^*.$$

каде што е:

$$\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3; \quad \underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21} = \underline{Z}_3; \quad \underline{Z}_{22} = \underline{Z}_4 + \underline{Z}_5 + \underline{Z}_3.$$

Во конкретниов случај ги добиваме следните бројни вредности:

$$\underline{Z}_{11} = (26 + j33) = 42,012 \cdot e^{j51,76^\circ} \Omega;$$

$$\underline{Z}_{12} = (10 + j15) = 18,028 \cdot e^{j56,31^\circ} \Omega;$$

$$\underline{Z}_{22} = (33 + j45) = 55,803 \cdot e^{j53,75^\circ} \Omega;$$

$$\underline{A}_1 = (1470 - j860) \text{ MVA} \cdot \Omega;$$

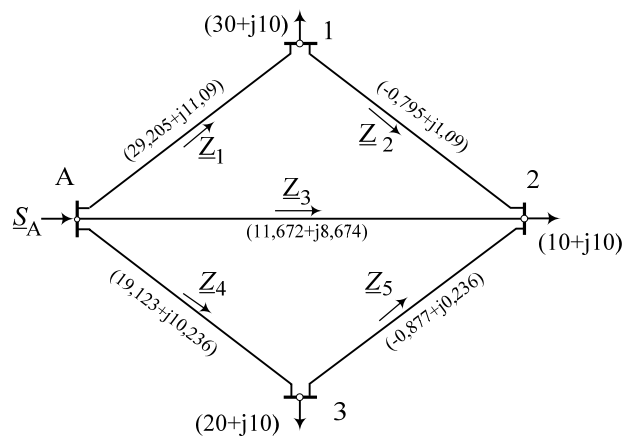
$$\underline{A}_2 = (1550 - j850) \text{ MVA} \cdot \Omega.$$

Решението на системот контурни равенки гласи:

$$\underline{S}_1 = \frac{\underline{A}_1 \cdot \underline{Z}_{22}^* - \underline{A}_2 \cdot \underline{Z}_{12}^*}{\underline{Z}_{11}^* \cdot \underline{Z}_{22}^* - (\underline{Z}_{12}^*)^2} = (29,205 + j11,09) \text{ MVA},$$

$$\underline{S}_2 = \frac{-\underline{A}_1 \cdot \underline{Z}_{12}^* + \underline{A}_2 \cdot \underline{Z}_{11}^*}{\underline{Z}_{11}^* \cdot \underline{Z}_{22}^* - (\underline{Z}_{12}^*)^2} = (19,123 + j10,236) \text{ MVA}.$$

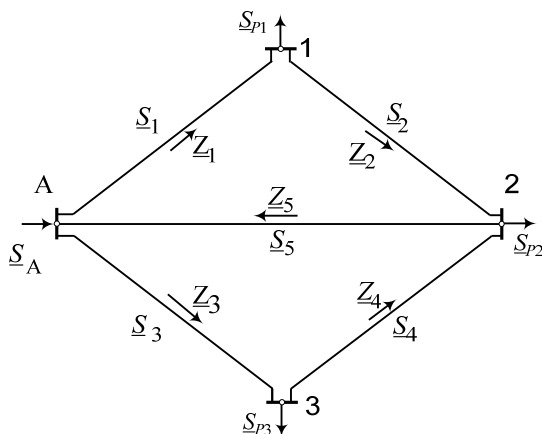
На сликата 4.9.2 е прикажана распределбата на моќности во дадената мрежа.



Слика 4.9.2. Текови на моќностите во мрежата

□ □ □

Задача 4.10: 110 kV мрежа сложено-затворена е прикажана на сликата 4.10.1. Познати се моќностите на потрошувачите во собирниците 1, 2 и 3, зададени во MVA, како и импеданциите на поедините водови, изразени во Ω . Да се одреди распределбата на моќности во мрежата.



$$\underline{Z}_1 = (10 + j20) \Omega$$

$$\underline{Z}_2 = (5 + j10) \Omega$$

$$\underline{Z}_3 = (10 + j20) \Omega$$

$$\underline{Z}_4 = (6 + j12) \Omega$$

$$\underline{Z}_5 = (20 + j40) \Omega$$

$$\underline{S}_{P1} = (10 + j5) \text{ MVA}$$

$$\underline{S}_{P2} = (30 + j20) \text{ MVA}$$

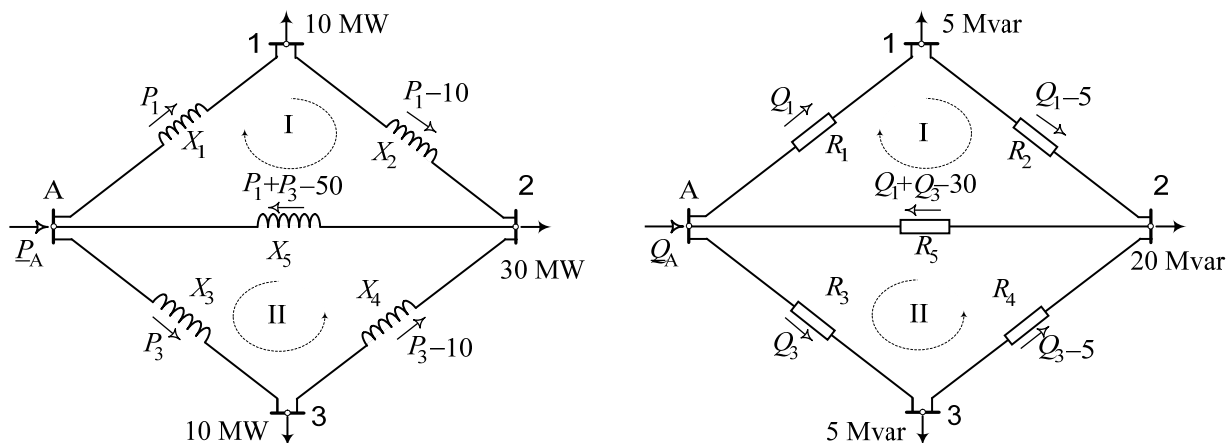
$$\underline{S}_{P3} = (10 + j5) \text{ MVA}$$

Слика 4.10.1. 110 kV мрежа со две независни контури

Решение

Бидејќи мрежата е хомогена (водовите имаат иста подолжна импеданција), можеме да го примениме методот на раздвојување. Значи, ќе формираме две шеми (слика 4.10.2).

Шемата од сликата 4.10.2.а, составена само од реактанциите на елементите, ќе ни служи за определување на распределбата на активните моќности, додека шемата од сликата 4.10.2.б, составена само од активните отпорности (резистанциите), ќе ни послужи за определување на тековите на реактивните моќности.



а) шема на реактанции и активни моќности

б) шема на резистанции и реактивни моќности

Слика 4.10.2. Раздвојување на хомогената мрежа

Со примена на Кирхофовите закони, за мрежата од шема а) ги пишуваме равенките :

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

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

или во среден облик:

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

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

Решението на овој систем равенки ќе биде:

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

На сличен начин, за шемата б) ги пишуваме равенките:

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

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

или:

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

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

од каде што се добива:

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

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

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

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

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

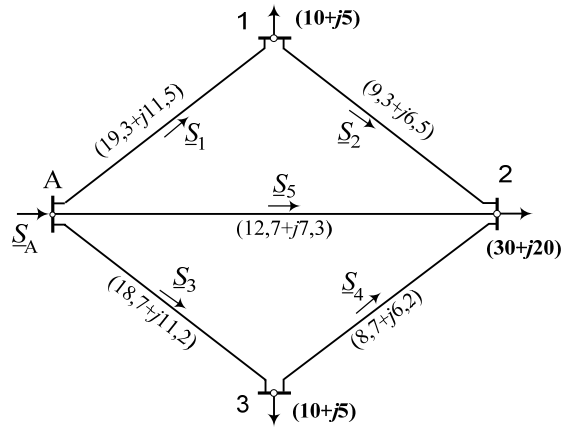
$$\underline{S}_2 \equiv \underline{S}_{1-2} = \underline{S}_1 - \underline{S}_{P1} = (19,3 + j11,5) - (10 + j5) = (9,3 + j6,5) \text{ MVA},$$

$$\underline{S}_4 \equiv \underline{S}_{3-2} = \underline{S}_3 - \underline{S}_{P3} = (18,7 + j11,2) - (10 + j5) = (8,7 + j6,2) \text{ MVA}.$$

$$\underline{S}_5 \equiv \underline{S}_{2-A} = \underline{S}_1 + \underline{S}_3 - \Sigma \underline{S}_P = (38 + j22,7) - (50 + j30) = (-12 - j7,3) \text{ MVA, т.е.}$$

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

Распределбата на комплексните моќности во зададената мрежа е прикажана на сликата 4.10.3.



Слика 4.10.2. Интегрална распределба на моќности во мрежата

□ □ □

Задача 4.11. На сликата е прикажан 110 kV систем. Системот се напојува од собирницата А, чиј што напон се држи на константна вредност $U_A = 115 \text{ kV}$. Потрошувачите $\underline{S}_{P1} = (30 + j15) \text{ MVA}$ и $\underline{S}_{P2} = (20 + j5) \text{ MVA}$ се напојуваат од трансформаторските станици TS1 и TS2 во кои се инсталирани трансформатори со моќности $2 \times 25 \text{ MVA}$ и $2 \times 16 \text{ MVA}$ респективно. За дадениот режим на работа да се определи распределбата на моќности и напони во системот.

Податоци за елементите од системот:

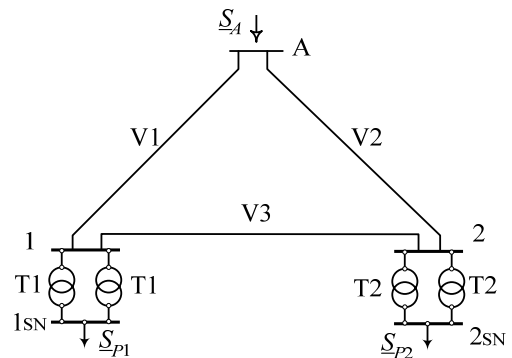
V1: $\underline{z}_1 = (0,27 + j0,423) \Omega/\text{km}$; $b_1 = 2,69 \mu\text{S}/\text{km}$; $l_1 = 50 \text{ km}$

V2: $\underline{z}_2 = (0,21 + j0,416) \Omega/\text{km}$; $b_2 = 2,74 \mu\text{S}/\text{km}$; $l_2 = 40 \text{ km}$

V3: $\underline{z}_3 = (0,45 + j0,440) \Omega/\text{km}$; $b_3 = 2,58 \mu\text{S}/\text{km}$; $l_3 = 25 \text{ km}$

T1: 110/10,5 kV; 25 MVA; $u_k\% = 10,5\%$; $\Delta P_{Cun} = 120 \text{ kW}$; $\Delta P_{Fe} = 36 \text{ kW}$; $i_0 = 0,8\%$;

T2: 110/10,5 kV; 16 MVA; $u_k\% = 10,5\%$; $\Delta P_{Cun} = 85 \text{ kW}$; $\Delta P_{Fe} = 26 \text{ kW}$; $i_0 = 0,85\%$



Слика 4.11.1. 110 kV систем

Решение

Пред да започнеме со решавањето на мрежата, најнапред, потрошувачите $\underline{S}_{P1}$ и $\underline{S}_{P2}$, заедно со соодветните загуби на моќност $\Delta \underline{S}_{TS1}$ и $\Delta \underline{S}_{TS2}$ во групите трансформатори $2 \times T1$ и $2 \times T2$, ќе ги претставиме со соодветни "еквивалентни" потрошувачи $\underline{S}'_{P1}$ и $\underline{S}'_{P2}$:

$$\underline{S}'_{P1} = \underline{S}_{P1} + \Delta \underline{S}_{TS1} = (30 + j15) + (0,18 + j2,76) = (30,18 + j17,76) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}'_{P2} = \underline{S}_{P2} + \Delta \underline{S}_{TS2} = (20 + j5) + (0,12 + j1,67) = (20,12 + j6,67) \text{ MVA}.$$

Притоа загубите $\Delta \underline{S}_{TS1}$ и $\Delta \underline{S}_{TS2}$ во групите трансформатори $2 \times T1$ и $2 \times T2$ се пресметани на начин како што е тоа направено во задачата 2.35.

Погонскиот капацитет на водовите ќе го уважаме приближно, на тој начин што ќе сметаме (согласно со π -еквивалентната шема на водовите) дека во обата краја од секој вод се инјектира реактивна моќност која приближно изнесува:

$$Q'_C \approx Q''_C \approx \frac{1}{2} Q_C \approx \frac{1}{2} b \cdot l \cdot U_n^2 \dots$$

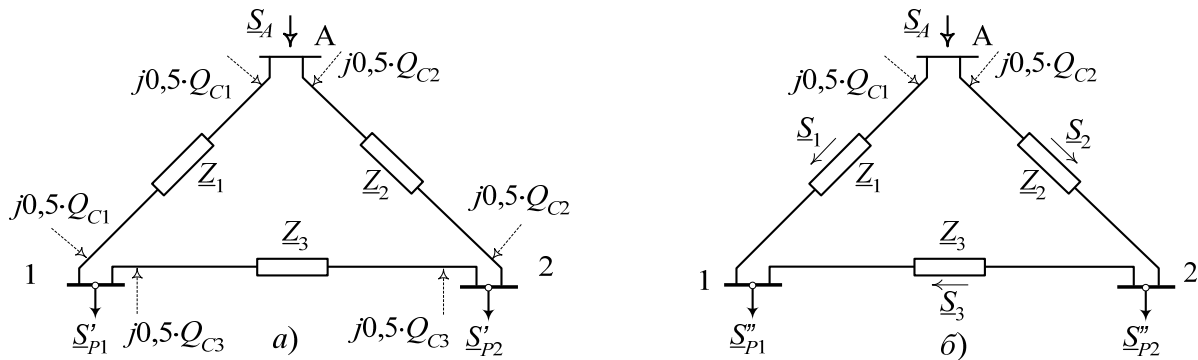
Со оглед на горе реченото, за поедините водови ќе имаме:

$$\frac{1}{2} \cdot Q_{C1} = 0,5 \cdot 2,69 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 110^2 = 0,814 \text{ Mvar},$$

$$\frac{1}{2} \cdot Q_{C2} = 0,5 \cdot 2,74 \cdot 10^{-6} \cdot 40 \cdot 110^2 = 0,663 \text{ Mvar},$$

$$\frac{1}{2} \cdot Q_{C3} = 0,5 \cdot 2,58 \cdot 10^{-6} \cdot 25 \cdot 110^2 = 0,390 \text{ Mvar}.$$

На таков начин ги добиваме следните две слики:



Слика 4.11.2. Еквиваленти на мрежата од слика 4.11.1

Во согласност со сликата 4.11.2, моќностите $\underline{S}_{P1}''$ и $\underline{S}_{P2}''$ изнесуваат:

$$\underline{S}_{P1}'' = \underline{S}_{P1}' - j(Q_{C1} + Q_{C3})/2 = (30,18 + j15,55) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{P2}'' = \underline{S}_{P2}' - j(Q_{C2} + Q_{C3})/2 = (20,12 + j5,61) \text{ MVA}.$$

Понатаму, со помош на познатите формули ја одредуваме приближната распределба на моќности во редните гранки од мрежата:

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_{P1}'' \cdot \frac{(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3)^*}{(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3)^*} + \underline{S}_{P2}'' \cdot \frac{(\underline{Z}_2)^*}{(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3)^*};$$

$$\underline{S}_1 = (24,4 + j10,2) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_2 = \underline{S}_{P1}'' + \underline{S}_{P2}'' - \underline{S}_1 = (25,9 + j11,97) \text{ MVA},$$

$$\underline{S}_3 = \underline{S}_2 - \underline{S}_{P2}'' = (5,78 + j6,36) \text{ MVA}.$$

Значи, јазелот 1 претставува разделна точка истовремено како за активни така и за реактивни моќности. Сега можеме да ги уважаме и загубите на моќност во поедините водови:

$$\underline{\Delta S}_1 = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_n^2} \cdot \underline{Z}_1 = \frac{24,4^2 + 10,2^2}{110^2} \cdot (13,5 + j21,15);$$

$$\underline{\Delta S}_1 = (0,78 + j1,22) \text{ MVA},$$

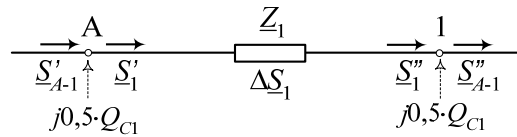
$$\underline{\Delta S}_2 = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_n^2} \cdot \underline{Z}_2 = \frac{25,9^2 + 11,97^2}{110^2} \cdot (8,4 + j16,56);$$

$$\underline{\Delta S}_2 = (0,56 + j1,12) \text{ MVA},$$

$$\underline{\Delta S}_3 = \frac{P_3^2 + Q_3^2}{U_n^2} \cdot \underline{Z}_3 = \frac{5,78^2 + 6,36^2}{110^2} \cdot (11,25 + j11);$$

$$\underline{\Delta S}_3 = (0,069 + j0,067) \text{ MVA}.$$

Тргувајќи од разделната точка према напојниот јазел, ја одредуваме точната распределба на моќности во мрежата, најнапред во водот В1, а потоа и во останатите водови. Притоа ознаките за моќностите на почетокот и крајот од водовите се во согласност со сликата 4.11.3:



Слика 4.11.2. Пресметка на распределбата на моќности во водот V1

$$\underline{S}_1'' = \underline{S}_1 = (24,4 + j10,2) \text{ MVA}; \quad \underline{S}_1' = \underline{S}_1'' + \underline{\Delta S}_1 = (25,18 + j11,42) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{A-1}'' = \underline{S}_1'' + j0,5 \cdot Q_{C1} = (24,40 + j11,14) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{A-1}' = \underline{S}_1' - j0,5 \cdot Q_{C1} = (25,18 + j10,606) \text{ MVA}.$$

Слично се добиваат и моќностите во останатите водови V3 и V2:

$$\underline{S}_3'' = \underline{S}_3 = (5,78 + j6,36) \text{ MVA}; \quad \underline{S}_3' = \underline{S}_3'' + \underline{\Delta S}_3 = (5,85 + j6,43) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{2-3}'' = \underline{S}_3'' + j0,5 \cdot Q_{C3} = (5,78 + j6,75) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{2-3}' = \underline{S}_3' - j0,5 \cdot Q_{C3} = (5,85 + j6,04) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_2'' = \underline{S}_3' + \underline{S}_{P2} = (25,97 + j12,04) \text{ MVA}; \quad \underline{S}_2' = \underline{S}_2'' + \underline{\Delta S}_2 = (26,53 + j13,16) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{A-2}'' = \underline{S}_2'' + j0,5 \cdot Q_{C2} = (25,97 + j12,703) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{A-2}' = \underline{S}_2' - j0,5 \cdot Q_{C2} = (26,53 + j12,497) \text{ MVA}.$$

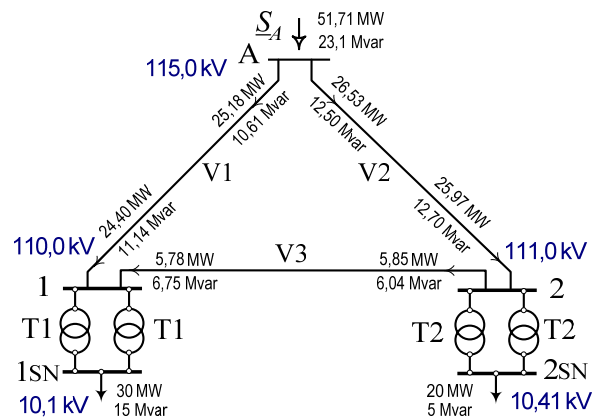
Моќноста $\underline{S}_A$ што се вложува во системот ќе биде:

$$\underline{S}_A = \underline{S}_{A-1}' + \underline{S}_{A-2}' = (51,71 + j23,1) \text{ MVA}.$$

Вкупните загуби на моќност $\underline{\Delta S}$ во системот ќе бидат:

$$\underline{\Delta S} = \underline{S}_A - \underline{S}_{P1} - \underline{S}_{P2} = (1,71 + j3,1) \text{ MVA}.$$

На сликата 4.11.4 е прикажана вкупната распределба на моќностите во мрежата:



Слика 4.11.4. Распределба на моќностите во мрежата

После ова, можеме да пристапиме кон пресметувањето на напоните во јазлите од мрежата:

Падот на напон во водот V1 ќе изнесува:

$$\underline{\Delta U}_1 = \frac{P_1' \cdot R_1 + Q_1' \cdot X_1}{U_A} + j \frac{P_1' \cdot X_1 - Q_1' \cdot R_1}{U_A} = (5,06 + j3,44) \text{ kV},$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_A - \underline{\Delta U}_1 = (109,94 - j3,44) \text{ kV} = 110 \cdot e^{-j1,79^\circ} \text{ kV}.$$

Падот на напон во водот V2 ќе изнесува:

$$\Delta \underline{U}_2 = \frac{P_2' \cdot R_2 + Q_2' \cdot X_2}{U_A} + j \frac{P_2' \cdot X_2 - Q_2' \cdot R_2}{U_A} = (3,85 + j2,88) \text{ kV},$$

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_A - \Delta \underline{U}_2 = (111,16 - j2,88) \text{ kV} = 111 \cdot e^{-j1,49^\circ} \text{ kV}.$$

За определувањето на напоните $\underline{U}_{1SN}$ и $\underline{U}_{2SN}$ при потрошувачите, потребно е да се одредат и падовите на напон во трансформаторите T1 и T2. Нив ги одредуваме со помош на соодветните I-еквивалентни шеми на трансформаторите. Параметрите на подолжните гранки на трансформаторите ќе бидат:

$$R_{T1} = \Delta P_{Cun} \cdot \frac{U_n^2}{S_n^2} = 0,12 \cdot \frac{110^2}{25^2} = 2,26 \text{ } \Omega;$$

$$X_{T1} = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{110^2}{25} = 56,03 \text{ } \Omega,$$

$$\underline{Z}_{T1} = (R_{T1} + jX_{T1}) = (2,56 + j56,03) \text{ } \Omega.$$

Слично се добива и за другиот трансформатор:

$$R_{T2} = 4,43 \text{ } \Omega ; \quad X_{T2} = 87,55 \text{ } \Omega ; \quad \underline{Z}_{T2} = (4,43 + j87,55) \text{ } \Omega.$$

Понатаму имаме:

$$\Delta \underline{U}_{T1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{P1} \cdot R_{T1} + Q_{P1} \cdot X_{T1}}{U_1} + j \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{P1} \cdot X_{T1} - Q_{P1} \cdot R_{T1}}{U_1},$$

$$\Delta \underline{U}_{T1} = (4,87 + j8,23) \text{ kV}.$$

Напонот во јазелот "1SN", сведен на високонапонска страна, ќе биде:

$$\underline{U}'_{1SN} = \underline{U}_1 - \Delta \underline{U}_{T1} = (105,07 - j11,67) \text{ kV} = 105,71 \cdot e^{-j6,34^\circ} \text{ kV}.$$

Неговата вистинска вредност ќе биде:

$$\underline{U}_{1SN} = \underline{U}'_{1SN} / k_{T1} = 105,71 \cdot (10,5/110) = 10,1 \cdot e^{-j6,34^\circ} \text{ kV}.$$

Слично ќе имаме и во јазелот "2SN":

$$\Delta \underline{U}_{T2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{P2} \cdot R_{T2} + Q_{P2} \cdot X_{T2}}{U_2} + j \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{P2} \cdot X_{T2} - Q_{P2} \cdot R_{T2}}{U_2},$$

$$\Delta \underline{U}_{T2} = (2,61 + j7,81) \text{ kV},$$

$$\underline{U}'_{2SN} = \underline{U}_2 - \Delta \underline{U}_{T2} = (108,54 - j10,69) \text{ kV} = 109,1 \cdot e^{-j5,62^\circ} \text{ kV}.$$

$$\underline{U}_{2SN} = \underline{U}'_{2SN} / k_{T2} = 109,1 \cdot (10,5/110) = 10,41 \cdot e^{-j5,62^\circ} \text{ kV}.$$

□ □ □

Задача бр. 4.12. Се посматра примерот обработуван во задачата 2.35. Сумарното оптоварување на трафостаницата изнесува $\underline{S}_{T\Sigma} = (P_{T\Sigma} + jQ_{T\Sigma}) = (50 + j24,22) \text{ MVA}$.

Трансформаторите T1 и T2 работат одвоено на секундарната (CH) страна, со различни преносни односи k_{T1} и k_{T2} и се различно оптоварени, како што следи:

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

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

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

$$k_{T2} = k_{T2n} = W_1 / W_2 = 110 \cdot (1 + 0 \times 1,25\%) / 10,5 = 10,4762.$$

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

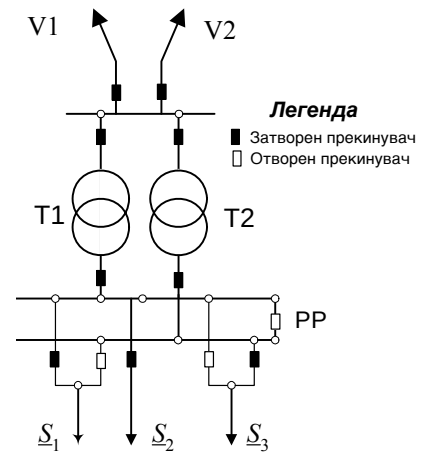
$$\Delta P_{T\Sigma} = \Delta P_{T1} + \Delta P_{T2} = 182,53 + 101,13 = 283,66 \text{ kW}.$$

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

Бројни вредносѝи:

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

Решение:



Слика 4.12.1

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

$$\underline{S}_{T\Sigma} = (P_{T\Sigma} + jQ_{T\Sigma}) = (50 + j24,22) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{T1} = \underline{S}_{T\Sigma} / 2 = (P_{T1} + jQ_{T1}) = (25 + j12,11) \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{T2} = \underline{S}_{T\Sigma} / 2 = (P_{T2} + jQ_{T2}) = (25 + j12,11) \text{ MVA}.$$

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

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

Но во случајов поради тоа што е $k_{T1} \neq k_{T2}$, во контурата образувана од трансформаторите ќе се јави дополнителна ЕМС $\Delta \underline{E}$:

$$\Delta \underline{E} = \sqrt{3} \cdot \Delta \underline{E}_f = \underline{U}_2 \cdot (k_{T2} / k_{T1} - 1).$$

Таа ќе протера низ контурата струја на урамнотежување $\underline{I}_{ur}$ чија што вредност, во согласност со сликата 4.12.2, ќе ја добиеме на следниот начин. Најнапред ќе го пресметаме напонот $\underline{U}_2$ на СН собирница под услов обата трансформатора да работат со своите номинални преносни односи.

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

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

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

$$\Delta \underline{U}_d = \frac{P_{T1} \cdot R_{T1} + Q_{T1} \cdot X_{T1}}{\underline{U}_n} = 0,384 \text{ kV}; \quad \Delta \underline{U}_q = \frac{P_{T1} \cdot X_{T1} - Q_{T1} \cdot R_{T1}}{\underline{U}_n} = 1,41 \text{ kV};$$

$$\Delta \underline{U}_{T1} = \Delta \underline{U}_d + \Delta \underline{U}_q^2 / (2 \underline{U}_n) = 0,479 \text{ kV};$$

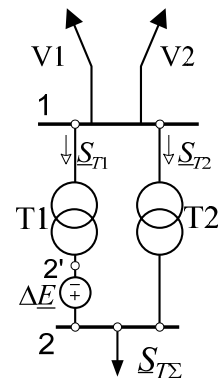
$$\underline{U}_2 = \underline{U}_{1, \text{сведено}} - \Delta \underline{U}_{T1} = 10,021 \text{ kV};$$

$$\Delta \underline{E} = \underline{U}_2 \cdot \left(\frac{k_{T2}}{k_{T1}} - 1 \right) = 10,021 \cdot \left(\frac{10,738}{9,952} - 1 \right) = 0,791 \text{ kV}.$$

$$\underline{I}_{ur} = \Delta \underline{E}_f / (\underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{T2}) = (0,036 - j0,752) \text{ kA}.$$

На струјата $\underline{I}_{ur}$ одговара моќноста на урамнотежување $\underline{S}_{ur}$:

$$\underline{S}_{ur} = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_2 \cdot \underline{I}_{ur}^* = (0,655 + j13,668) \text{ MVA}.$$



Слика 4.12.2

Според тоа, моќносите $\underline{S}_{T1}$ и $\underline{S}_{T2}$ со коишто ќе бидат оптоварени трансформаторите T1 и T2 во овој режим ќе бидат:

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

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

За ваквата распределба коефициентите на оптоварување на трансформаторите ќе бидат: $\alpha_1 = 36,857/40 = 0,909$ и $\alpha_2 = 24,414/40 = 0,610$.

Соодветно на тоа, загубите во трансформаторите ќе бидат:

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

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

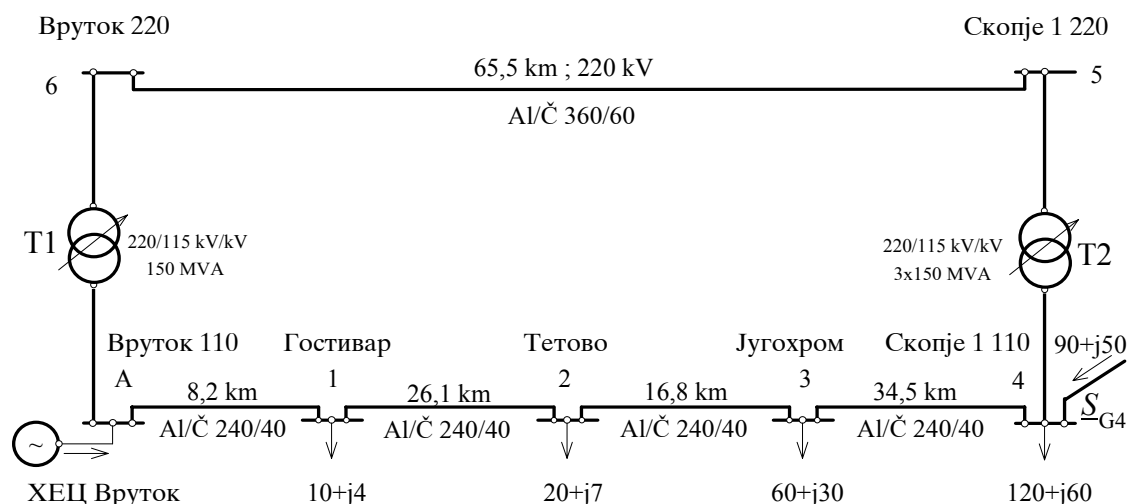
$$\Delta P_{T\Sigma} = \Delta P_{T1} + \Delta P_{T2} = 210,4 + 114,5 = 324,9 \text{ kW}.$$

Значи вкупните загуби во трансформацијата се поголеми од загубите што би се имале во режимот кога трансформаторите работат одвоено на секундарната страна за околу 16%. Покрај ова, се забележува дека првиот трансформатор е оптоварен за околу 50% повеќе од вториот и по степенот на оптовареност тој е блиску до својата термичка граница. Тоа се должи на појавата на струјата (моќноста) на урамнотежување.

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

□ □ □

Пример 4.13. Се посматра дел од високонапонската преносна мрежа на ЕЕС на Република Македонија, на потегот Вруток - Скопје, прикажан на сликата 4.13.1. Мрежата работи во карактеристичниот режим на "максимално оптоварување". Потребно е да се пресмета приближната распределба на моќности во мрежата, напонските прилики во неа и да се проценат вкупните загуби во прикажаниот режим. Податоците за оптоварувањата на потрошувачите се дадени во табелата 4.13.1, додека податоците за параметрите на елементите од мрежата (сведени на 110 kV страна) се дадени во табелата 4.13.2. Водот 220 kV "Вруток 220 – Скопје 1 220" има подолжни параметри $\underline{z} = (0,08 + j0,42) \Omega/\text{km}$ и $b = 2,62 \mu\text{S}/\text{km}$. Останатите водови се за 110 kV напон и имаат исти подолжни параметри: $\underline{z} = (0,123 + j0,40) \Omega/\text{km}$ и $b = 2,75 \mu\text{S}/\text{km}$.



Слика 4.13.1. Дел од ЕЕС на Република Македонија

Напонот во напојната точка "А" изнесува $U_A = 115 \text{ kV}$. За трансформаторите се познати следните податоци:

T1: 1 x 150 MVA (220±12x1,25%)/115 kV/kV $u_k\% = 10,9\%$;
T2: 3x150 MVA (220±12x1,25%)/115 kV/kV $u_k\% = 15,4\%$.

Табела 4.13.1. Податоци за потрошувачите во системот

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

Табела 4.13.2. Податоци за параметрите на елементите

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

Решение:

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

$$Q_{c1} = b \cdot U_n^2 \cdot (l_{A-1} + l_{1-2}) / 2 = 2,75 \cdot 10^{-6} \cdot 110^2 \cdot (8,2 + 26,1) / 2 = 0,57 \text{ Mvar};$$

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

$$Q_{c2} = b \cdot U_n^2 \cdot (l_{1-2} + l_{2-3}) / 2 = 2,75 \cdot 10^{-6} \cdot 110^2 \cdot (26,1 + 16,8) / 2 = 0,71 \text{ Mvar};$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

каде што е:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

од каде што следи:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\underline{S}_{A-6} = \underline{S}_{6-5} + \underline{S}_6 = (45,35 + j20,58) + (0 - j3,80) = (45,35 + j16,78) \text{ MVA},$$

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

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

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

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

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

Понатаму имаме:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\underline{\Delta S}_{1-2} = \frac{P_{1-2}^2 + Q_{1-2}^2}{U_2^2} \cdot (R_2 + jX_2) - j \cdot b \cdot \frac{l_{1-2}}{2} \cdot (U_1^2 + U_2^2),$$

$$\underline{\Delta S}_{1-2} = \frac{65,04^2 + 21,74^2}{109,96^2} \cdot (3,21 + j10,44) - j2,75 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{26,1}{2} \cdot (109,96^2 + 113,66^2) = (1,25 + j3,17) \text{ MVA}.$$

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

$$\underline{S}'_{1-2} = \underline{S}_{1-2} + \underline{\Delta S}_{1-2} = (65,04 + j22,17) + (1,25 + j3,17)$$

$$\underline{S}'_{1-2} = (66,29 + j25,34) \text{ MVA}.$$

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

Конечниот резултат од пресметките на тековите на уточнетите моќности во сите гранки од мрежата е прикажан во табелата 4.13.3. Во истата табела се прикажани и егзактните вредности на моќностите и напоните од разгледуваниот систем, добиени со помош на компјутер, со една итеративна постапка која дава точни резултати.

Табела 4.13.3. Резултати од пресметките на напоните и тековите на моќности (заокружени на една децмала) приближни и точни

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

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

□ □ □

Пример 4.14. Се посматра мрежата од примерот 4.13, во истиот режим на работа. Да се определи распределбата на моќности и напонските прилики во системот доколку на трансформаторот T1 му се промени преносниот однос, така што тој ќе работи со преносен однос $k_{T1} = 231/115 \text{ kV/kV}$, додека преносниот однос на трансформаторот T2 останува и понатаму неизменет $k_{T2} = k_{T2n} = 220/115 \text{ kV/kV}$.

Решение:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \underline{S}_{1-2} &= \underline{S}_{A-1} - \underline{S}_1 = (72,23 + j12,60) - (10,0 + j3,43); & \underline{S}_{1-2} &= (62,23 + j9,17) \text{ MVA}, \\ \underline{S}_{2-3} &= \underline{S}_{1-2} - \underline{S}_2 = (62,23 + j9,17) - (20,0 + j6,29); & \underline{S}_{2-3} &= (42,23 + j2,88) \text{ MVA}, \\ \underline{S}_{4-3} &= \underline{S}_3 - \underline{S}_{2-3} = (60,0 + j29,14) - (42,23 + j2,88); & \underline{S}_{4-3} &= (17,77 + j26,27) \text{ MVA}, \\ \underline{S}_{5-4} &= \underline{S}_{4-3} + \underline{S}_4 = (17,77 + j26,27) + (30,0 + j9,43); & \underline{S}_{5-4} &= (47,77 + j35,69) \text{ MVA}, \\ \underline{S}_{6-5} &= \underline{S}_{5-4} + \underline{S}_5 = (47,77 + j35,69) + (0 - j3,80); & \underline{S}_{6-5} &= (47,77 + j31,89) \text{ MVA}. \end{aligned}$$

Од добиените резултати се гледа дека јазелот "3" (Југохром) повторно ќе биде точка на раздел. По определувањето на точката на раздел следи процедурата за пресметување на напоните и уточнетите вредности на тековите на моќности низ мрежата, на наполно ист начин како во претходниот пример. Како резултат на овие пресметки се добива резултат, прикажан во табелата 4.14.1 Во истата табела се дадени и точните вредности на моќностите низ гранките и напоните во јазлите, добиени со итеративна постапка.

Табела 4.13.4. Напоните и текови на моќности (заокружени на една децмала) – приближни и точни ($k_{T1} = 231/115 \text{ kV/kV}$; $k_{T2} = 220/115 \text{ kV/kV}$)

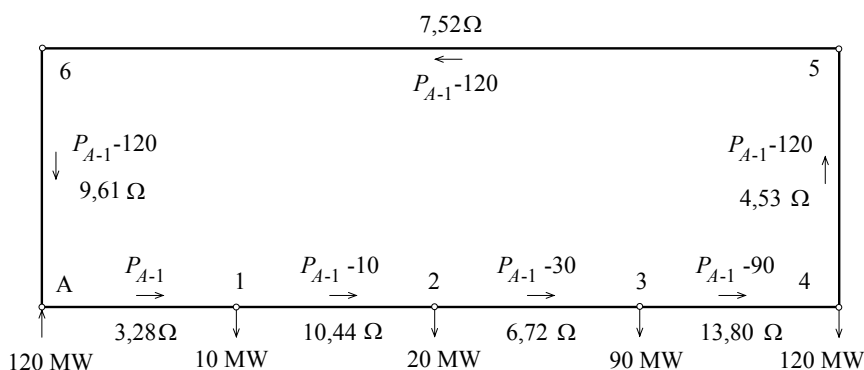
ред. бр.	Моќност (MVA)	Приближни резултати			Точни резултати		
		Почеток	Крај	$U \text{ (kV)}$	Почеток	Крај	$U \text{ (kV)}$
1	$\underline{S}_{A-1}$	74,0+j18,2	73,6+j17,0	114,0	74,2+j19,5	73,7+j18,2	113,8
2	$\underline{S}_{1-2}$	63,6+j13,0	62,5+j10,6	111,4	63,7+j14,2	62,7+j11,7	110,8
3	$\underline{S}_{2-3}$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

□ □ □

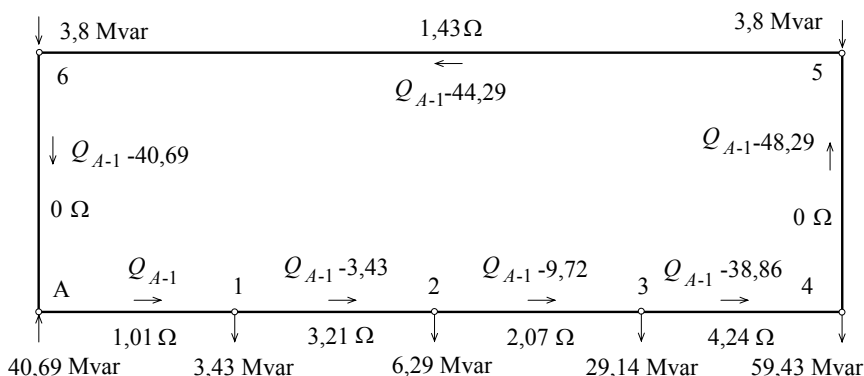
Пример 4.15. Се посматра мрежата од примерот 4.13. Со помош на методот на раздвојување на моќности да се определи распределбата на моќности и напонските прилики во системот. Обата трансформатора работат со номинален преносен однос $k_{T1} = k_{T2} = k_{Tn} = 220/115 \text{ kV/kV}$.

Решение:

Според овој метод, во хомогените или приближно хомогените мрежи, тековите на активните и реактивните моќности можат да се решаваат одделно. Притоа, тековите на активни моќности во контурата ќе ги добиеме со решавање на мрежата составена од реактанциите на елементите, во која постојат само активните оптоварувања. Слично, тековите на реактивните моќности во мрежата ќе ги добиеме на тој начин што ќе ја решаваме мрежата составена само од активните отпорности, кога во неа постојат само реактивните оптоварувања на потрошувачите. Значи, решавањето на оваа задача ќе се состои во одделно решавање на шемите прикажани на сликите 4.15.1 и 4.15.2.



Слика 4.15.1. Шема за пресметка на распределбата на активните моќности



Слика 4.15.2. Шема за пресметка на распределбата на реактивните моќности

Во шемата на слика 4.15.1 за непозната величина (моќност) ќе ја прогласиме моќноста P_{A-1} низ гранката "A-1". Моќностите низ останатите гранки од мрежата можеме да ги изразиме преку непознатата моќност P_{A-1} , применувајќи го I Кирхофов закон за секој јазел одделно. Потоа, врз основа на релацијата (5.27 а) ($\sum P_i \cdot X_i = 0$), која е директна последица од примената на II Кирхофов закон за контурата, ќе ја добиеме следната (приближна) равенка:

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

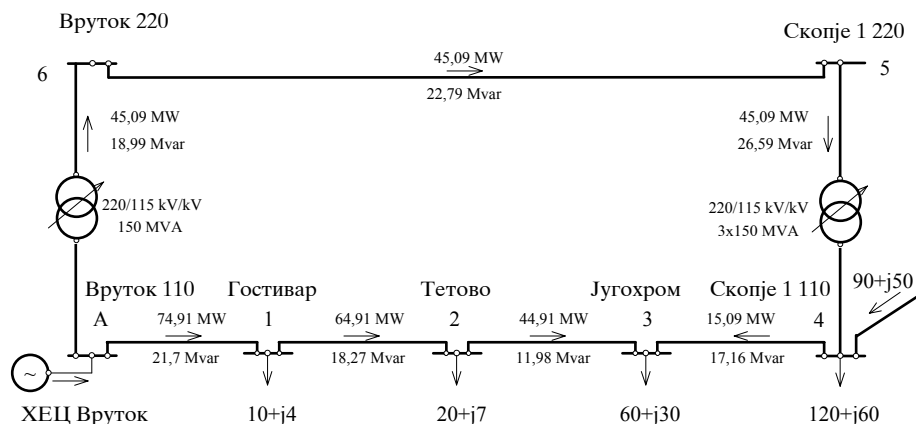
во која единствена непозната е моќноста P_{A-1} . Со нејзиното решавање добиваме:

$$P_{A-1} \cdot 3.28 + (P_{A-1} - 10) \cdot 10.44 + (P_{A-1} - 30) \cdot 6.72 + (P_{A-1} - 90) \cdot 13.8 + (P_{A-1} - 120) \cdot 21.66 = 0 \Rightarrow P_{A-1} = 74.91 \text{ MW}.$$

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

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

Конечната "интегрална" распределба на моќности во мрежата е прикажана на сликата 4.15.3.



Слика 4.15.3. Распределба на моќностите по првата фаза на пресметките

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

Понатамошниот тек на пресметките ("сечење" и отворање на прстенот, поделба на мрежата, пресметка на приближните вредности на напоните во јазлите, пресметка на загубите на моќност и уточнување на тековите на моќности низ гранките од мрежата) претставуваат втора фаза од пресметките и тие се изведуваат на напълно ист начин како што тоа беше направено во примерот 4.13. Резултатите од пресметките што се вршат во оваа фаза, заедно со точните резултати се прикажани во табелата 4.15.1.

Табела 4.15.1. Резултати од пресметките на напоните и тековите на моќности добиени со методот на раздвојување (заокружени на една децмала) – приближни и точни

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

□ □ □

6. ЗАГУБИ НА МОЌНОСТ И ЕНЕРГИЈА ВО ЕЛЕКТРИЧНИТЕ МРЕЖИ

Општо

Затворена е онаа мрежа која што содржи барем една затворена контура. Во таквите мрежи повеќето потрошувачи можат да се напојуваат со електрична енергија од најмалку две страни. Затворените мрежи кои се состојат од повеќе контури се викаат сложено–затворени

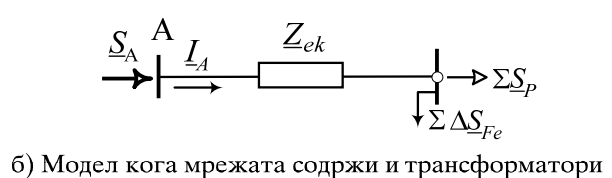
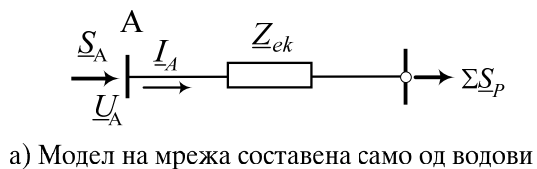
6.3. МЕТОД НА ЕКВИВАЛЕНТНА ОТПОРНОСТ

Кога во една мрежа или, пак, во дел од некоја мрежа не е неопходно да ја познаваме деталната состојба со која се опишани напонските и струјните прилики туку ни е доволно да ги знаеме само загубите на моќност односно енергија во неа, тогаш заради зголемување на брзината на пресметување и намалување на обемот на работата е згодно тој дел од мрежата да се замени со некаков негов еквивалент кој ќе има едноставна и компактна форма. Се разбира дека во тој случај, за да биде еквивалентирањето успешно, ќе биде неопходно загубите на моќност ΔS_{ek} во еквивалентната мрежа да бидат исти со вистинските загуби ΔS во реалната мрежа, т.е.:

$$\Delta S = \Delta S_{ek} = (\Delta P_{ek} + j\Delta Q_{ek}).$$

Со методот на еквивалентна отпорност (импеданција) е можно цела една мрежа, или пак дел од една постојна мрежа, заедно со нејзините потрошувачи, да се еквивалентира (замени) со друга, многу поедноставна мрежа. Притоа, како што беше нагласено, еквивалентот треба да биде таков што ќе овозможи загубите на моќност ΔS_{ek} во еквивалентната мрежа да бидат исти со вистинските загуби ΔS во реалната мрежа, т.е. $\Delta S = \Delta S_{ek}$.

Може да се покаже дека една СН мрежа составена само од водови може да се еквивалентира само со една единствена импеданција, како што е тоа прикажано на сликата 6.3.1а. Кога мрежата содржи и трансформатори тогаш покрај импеданцијата Z_{ek} еквивалентот на мрежата ќе содржи и еден фиктивен потрошувач со којшто се опфаќаат и загубите на моќност во трансформаторите коишто не зависат од оптоварувањето (загуби во железо), како на сликата 6.3.1б.



Слика 6.3.1 Еквивалентни модели на дистрибутивната мрежа:
а) мрежа составена само од водови; б) мрежа што содржи и трансформатори

Методот на еквивалентирање на мрежата често се користи за пресметување на загубите на моќност и енергија во разгранетите СН дистрибутивни мрежи кај кои е можно делови од дистрибутивната мрежа (нпр. цели изводи) да се прикажат компактирано без тоа да се одрази врз точноста на пресметките во останатиот дел од мрежата.

Ќе посматраме една дистрибутивна мрежа составена од n_g елементи (гранки). Со $Z(i) = R(i) + jX(i)$; ($i = 1, n_g$) ќе ги означиме импеданциите на редните гранки од одделните елементи во дистрибутивната мрежа. Доколку во мрежата постојат и трансформатори, тогаш со $S_{nT}(k)$, $\Delta P_{Cun}(k)$, $\Delta P_{Fe}(k)$ и $\Delta Q_{Fe}(k)$ ќе ги означиме номиналните параметри на k -тиот трансформатор.

Понатаму со $I_{\Sigma}(i)$; ($i = 1, n_g$) ќе ја означиме струјата низ i -тата гранка од мрежата. Во тој случај ако со I_A ја означиме струјата во напојната точка А, тогаш ќе биде:

$$I_A = I_\Sigma(1),$$

каде што со $I_\Sigma(1)$ е означена струјата во главната (напојна) делница.

Ако низ i -тиот елемент од мрежата со импеданција $Z(i) = R(i) + jX(i)$ тече струја $I_\Sigma(i)$, тогаш загубата на моќност $\Delta S(i)$ во водот ќе биде:

$$\Delta S(i) = 3 \cdot Z(i) \cdot I_\Sigma^2(i) = 3 \cdot Z(i) \cdot k_i^2 \cdot I_A^2.$$

Во последната релација со k_i е означен односот на струјата низ i -тата делница и струјата низ главната (напојна) делница, т.е.

$$k_i = \frac{I_\Sigma(i)}{I_A}. \quad (6.3.1)$$

Бидејќи напоните во мрежата малку се разликуваат од номионалниот напон и се блиски меѓусебе по големина, односот на струите (6.3.1) може, приближно, да се напише и на следниот начин:

$$k_i = \frac{I_\Sigma(i)}{I_A} = \frac{I_\Sigma(i)}{I_A} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} \approx \frac{S_\Sigma^*(i)}{S_A^*}; \Rightarrow k_i^2 \approx \frac{S_\Sigma^2(i)}{S_A^2}. \quad (6.3.2)$$

Во последната релација со S_A е означена сумарната моќност на мрежата т.е. моќноста во напојната делница додека со $S_\Sigma(i)$ е означена моќноста што тече низ i -тата делница од мрежата. Кога е мрежата со радијална структура, без контури, тогаш моќноста $S_\Sigma(i)$ е приближно еднаква на сумата на моќностите на сите потрошувачи што се напојуваат преку посматраната, i -та, делница. Од тука произлегува дека коефициентот $k_i = S_\Sigma(i)/S_A$ може да се нарече и "коефициент на учество" на потрошува чите се напојуваат преку посматраната, i -та, делница во вкупната моќност на мрежата S_A што тече низ главната делница.

Вкупните загуби во мрежата ΔS можеме ги поделиме на загуби коишто зависат од товарот (варијабилни загуби) ΔS_{var} и на загуби коишто не зависат од товарот (константни загуби) $\Delta S_{\text{const.}}$. Варијабилните загуби се остваруваат во водовите ΔS_V и во редните гранки од енергетските трансформатори (т.н. загуби во бакар ΔS_{Cu}). Загубите во мрежата коишто не зависат од оптоварувањето се всушност сумарните загуби во железото на енергетските трансформатори, т.е. $\Delta S_{\text{const.}} = \Sigma \Delta S_{Fe}$. На тој начин за загубите во мрежата ΔS можеме да пишуваме:

$$\Delta S = \Delta S_{\text{var}} + \Delta S_{\text{const.}} = \Delta S_{\text{var}} + \Sigma \Delta S_{Fe}.$$

Варијабилните загуби ΔS_{var} ќе се добијат со сумирање на загубите на моќност во сите редни гранки од мрежата, т.е.

$$\Delta S_{\text{var}} = \sum_{i=1}^{n_g} \Delta S(i) = \sum_{i=1}^{n_g} 3 \cdot Z(i) \cdot I_\Sigma^2(i) = 3 \cdot I_A^2 \cdot \sum_{i=1}^{n_g} 3 \cdot Z(i) \cdot \frac{I_\Sigma^2(i)}{I_A^2} = 3 \cdot I_A^2 \cdot \sum_{i=1}^{n_g} k_i^2 \cdot Z(i).$$

Ако ја воведеме ознаката:

$$Z_{ek} = \sum_{i=1}^{n_g} k_i^2 \cdot Z(i), \quad (6.3.3)$$

тогаш за варијабилните загуби можеме да пишуваме:

$$\Delta S_{\text{var}} = 3 \cdot Z_{ek} \cdot I_A^2.$$

Знаејќи ја еквивалентната импеданција на мрежата Z_{ek} , вкупните загуби во мрежата можеме да ги пресметаме на едноставен начин:

$$\Delta S = \Delta S_{\text{var}} + \Delta S_{\text{const.}} = 3 \cdot Z_{ek} \cdot I_A^2 + \Sigma \Delta S_{Fe}.$$

Значи еквивалентната импеданција на мрежата Z_{ek} се добива на едноставен начин со помош на релацијата (6.3.3). Притоа најголема тешкотија во нејзиното определување е пресметувањето на коефициентите на учество k_i . Но кај радијалните мрежи, какви што се најчесто СН и НН дистрибутивни мрежи, овие коефициенти се определуваат сосема едноставно со просто сумирање на моќностите што се напојуваат преку поедините делници од мрежата.

Од изразот (6.3.3) се заклучува дека еквивалентната импеданција на мрежата $\underline{Z}_{ek}$ не зависи само од параметрите на мрежата туку зависи и од просторната и временска распределба на товарот во неа. Бидејќи, во општ случај, распределбата на товарот во една мрежа не е константна туку, зависно од режимот на работа, во разни моменти на посматрање на мрежата таа е различна, произлегува дека и еквивалентната импеданција на мрежата $\underline{Z}_{ek}$ е во различни моменти на посматрање различна. Само во специјални случаи (кои за среќа се доста чести во практиката) таа распределба е константна или приближно константна.

Нас најчесто нè интересираат загубите на моќност во мрежата за режимот на максимално оптоварување бидејќи преку пресметаните загуби во тој режим се проценуваат и загубите на енергија во мрежата. Затоа режимот на максималното оптоварување обично се усвојува како карактеристичен за којшто се вршат пресметки на коефициентите на учество k_i и на вредноста на еквивалентната импеданција на мрежата $\underline{Z}_{ek}$.

Кога не постојат податоци врз основа на кои би била извршена деталната пресметка на состојбата во мрежата за даден режим на работа, се прибегнува кон поедноставување на пресметковната процедура и се воведуваат некои претпоставки. Една таква многу често воведувана, и сосема логична, претпоставка е усвојување на константни коефициенти на учество преку целиот ден. Имено ако се усвои претпоставката дека учеството на моќноста на секој потрошувач од мрежата во сумарната моќност $\underline{S}_A$ е пропорционално на инсталираната моќност на трансформаторот преку којшто тој се напојува тогаш ќе добиеме:

$$k_i = \frac{S_{\Sigma}(i)}{\underline{S}_A} = \frac{\sum_{j \in \omega_i} S_{nT}(j)}{\sum S_{nT}} = \text{const.} \quad (i = 1, n_g). \quad (6.3.4)$$

Во релацијата (6.3.4) со $\sum S_{nT}$ е означена сумарната инсталирана моќност на сите трансформатори во мрежата. Понатаму со $S_{nT}(j)$ е означена номиналната моќност на j -тиот трансформатор а со ω_i е означено множеството од потрошувачи (трансформатори) коишто се напојуваат преку i -тата делница од мрежата.

Во тој случај, под претпоставка на константни коефициенти на учество k_i , за да се пресметаат загубите на моќност/енергија во дистрибутивната мрежа доволно ќе биде да се познаваат само параметрите на елементите од мрежата и струјата (моќноста) во напојната делница бидејќи еквивалентна импеданција $\underline{Z}_{ek} = (R_{ek} + jX_{ek})$ нема да зависи од режимот на работа на мрежата и ќе се пресметува на едноставен начин, со помош на релацијата (6.3.5):

$$\underline{Z}_{ek} = \sum_{i=1}^{n_g} k_i^2 \cdot \underline{Z}(i) = \sum_{i=1}^{n_g} [R(i) + jX(i)] \cdot \left[\frac{\sum_{j \in \omega_i} S_{nT}(j)}{\sum S_{nT}} \right]^2. \quad (6.3.5)$$

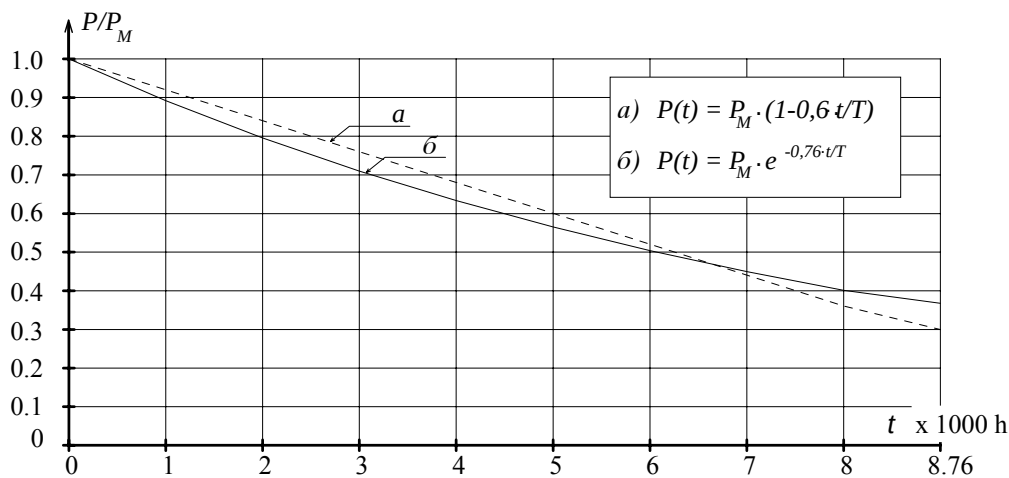
Задача 6.1. Подредениот годишен дијаграм на оптоварување на еден потрошувач аналитички може приближно да се опише на следните два начина:

- а) со кривата $P(t) = P_M \cdot (1 - 0,6 \cdot \frac{t}{T})$; б) со кривата $P(t) = P_M \cdot e^{-0,76 \cdot \frac{t}{T}}$; $T = 8760$ h.

За двата наведени случаја да се определат следните параметри:

- 1) Вкупната преземена електрична енергија во текот на годината W ;
- 2) Времето на максимална моќност P_M ;
- 3) Времето на загуби τ ;
- 4) Средногодишната моќност на потрошувачот P_{sr} и факторот на товарот $m = P_{sr}/P_M$;
- 5) Факторот на загуби $\theta = \tau/T$.

Познато е дека потрошувачот работи преку целата година со константен фактор на моќност $\cos \varphi = 0,9$.



Слика 6.3. Графички приказ на подредените годишни дијаграми на потрошувачот од примерот 6.1

Решение

- 1) Вкупната преземена енергија W во текот на годината ($T = 1$ г. = 8760 h) ќе биде:

$$W = \int_0^T P(t) \cdot dt.$$

Според тоа, во двата посматрани случаја ќе имаме:

$$W_{(a)} = \int_0^T P(t) \cdot dt = \int_0^T P_M \cdot (1 - 0,6 \cdot \frac{t}{T}) \cdot dt = P_M \cdot (T - 0,3 \cdot T) = 0,7 \cdot P_M \cdot T;$$

$$W_{(b)} = \int_0^T P(t) \cdot dt = \int_0^T P_M \cdot e^{-0,76 \cdot t/T} \cdot dt = \frac{P_M \cdot T}{0,76} \cdot (1 - e^{-0,76}) \approx 0,7 \cdot P_M \cdot T.$$

2) Времето на максимална моќност T_M се добива, согласно изразот (6.11), од односот на преземената енергија W и врвната моќност P_M . И во двата разгледувани случаја тоа ќе биде еднакво и ќе изнесува:

$$T_M = \frac{W}{P_M} = \frac{0,7 \cdot P_M \cdot T}{P_M} = 0,7 \cdot T = 0,7 \cdot 8760 = 6132 \text{ h.}$$

- 3) Времето на загуби τ се дефинира со помош на изразот (6.16):

$$\tau = \int_0^T \frac{S^2(t)}{S_M^2} \cdot dt = \int_0^T \left[\frac{P(t)/\cos \varphi}{P_M/\cos \varphi_M} \right]^2 \cdot dt$$

Во првиот случај "а" имаме:

$$P(t) = P_M \cdot \left(1 - 0,6 \cdot \frac{t}{T}\right); \cos \varphi = \cos \varphi_M = \text{const.},$$

од каде што се добива:

$$\tau_a = \int_0^T \frac{P_M^2 \cdot (1 - 0,6 \cdot t/T)^2}{P_M^2} \cdot dt = 0,52 \cdot T = 4555 \text{ h.}$$

Во вториот случај "б" имаме:

$$P(t) = P_M \cdot e^{-0,76 \cdot \frac{t}{T}}; P^2(t) = P_M^2 \cdot e^{-2 \cdot 0,76 \cdot \frac{t}{T}}; \cos \varphi = \cos \varphi_M = \text{const.}$$

$$\text{Следува: } \tau_b = \int_0^T \frac{P_M^2 \cdot e^{-1,52 \cdot t/T}}{P_M^2} \cdot dt = \frac{T}{1,52} \cdot (1 - e^{-1,52}) = 0,514 \cdot T = 4503 \text{ h.}$$

4) Средната годишна моќност P_{sr} ќе ја добиеме од условот:

$$P_{sr} \cdot T = P_M \cdot T_M = W,$$

од каде што и за двата случаја ќе добиеме идентичен резултат:

$$P_{sr(a)} = P_{sr(b)} = \frac{W}{T} = 0,7 \cdot P_M.$$

Оттука произлегува дека факторот на товарот m ќе биде повторно ист за двата случаја, т.е:

$$m = \frac{P_{sr}}{P_M} = 0,7.$$

5) Факторот на загуби θ ќе го добиеме како однос на времињата τ и T . Според тоа, за случаите "а" и "б" ќе добиеме:

$$\theta_{(a)} = \frac{\tau_{(a)}}{T} = 0,52; \quad \theta_{(b)} = \frac{\tau_{(b)}}{T} = 0,514.$$

□ □ □

Задача 6.2. Според методологијата за пресметување на состојбите во дистрибутивните мрежи, усвоена во [19], основните типови потрошувачи се поделени во 8 категории. Податоците облиците на дневните дијаграми на активната моќност на овие типски потрошувачи, изразени во % од врвното оптоварување, се дадени во табелата 6.2.1. Понатаму секој потрошувач во дистрибутивната мрежа може да се претстави како некаква комбинација од поголем број елементарни потрошувачи кои припаѓаат на една или или на повеќе категории.

Табела 6.2.1. Шаблони за типските категории потрошувачи според [19].

t,	01,	02,	03,	04,	05,	06,	07,	08,	09,	10,	11,	12,	13,	14,	15,	16,	17,	18,	19,	20,	21,	22,	23,	24
D,	25,	22,	20,	17,	18,	18,	19,	33,	39,	66,	74,	100,	90,	78,	33,	36,	35,	42,	60,	80,	70,	42,	29,	29
K,	20,	20,	22,	27,	22,	19,	23,	80,	80,	45,	90,	100,	100,	95,	89,	67,	34,	75,	100,	83,	43,	15,	13,	11
I,	67,	60,	55,	50,	53,	58,	67,	80,	93,	100,	93,	82,	82,	92,	100,	95,	90,	88,	84,	81,	80,	83,	85,	77
S,	16,	16,	16,	16,	25,	23,	23,	34,	62,	88,	98,	100,	70,	53,	57,	57,	50,	60,	56,	51,	34,	34,	23,	23
Z,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	20,	55,	88,	100,	90,	73,	60,	80,	83,	87,	91,	73,	57,	45,	0,	0,	0
G,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	44,	88,	100,	80,	73,	60,	80,	83,	87,	62,	40,	0,	0,	0,	0,	0,	0
O,	100,	50,	50,	50,	50,	50,	50,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	0,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100
C,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100,	100

Легенда: t = време (h); D = домаќинства; K=комерција; I = индустрија; S = селски домаќинства;
Z = занаетско-услуги дејности; G = градежништво; O=осветление; C = константен товар

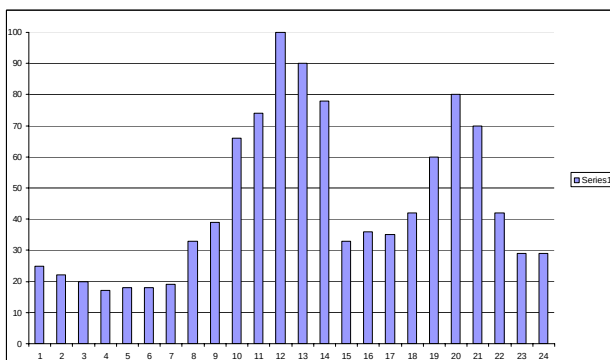
Да се пресметаат основните карактеристики на секој од наведените типови потрошувачи: W , T_M , τ , P_{sr} , m и θ . ($T_M = 24 \text{ h} = 1 \text{ ден}$).

Решение

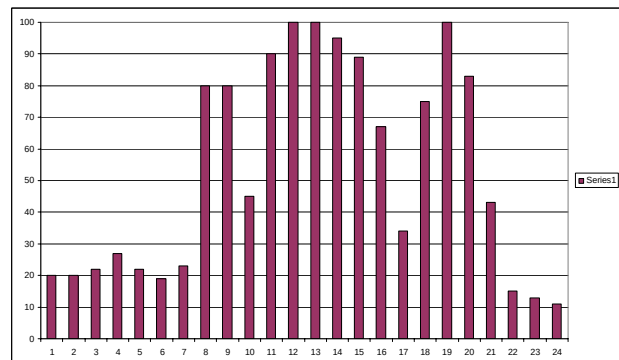
Бидејќи дневните дијаграми на потрошувачите се дадени во нормализирана форма, изразени во проценти од врвното оптоварување, ќе работиме со единична врвна моќност $P_M = 1 \text{ kW}$. Во тој случај, со помош на изразите (6.1)–(6.16), за секој од наведените дневни дијаграми ќе ги добиеме следните карактеристики, прикажани во табелата 6.2.2. Обликот на дневните дијаграми, изразени во %, се прикажани на сликите 2.1 2.6.

Табела 6.2.2. К-ки на типските дневни дијаграми на одделните категории потрошувачи за $P_M = 1 \text{ kW}$

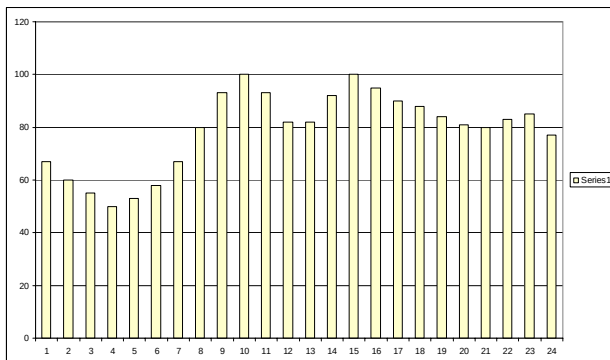
Категорија	Кратенка	W (kWh)	P_{sr} (kW)	T_M (h)	τ (h)	$m = T_M/2$ 4	$\theta = \tau/24$
Домаќинства	D	10.750	0.44792	10.750	6.315	0.44792	0.26314
Комерција	K	12.730	0.53042	12.730	9.378	0.53042	0.39075
Индустрија	I	18.950	0.78958	18.950	15.482	0.78958	0.64506
Селски домаќинства	S	10.850	0.45208	10.850	6.447	0.45208	0.26862
Занаетчиство	Z	10.020	0.41750	10.020	7.794	0.41750	0.32475
Градежништво	G	7.970	0.33208	7.970	6.131	0.33208	0.25546
Осветление	O	11.000	0.45833	11.000	9.500	0.45833	0.39583
Константен товар	C	24.000	1.00000	24.000	24.000	1.00000	1.00000



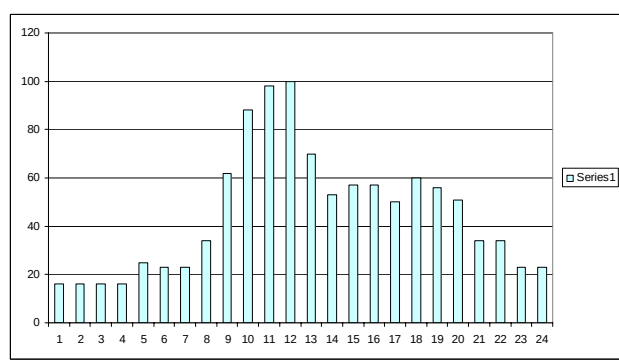
Слика 2.1. Домаќинства (D)



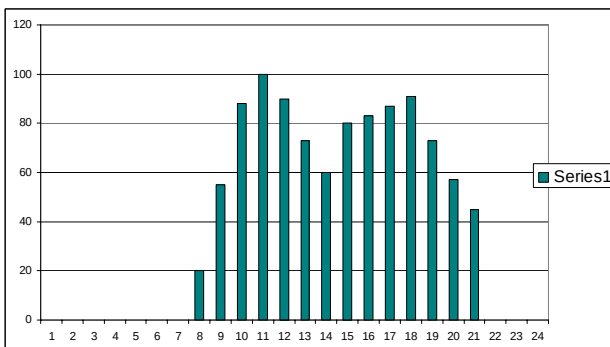
Слика 2.2. Комерција (K)



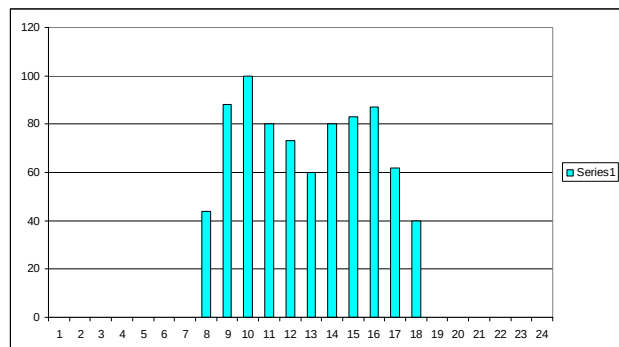
Слика 2.3. Индустија (I)



Слика 2.4. Селски домаќинства (S)



Слика 2.5. Занаетчиство (Z)



Слика 2.6. Градежништво (G)

Задача 6.3. Нисконапонски кабел од типот РР 00 4×150 0,6/1 kV; $z = (0,124 + j0,06) \Omega/\text{km}$ со должина $l=125 \text{ m}$ напојува на својот крај група потрошувачи од категоријата "домаќинство". Просечната дневна потрошувачка на електрична енергија на групата изнесува $W_d=1935 \text{ kWh/дневно}$. Факторот на моќност е практично преку целиот ден константен и изнесува $\cos\varphi = 0,95$. Потребно е:

- да се пресмета просечното врвно оптоварување на кабелот P_M ;
- да се нацрта дневниот дијаграм на активното оптоварување;
- да се пресметаат загубите на активна моќност во кабелот во режимот на максималното оптоварување ΔP_M ;
- да се пресметаат дневните загуби на активна енергија во кабелот ΔW_d .

Решение

а) Пресметување на врвното оптоварување P_M

Во задачата 6.2 беа пресметани фактор на товар m и факторот на загуби θ на типскиот потрошувач од категоријата "домаќинство": $m = 0,44792$ и $\theta = 0,26314$.

Знаејќи го факторот на товар m и преземената дневна енергија W_d , ќе го добиеме средното P_{sr} и врвното оптоварување на потрошувачот P_M :

$$P_M = \frac{W_d}{24 \cdot m} = \frac{1935}{24 \cdot 0,44792} = 180 \text{ kW};$$

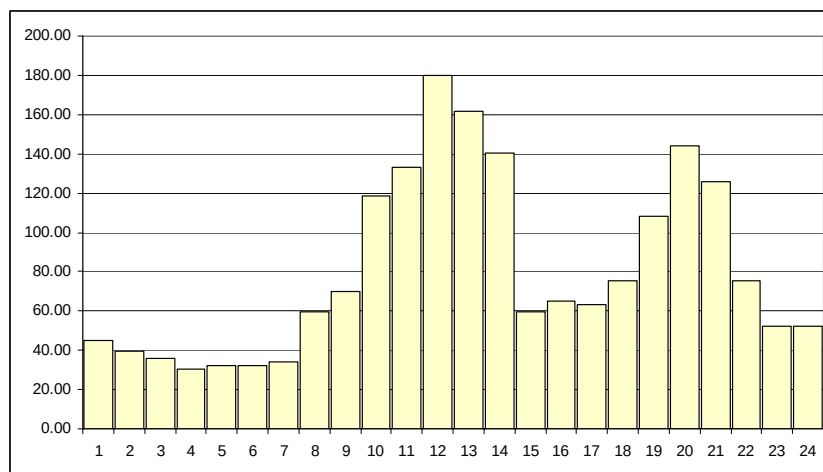
$$P_{sr} = m \cdot P_M = 0,44792 \cdot 360 = 80,63 \text{ kW}.$$

б) Дневен дијаграм на активното оптоварување

Дневниот дијаграм на активното оптоварување ќе го добиеме на едноставен начин, со помош на следниот израз:

$$P_i = \frac{p_i}{100} \cdot P_M; \quad i=1,2, \dots, 24. \quad (6.3.2)$$

Во изразот (3) со p_i е означена вредноста што се отчитува од втората редица ("категија домаќинства D") на табелата 6.2.1 од задача 6.2 којашто соодветствува на i -тиот временски интервал. На тој начин се добива следната слика за дневниот дијаграм на активното оптоварување на потрошувачот:



Слика 6.3.1. Дневен дијаграм на активна моќност на потрошувачот

в) Пресметка на загубите на активна моќност ΔP_M во режимот на максимално оптоварување

Загубите на активна моќност во кабелот во режимот на макс. оптоварување ќе бидат:

$$\Delta P_M = \frac{P_M^2 + Q_M^2}{U_n^2} \cdot r \cdot l = \frac{S_M^2}{U_n^2} \cdot r \cdot l = \frac{P_M^2}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi_M} \cdot r \cdot l ;$$

$$\Delta P_M = \frac{180^2}{0,4^2 \cdot 0,95^2} \cdot 0,125 \cdot 0,124 = 3478 \text{ W} \approx 3,478 \text{ kW}.$$

г) Пресметка на дневните загуби на активна енергија ΔW_d

Најнапред ќе го пресметаме "времето на загуби" на потрошувачот τ преку т.н. "фактор на загуби" θ

$$\tau = \theta \cdot T = 0,26314 \cdot 24 = 6,315 \text{ h/дневно.}$$

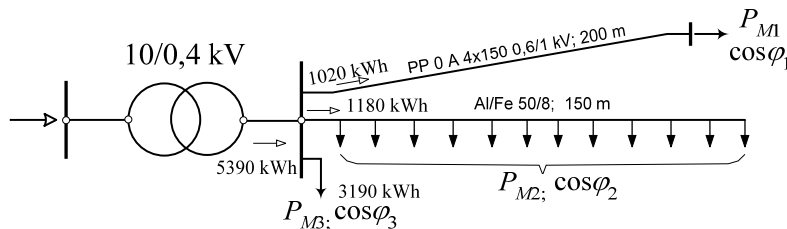
Загубите на енергија во кабелот во текот на еден ден ќе бидат:

$$\Delta W_d = \Delta P_M \cdot \tau = 3,478 \cdot 6,315 = 21,964 \text{ kWh/дневно.}$$

што изнесува $(21,964/1935) \cdot 100 = 1,13\%$ од испорачаната на електрична енергија.

□ □ □

Задача 6.4. Нисконапонска (НН) трансформаторска станица(ТС) напојува три извода. На првиот извод, преку кабел со параметри $z_1=(0,206+j0,06) \Omega/\text{km}$, $l_1=250 \text{ m}$, е приклучена станбена зграда која напојува потрошувачи од категоријата "домаќинство". Зградата е приклучена на крајот од изводот и нејзината просечна дневна потрошувачка изнесува $W_{d1} = 1020 \text{ kWh/ден}$; $\cos \varphi_1=0,95$. Вториот извод е надземен, со спроводници Al/Fe 50/8 [$z_2=(0,64+j0,35) \Omega/\text{km}$; $l_2=150 \text{ m}$]. Вкупната просечна дневна потрошувачка на вториот извод изнесува $W_{d2} = 1180 \text{ kWh/дневно}$; $\cos \varphi_2 = 0,95$. Може да се смета дека е потрошувачите од овој извод се исто така од категоријата "домаќинство" и тие се рамномерно распределени по неговата должина.



Слика 6.4.1

Третиот извод, чијашто должина е само десетина метри, напојува индустријски потрошувач. Просечната дневна потрошувачка на индустријскиот потрошувач изнесува $W_{d3}=3790 \text{ kWh/ден}$; $\cos \varphi_3 = 0,80$. Облиците на дневните дијаграми $P(t)$ на одделните изводи се земаат од табелата 6.2.1. Потребно е:

- Да се пресмета (процени) дневниот дијаграм на активна моќност на трансформаторот $P_T(t)$;
- Да се пресмета дневниот дијаграм на привидна моќност на трансформаторот $S_T(t)$;
- Да се пресметаат загубите на активна енергија ΔW_{a1} и ΔW_{a2} во првиот и вториот извод;
- Да се пресметаат загубите на моќност $\Delta P_{M,T}$ во трансформаторот во режимот на максималното оптоварување и дневните загуби ΔW_{aT} на активна енергија во трансформаторот T ;
- Да се пресметаат вкупните загуби на активна моќност и енергија ΔP_Σ и ΔW_Σ во мрежата.

Податоци за трансформаторот во ТС СН/НН:

$$S_n = 630 \text{ kVA}; U_{1n}/U_{2n} = 10/0,4 \text{ kV}; u_k\% = 4\%; i_0\% = 1,8\%; \Delta P_{Cun} = 6,5 \text{ kW}; \Delta P_{Fe} = 1,3 \text{ kW}.$$

Решение

Најнапред, тргнувајќи од познатите фактори на товарот m и θ , познатите употребни времиња T_M и познатите преземени дневни енергии W_d , на начин како што тоа беше направено во претходната задача 6.3, ќе ги пресметаме врвните оптоварувања на потрошувачите од сите три извода. На тој начин ќе добиеме:

1 извод: $W_{d1} = 1020$ kWh/ден; $m_1 = 0,44792$; $\theta_1 = 0,26314$; $\cos \varphi_1 = 0,95$; $P_{M1} = 94,9$ kW; $Q_{M1} = 31,2$ kvar;

2 извод: $W_{d2} = 1180$ kWh/ден; $m_2 = 0,44792$; $\theta_2 = 0,26314$; $\cos \varphi_1 = 0,95$; $P_{M2} = 109,8$ kW; $Q_{M2} = 36,1$ kvar;

3 извод: $W_{d3} = 3790$ kWh/ден; $m_3 = 0,78958$; $\theta_3 = 0,64506$; $\cos \varphi_1 = 0,80$; $P_{M3} = 200$ kW; $Q_{M3} = 150$ kvar.

Загубите на моќност и енергија во првиот и вториот извод ќе бидат:

$$\Delta P_{M1} = \frac{P_{M1}^2}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi_1} \cdot r_1 \cdot l_1 = \frac{94,9^2}{0,4^2 \cdot 0,95^2} \cdot 0,206 \cdot 0,25 = 3,212 \text{ kW};$$

$$\Delta W_{a1} = \Delta P_{M1} \cdot \tau_1 = 3,212 \cdot 6,315 = 20,3 \text{ kWh/дневно};$$

$$\Delta P_{M2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{P_{M2}^2}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi_2} \cdot r_2 \cdot l_2 = \frac{1}{3} \cdot \frac{109,8^2}{0,4^2 \cdot 0,95^2} \cdot 0,64 \cdot 0,15 = 2,672 \text{ kW};$$

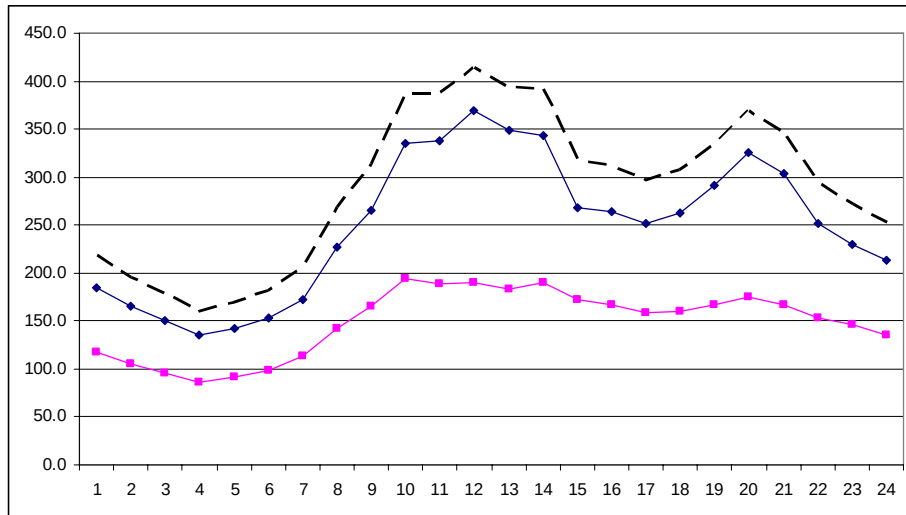
$$\Delta W_{a2} = \Delta P_{M2} \cdot \tau_2 = 2,672 \cdot 6,315 = 16,9 \text{ kWh/дневно}.$$

а) Пресметка на дневните дијаграми на активното и реактивно оптоварување

Вредностите на саатните моќности $P_1(t)$; $t=1, 24$ на првиот потрошувач ќе ги добиеме со помош на релацијата (6.2.1) и податоците од табелата 6.2.1 за формата на дневниот дијаграм на типскиот потрошувач од категоријата "домаќинство". Наполно исто се постапува и при определувањето дијаграмот $P_2(t)$. Со занемарување на загубите во изводите, дневниот дијаграм на активната и реактивната моќност на трансформаторот ќе ги добиеме со едноставно сумирање на потрошувачката во првиот и вториот извод. На тој начин, сумирајќи $\underline{S}_T(t) = \underline{S}_1(t) + \underline{S}_2(t) + \underline{S}_3(t)$ за секој саат во текот на денот ги добиваме добиваме дијаграмите $P_T(t)$, $Q_T(t)$ и $S_T(i)$. Добиените резултати се прикажани во табелата 6.4.1. и на сликата 6.4.2.

Табела 6.4.1. Дневни дијаграми на оптоварување $P(t)$ и $Q(t)$ (kW, kvar) на елементите од мрежата

t (h)	$P_1(t)$	$Q_1(t)$	$P_2(t)$	$Q_2(t)$	$P_3(t)$	$Q_3(t)$	$P_T(t)$	$Q_T(t)$	$S_T(t)$
1	23.7	7.8	27.4	9.0	134.0	100.5	185.2	117.3	219.2
2	20.9	6.9	24.1	7.9	120.0	90.0	165.0	104.8	195.5
3	19.0	6.2	22.0	7.2	110.0	82.5	150.9	96.0	178.8
4	16.1	5.3	18.7	6.1	100.0	75.0	134.8	86.4	160.1
5	17.1	5.6	19.8	6.5	106.0	79.5	142.8	91.6	169.7
6	17.1	5.6	19.8	6.5	116.0	87.0	152.8	99.1	182.2
7	18.0	5.9	20.9	6.9	134.0	100.5	172.9	113.3	206.7
8	31.3	10.3	36.2	11.9	160.0	120.0	227.5	142.2	268.3
9	37.0	12.2	42.8	14.1	186.0	139.5	265.8	165.7	313.2
10	62.6	20.6	72.4	23.8	200.0	150.0	335.1	194.4	387.4
11	70.2	23.1	81.2	26.7	186.0	139.5	337.4	189.3	386.9
12	94.9	31.2	109.8	36.1	164.0	123.0	368.7	190.3	414.9
13	85.4	28.1	98.8	32.5	164.0	123.0	348.2	183.5	393.6
14	74.0	24.3	85.6	28.1	184.0	138.0	343.6	190.5	392.9
15	31.3	10.3	36.2	11.9	200.0	150.0	267.5	172.2	318.2
16	34.2	11.2	39.5	13.0	190.0	142.5	263.7	166.7	312.0
17	33.2	10.9	38.4	12.6	180.0	135.0	251.6	158.5	297.4
18	39.9	13.1	46.1	15.2	176.0	132.0	262.0	160.3	307.1
19	56.9	18.7	65.9	21.6	168.0	126.0	290.8	166.4	335.0
20	75.9	24.9	87.8	28.9	162.0	121.5	325.7	175.3	369.9
21	66.4	21.8	76.8	25.3	160.0	120.0	303.3	167.1	346.2
22	39.9	13.1	46.1	15.2	166.0	124.5	252.0	152.8	294.6
23	27.5	9.0	31.8	10.5	170.0	127.5	229.3	147.0	272.4
24	27.5	9.0	31.8	10.5	154.0	115.5	213.3	135.0	252.5



Слика 6.4.2. Дневни дијаграми на моќност на трансформаторската станица:
 $S(t)$ – горна крива; $P(t)$ – средна крива; $Q(t)$ – долна крива

Забележуваме дека врвното оптоварување на трансформаторот $P_{M.T}$, коешто се остварува во $i=12$ часот и изнесува 368,7 kW, е помало од збирот $\Sigma P_{Mi}=P_{M1}+P_{M2}+P_{M3}=94,9+109,8+200=404,7$ kW на врвните оптоварања од сите три изводи. Односот помеѓу сумарното врвно оптоварување $P_{M.T}$ и збирот ΣP_{Mi} на моќностите на потрошувачите во посматраниот режим на максимално оптоварување се нарекува коефициент на едновременост на врвното оптоварување на трансформаторската станица:

$$k_e = \frac{P_{M.T}}{\Sigma P_{Mi}} = \frac{368,7}{404,7} = 0,911.$$

Овој коефициент е секогаш $k_e \leq 1$ и тоа се должи на фактот што обично дијаграмите на оптоварување на одделните потрошувачи во една мрежа се "фазно изместени" така што не доаѓа до совпаѓање на моментите на настанување на нивните врвни оптоварувања. Кај ТС СН/НН овој коефициент обично се движи во границите $0,90 \leq k_e \leq 0,95$ [19].

Со помош на податоците од табелата 4.4.1 можеме да го пресметаме времето на загуби τ на оптоварувањето на трансформаторот:

$$S_M = S(t)_{(t=12)} = 414,9 \text{ kVA.}$$

$$\tau = \sum_{i=1}^{24} \frac{S_i^2}{S_M^2} \cdot \Delta t_i = \frac{219,2^2}{414,9^2} \cdot 1 + \frac{195,5^2}{414,9^2} \cdot 1 + \dots + \frac{252,5^2}{414,9^2} \cdot 1 = 12,637 \text{ h.}$$

Конечно ќе ги пресметаме загубите на активна моќност ΔP_Σ во режимот на максималното оптоварување, кое се постигнува во $t=12$ h, дневните загуби ΔW_{aT} на активна енергија во трансформаторот како и вкупните дневни загуби на енергија $\Delta W_{a\Sigma}$:

$$\Delta P_T = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cun} \cdot (S_M / S_n)^2 = 1,3 + 6,5 \cdot (414,9/630)^2 = 1,3 + 2,82 = 4,12 \text{ kW};$$

$$\Delta W_{aT} = \Delta P_{Fe} \cdot T + \Delta P_{Cun} \cdot (S_M / S_n)^2 \cdot \tau = 1,3 \cdot 24 + 6,5 \cdot (414,9/630)^2 \cdot 12,637 = 31,2 + 35,63 = 66,83 \text{ kWh.}$$

$$\Delta P_\Sigma = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_T = 3,212 + 2,672 + 4,12 = 10 \text{ kW};$$

$$\Delta W_\Sigma = \Delta W_{a1} + \Delta W_{a2} + \Delta W_{aT} = 20,3 + 16,9 + 66,83 = 104,03 \text{ kWh/дневно. (1,74%).}$$

□ □ □

Задача 6.5. Група потрошувачи со вкупна моќност $\underline{S} = (1000 + j500)$ kVA се напојува од една трансформаторска станица 10/0,4 kV/kV. Трансформацијата на електричната енергија се врши со три идентични, паралелно врзани, трансформатори при што нивниот број во групата n може да се менува. Да се определи бројот на трансформаторите во погонот $n_o = ?$ така што загубите на активна моќност ΔP_T во трансформацијата ќе бидат минимални.

Податоци за секој трансформатор: 10/0,4 kV/kV; 1000 kVA; $\Delta P_{Cun} = 13,5$ kW; $\Delta P_{Fe} = 2,7$ kW;
 $u_k\% = 6\%$; $i_0 = 2\%$.

Решение

Ако со S ја означиме привидната моќност на потрошувачите:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{1000^2 + 500^2} = 1118 \text{ kVA},$$

тогаш низ секој трансформатор во групата ќе тече иста моќност $S' = S/n$. Во тој случај загубите на активна моќност $\Delta P_{(1)}$ во еден од трансформаторите ќе изнесуваат:

$$\Delta P_{(1)} = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cun} \cdot \left[\frac{S'}{S_n} \right]^2 = \Delta P_{Fe} + \frac{1}{n^2} \cdot \Delta P_{Cun} \cdot \left[\frac{S}{S_n} \right]^2,$$

додека вкупните загуби на активна моќност во групата од n трансформатори ќе биде n пати поголема, или:

$$\Delta P_{(n)} = n \cdot \Delta P_{(1)} = n \cdot \Delta P_{Fe} + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{Cun} \cdot \left[\frac{S}{S_n} \right]^2 = n \cdot \Delta P_{Fe} + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2; \quad (\alpha = \frac{S}{S_n}).$$

Од последната равенка гледаме дека за даден товар S загубите на активната моќност во трансформацијата зависат само од бројот на трансформаторите во погон n . Оптималниот број на трансформатори во групата n_o за кој загубите $\Delta P = \Delta P_{(n)}$ се минимални, ќе го добиеме од условот:

$$\frac{d(\Delta P)}{dn} = 0, \quad \text{или: } \Delta P_{Fe} - \Delta P_{Cun} \cdot \frac{\alpha^2}{n^2} = 0.$$

Од последниот израз се добива:

$$n = \alpha \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{Cun}}{\Delta P_{Fe}}} = \frac{S}{S_n} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{Cun}}{\Delta P_{Fe}}}.$$

Во конкретниот случај ќе имаме:

$$n = \frac{S}{S_n} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{Cun}}{\Delta P_{Fe}}} = \frac{1118}{1000} \cdot \sqrt{\frac{13,5}{2,7}} = 2,5,$$

Бидејќи n е цел број тоа ќе значи дека оптималниот број на трансформатори во групата n_o со којшто се постига загубите да бидат минимални ќе биде $n_o = 2$ или $n_o = 3$. Во случајот кога е $n = 2$ добиваме:

$$\Delta P_{(2)} = 2 \cdot \Delta P_{Fe} + (1/2) \cdot \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2 = 2 \cdot 2,7 + (1/2) \cdot 13,5 \cdot 1,118^2 = 12,95 \text{ kW},$$

додека во случајот кога имаме $n = 3$ трансформатори во групата, вкупните загуби ќе бидат:

$$\Delta P_{(3)} = 3 \cdot \Delta P_{Fe} + (1/3) \cdot \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2 = 3 \cdot 2,7 + (1/3) \cdot 13,5 \cdot 1,118^2 = 13,13 \text{ kW}.$$

Одовде произлегува дека за дадениот режим на работа групата ќе треба да работи со два трансформатора, т.е. $n_o = 2$.

□ □ □

Задача 6.6. Во една дистрибутивна градска трансформаторска станица 35/10 kV/kV се инсталирани 4 идентични, паралелно врзани трансформатори. Бројот n на трансформаторите во

групата може да се менува. Бидејќи дневниот дијаграм на оптоварувањето на трафостаницата е изразито нерамномерен, со цел да се зголеми економичноста на погонот во смисла на намалување на загубите на моќност и енергија во трансформацијата, бројот на единиците во погонот n ќе треба да се менува сообразно со сумарното оптоварување на трафостаницата.

Да се утврди економичниот програм на вклучување (исклучување) на трансформаторските единици во групата во сообразност со нејзиното оптоварување така што ќе се постигнат најмалы загуби на активна моќност и енергија.

Податоци за секој трансформатор: 35/10 kV/kV ; 10 MVA ; $\Delta P_{Cun} = 96 \text{ kW}$;

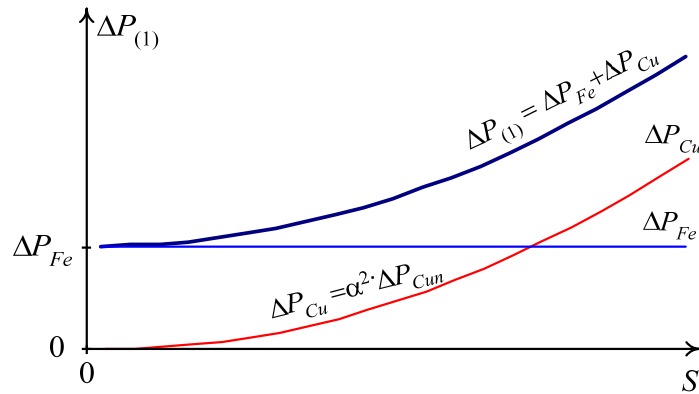
$\Delta P_{Fe} = 30 \text{ kW}$; $u_k\% = 8\%$; $i_o = 1,2\%$.

Решение

Загубите на моќност во енергетските трансформатори се состојат од константен дел (загуби во железото ΔP_{Fe}) и варијабилан дел (цулови загуби во бакарот ΔP_{Cu}). Според изразот (4.59), доколку е познат коефициентот на оптоварување на трансформаторот $\alpha = S/S_n$, загубата на моќност $\Delta P_{(1)}$ во случајот кога се работи за само еден трансформатор, ќе биде:

$$\Delta P_{(1)} = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cu} = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cun} \cdot (S/S_n)^2 = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2.$$

Зависноста на загубите $\Delta P_{(1)}$ од привидната моќност на товарот S е графички прикажана на сликата 6.6.1.



Слика 6.6.1. Зависност на загубите $\Delta P_{(1)}$ во еден трансформатор од степенот на неговото оптоварување

Во општ случај, кога бројот на трансформаторите во групата n е произволен, вкупните загуби на активна моќност во трансформацијата, согласно изнесеното во примерот 6.2, ќе бидат:

$$\Delta P_{(n)} = n \cdot \Delta P_{Fe} + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{Cun} \cdot \left(\frac{S}{S_n}\right)^2 = n \cdot \Delta P_{Fe} + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2 ; \left(\alpha = \frac{S}{S_n}\right).$$

При работа на вкупно $n+1$ трансформатори во групата, вкупните загуби ќе бидат:

$$\Delta P_{(n+1)} = (n+1) \cdot \Delta P_{Fe} + \frac{1}{n+1} \cdot \Delta P_{Cun} \cdot \left(\frac{S}{S_n}\right)^2 = (n+1) \cdot \Delta P_{Fe} + \frac{1}{n+1} \cdot \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2.$$

Од последните две равенки можеме да ја определиме привидната моќност на групата $S_{n \rightarrow n+1}$ за која се постигнува условот $\Delta P_{(n)} = \Delta P_{(n+1)}$. Оваа моќност ќе биде наедно и граничната привидна моќност на товарот при која ќе треба да се премине од работа со n , на работа со вкупно $n+1$ трансформатори во групата, кога товарот расте, односно да се премине од работа со вкупно $n+1$ на вкупно n трансформатори, кога тој се намалува. Графичкиот начин на определувањето на граничната привидна моќност е прикажан на сликата 6.6.2.

Во согласност со кажаното, ќе имаме:

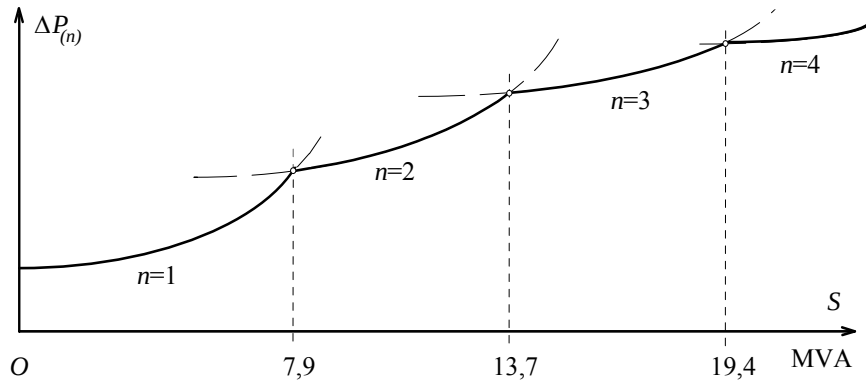
$$n \cdot \Delta P_{Fe} + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{Cun} \cdot \left(\frac{S_{n \rightarrow n+1}}{S_n}\right)^2 = (n+1) \cdot \Delta P_{Fe} + \frac{1}{n+1} \cdot \Delta P_{Cun} \cdot \left(\frac{S_{n \rightarrow n+1}}{S_n}\right)^2 .$$

Од последната релација се добива бараната моќност $S = S_{n \rightarrow n+1}$:

$$S_{n \rightarrow n+1} = S_n \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{Fe}}{\Delta P_{Cun}} \cdot n \cdot (n+1)} .$$

Притоа е:

$$\frac{\Delta P_{Fe}}{\Delta P_{Cun}} = \frac{30}{96} = 0,3125 .$$



Слика 6.6.2. Зависност на загубите $\Delta P_{(n)}$ во група од n идентични, паралелно врзани трансформатори, од сумарната привидна моќност на потрошувачот S .

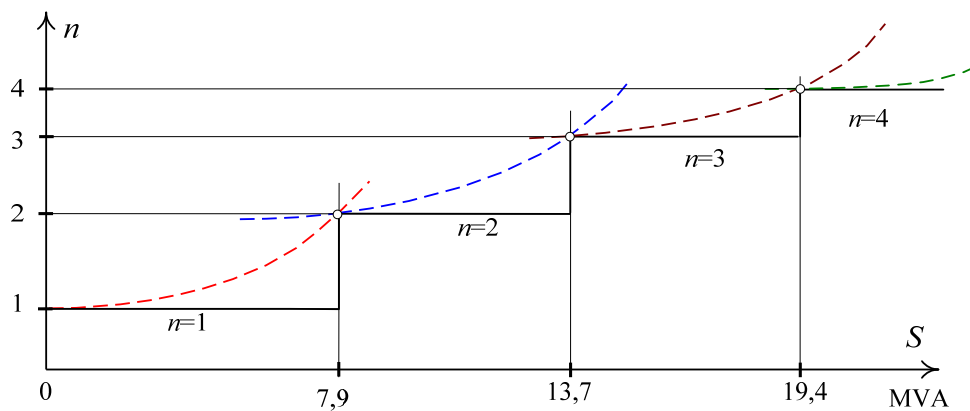
На тој начин ги добиваме следните гранични вредности на товарот:

$$S_{1 \rightarrow 2} = 10 \cdot \sqrt{1 \cdot 2 \cdot 0,3125} = 7,9 \text{ MVA} ;$$

$$S_{2 \rightarrow 3} = 10 \cdot \sqrt{2 \cdot 3 \cdot 0,3125} = 13,7 \text{ MVA} ;$$

$$S_{3 \rightarrow 4} = 10 \cdot \sqrt{3 \cdot 4 \cdot 0,3125} = 19,4 \text{ MVA} .$$

Зависноста на потребниот број трансформатори во групата n од привидната моќност на потрошувачите на трафостаницата S , т.е. "оптималниот возен ред" на групата трансформатори, е прикажан на сл. 6.6.3.



Слика 6.6.3. Зависност на потребниот број на трансформатори во групата n од оптоварувањето S

□ □ □

Задача 6.7. На сликата 6.7.1 е прикажан 35 kV преносен систем, составен од два идентични 35 kV далекуводи и два идентични трансформатори 35/10 kV/kV, кои работат во паралела. Системот напојува потрошувач (или поточно речено група потрошувачи) кој работи со константен фактор на моќност $\cos\varphi = 0,8 = \text{const.}$ и со познат подреден годишен дијаграм на оптоварување, прикажан со следната табела:

Табела 6.7.1. Податоци за годишниот дијаграм на оптоварување на потрошувачот

Период (h)	0 – 2000	2000 – 4000	4000 – 8760
P (MW)	10	5	2
Q (Mvar)	7,5	3,75	1,5
S (Mvar)	12,5	6,25	2,5

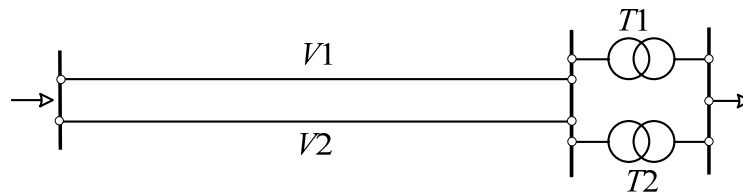
Да се определат загубите на привидната моќност $\underline{\Delta S} = \Delta P + j\Delta Q$ во режимот на максималното оптоварување како и вкупните годишни загуби на активна енергија ΔW во системот. Задачата да се реши приближно, така што зголемувањето на оптоварувањето на водовите поради загубите во трансформацијата ќе се занемари, а ќе се занемари и капацитивноста на водовите.

Податоци за параметрите на елементите во системот:

Вод V1: $\underline{z} = (0,28 + j0,43) \Omega/\text{km}$; $l = 15 \text{ km}$. (Водот V2 е идентичен со водот V1, т.е. $V2 \equiv V1$).

Трансформатор T1: 7.500 kVA ; 35/10,5 kV/kV ; $\Delta P_{\text{Cun}} = 75 \text{ kW}$; $\Delta P_{\text{Fe}} = 24 \text{ kW}$;
 $u_k\% = 7,5\%$; $i_0\% = 3,5\%$

Трансформатор T2: ($T2 \equiv T1$).



Слика 6.7.1. Шематски приказ на анализираниот преносен систем

Решение

Вкупните загуби на моќност во системот ќе бидат збир од загубите во сите негови елементи. Според тоа за режимот на максималното оптоварување ќе имаме:

$$S_M = 12,5 \text{ MVA} \quad S'_M = S_M/2 = 6,25 \text{ MVA}.$$

Понатаму, за сумарните загуби во преносниот систем $\underline{\Delta S}_\Sigma$ ќе биде:

$$\underline{\Delta S}_\Sigma = 2 \cdot \underline{\Delta S}_V + 2 \cdot \underline{\Delta S}_T = 2 \cdot (\Delta P_V + \Delta P_T) + j2 \cdot (\Delta Q_V + \Delta Q_T).$$

Бидејќи низ секој елемент ќе тече привидна моќност $S = S'_M$, ќе имаме:

$$\underline{\Delta S}_V = \frac{S^2}{U_n^2} \cdot (R_V + jX_V) = \frac{6,25^2}{35^2} \cdot (0,28 + j0,43) \cdot 15 = (0,134 + j0,206) \text{ MVA},$$

$$\Delta P_T = \Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{Cun}} \cdot \alpha^2 = 24 + 25 \cdot (6,25/7,5)^2 = 76,1 \text{ kW},$$

$$\Delta Q_T = \Delta Q_{\text{Fe}} + X_T \cdot \frac{S^2}{U_n^2} = \left(\frac{i_0\%}{100} + \frac{u_k\%}{100} \cdot \alpha^2 \right) \cdot S_n,$$

$$\Delta Q_T = \left[\frac{3,5}{100} + \frac{7,5}{100} \cdot \frac{6,25^2}{7,5^2} \right] \cdot 7500 = 653 \text{ kvar},$$

$$\Delta S_T = \Delta P_T + \Delta Q_T = (0,076 + 0,653) \text{ MVA}.$$

Значи вкупните загуби на моќност во системот во режимот на максималното оптоварување ќе изнесуваат:

$$\Delta S_\Sigma = 2 \cdot (0,134 + j0,206) + 2 \cdot (0,076 + j0,653) = (0,420 + j0,718) \text{ MVA}.$$

Годишните загуби на активна енергија ΔW_Σ во разгледуваниот преносен систем ќе бидат:

$$\Delta W_\Sigma = 2 \cdot \Delta W_V + 2 \cdot \Delta W_T = 2 \cdot \frac{S^2}{U_n^2} \cdot R \cdot \tau + 2 \cdot (\Delta P_{Fe} \cdot T + \Delta P_{Cun} \cdot \frac{S^2}{S_n^2} \cdot \tau),$$

$$\tau = \sum_{i=1}^3 \frac{S_i^2}{S_M^2} \cdot \Delta t_i = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{P_i / \cos \varphi_i}{P_M / \cos \varphi_M} \right)^2 \cdot \Delta t_i,$$

$$\tau = \frac{12,5^2 \cdot 2000 + 6,25^2 \cdot 2000 + 2,5^2 \cdot 4760}{12,5^2} = 2650 \text{ h},$$

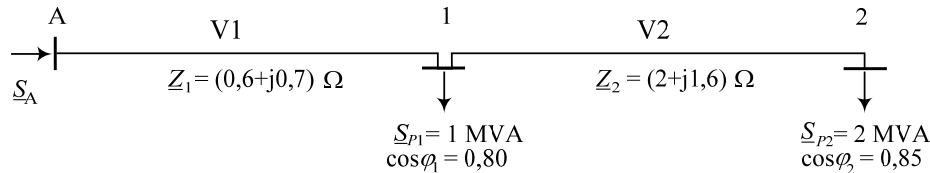
$$\Delta W_V = \frac{6,25^2}{35^2} \cdot 4,2 \cdot 2650 = 355 \text{ MWh};$$

$$\Delta W_T = 0,024 \cdot 8760 + 0,075 \cdot \left(\frac{6,25}{7,5} \right)^2 \cdot 2650 = 348 \text{ MWh},$$

$$\Delta W_\Sigma = 2 \cdot 355 + 2 \cdot 348 = 1406 \text{ MWh/годишно}.$$

□ □ □

Задача 6.8: На сликата 6.8.1 е прикажана 10 kV надземна мрежа. Познат е напонот при потрошувачот приклучен во точката 2, $\underline{U}_2 = 10 \angle 0^\circ$ kV. Напонот во напојната точка А изнесува, $U_A = 10,77$ kV, а загубата на моќност во мрежата $\Delta S = (0,132 + j0,125)$ MVA. Да се пресмета еквивалентната отпорност (импеданција) на мрежата. (Напомена. Напонските прилики, тековите на моќности како и вкупните загуби ΔS во мрежата се пресметани во задачата 2.13).



Слика 6.8.1. 10 kV надземна мрежа анализирана во задачата 2.13.

Решение:

Во задачата 2.13 беше показано дека моќностите на потрошувачите изнесуваат:

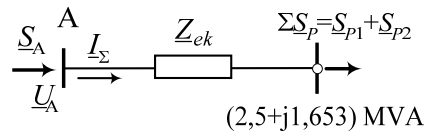
$$\underline{S}_{P1} = (0,8 + j0,6) \text{ MVA}; \quad \underline{S}_{P2} = (1,7 + j1,053) \text{ MVA}; \quad \Sigma \underline{S}_P = \underline{S}_{P1} + \underline{S}_{P2} = (2,5 + j1,653) \text{ MVA}.$$

Бидејќи загубите во мрежата изнесуваат $\Delta S = (0,132 + j0,125)$ MVA, за моќноста $\underline{S}_A$ во напојната точка и за струјата I_Σ во главната делница се добива:

$$\underline{S}_A = \Sigma \underline{S}_P + \Delta S = (2,632 + j1,778) = 3,176 \cdot e^{j34^\circ} \text{ MVA};$$

$$I_\Sigma = I_A = S_A / (\sqrt{3} \cdot U_A) = 3,176 / (1,732 \cdot 10,77) = 0,17027 \text{ kA} \equiv 170,27 \text{ A}.$$

Според методот на "еквивалентна отпорност", секоја мрежа може да се претстави со едно просто електрично коло во коешто загубите на моќност ќе бидат еднакви со оние што се остваруваат во вистинската мрежа. Во конкретниот случај анализираната мрежа може да се претстави на наједоставен начин со една единствена редна импедација, како што е тоа прикажано на сликата 6.8.2. Доколку во мрежата имаше и трансформатори тогаш во еквивалентот на мрежата ќе имаше и еквивалентен трансформатор.



Слика 6.8.2 Надземна мрежа од сликата 6.8.1 прикажана со нејзиниот еквивалент добиен според методот на еквивалентна отпорност

Тргувајќи од потребниот услов загубите ΔS во реалната мрежа и во нејзиниот еквивалент да бидат еднакви, се добиваат параметрите на еквивалентната имеданција Z_{ek} :

$$\Delta S = 3 \cdot Z_{ek} \cdot I_{\Sigma}^2 \Rightarrow Z_{ek} = \frac{\Delta S}{3I_{\Sigma}^2} = \frac{(132 + j125) \cdot 10^3}{3 \cdot 170,27^2} = (1,49044 + j1,41236) \Omega.$$

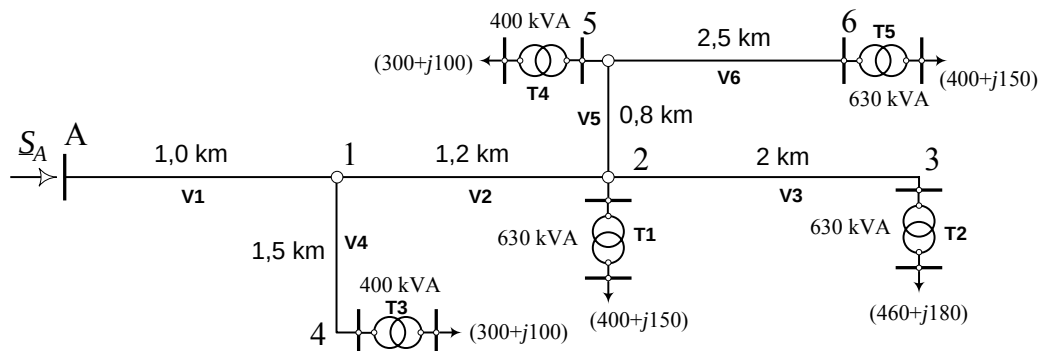
Според тоа за напојната мрежа преку која се напојува разгледуваната СН мрежа е сосема сеедно дали во напојната точка "А" е приклучена вистинската мрежа од сликата 6.8.1 или пак нејзиниот еквивалент од сликата 6.8.2.

□ □ □

Задача 6.9: Се посматра еден извод од 10 kV надземна мрежа од кој што се напојуваат пет ТС СН/НН (слика 6.9.1). Магистралниот дел од изводот А–1–2–3 е изведен со спроводници Al/Λ 70/12 mm², [$z_1 = (0,46 + j0,35) \Omega/\text{km}$] додека отцепите 1–4, 2–5 и 5–6 со спроводници Al/С 35/6 mm² [$z_2 = (0,64 + j0,38) \Omega/\text{km}$]. Должините на поедините делници од мрежата, изразени во (km), како и моќностите на поедините потрошувачи во режимот на максимално оптоварување, изразени во (kVA), се прикажани на сликата. Напонот во напојната точка А изнесува, $U_A = 10,3 \text{ kV} = \text{const.}$ За енергетските трансформатори се познати следните податоци:

	S_n	U_{1n}/U_{2n}	$u_k\%$	$i_0\%$	ΔP_{Cun}	ΔP_{Fe}	ΔQ_{Fe}
1	630 kVA	10/0,4 kV/kV	4%	1,8%	6,5 kW	1,30 kW	11,34 kvar
2	400 kVA	10/0,4 kV/kV	4%	2,0%	4,6 kW	0,93 kW	8,0 kvar

Да се пресмета еквивалентната отпорност на мрежата и да се нацрта соодветната еквивалентна заменска шема. Со помош на неа да се пресметаат загубите ΔS во мрежата.



Слика 6.9.1. Шема на разгледуваниот 10 kV извод од посматраната надземна мрежа.

Решение:

Најнапред ќе ги пресметаме параметрите $Z = (R + jX)$ на редните гранки од поедините елементи на мрежата. За водовите тие се пресметуваат со следните релации:

$$Z_v = (R_v + jX_v) = z \cdot l,$$

додека за трансформаторите важат следните општи релации:

$$R_T = \Delta P_{Cun} \cdot \frac{U_n^2}{S_n^2}; \quad Z_T = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n}; \quad X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}; \quad Z_T = (R_T + jX_T).$$

Коефициентите на учество k_i се добиваат приближно, како однос помеѓу моќноста $S_\Sigma(i)$ што тече низ посматраната гранка i и сумарната моќност $S_A = S_\Sigma(1)$ на главната делница А-1. Така, на пример, за петтиот елемент на мрежата, водот V5, моќноста $S_\Sigma(5)$ ќе добие со собирање на моќностите на потрошувачите на трансформаторите T4 и T5 бидејќи само тие се напојуваат преку таа делница. Значи $S_\Sigma(5) = (300+j100) + (400+j150) = (700+j250)$ kVA.

Приближните вредности на моќностите низ поедините елементи од мрежата можат да се добијат како и во случајот со 5-тата делница, со примена на I Кирхофов закон за моќности. Сумарната моќност на главната делница S_A ќе ја добиеме со просто сумирање на моќностите на сите потрошувачи, т.е.:

$$S_A = (400 + j150) + (460 + j180) + (300 + j100) + (300 + j100) + (400 + j150) = (1860 + j680) \text{ kVA}.$$

Според тоа, коефициентот k_5 за 5-тата делница ќе биде:

$$k_5 = \frac{S_\Sigma(5)}{S_A} = \frac{(700 + j250)}{(1860 + j680)} = (0,375 - j0,003); \quad |k_5|^2 = (0,375^2 + 0,003^2) = 0,141.$$

Пресметаните вредности Z_V и Z_T за редните импеданции на одделните водови и трансформатори од мрежата се прикажани во табелата 6.9.1. Во истата табела се сместени и вредностите на пресметаните коефициенти k_i за секоја од гранките од мрежата, пресметани на претходно опишаниот начин.

Табела 6.9.1. Резултати од пресметките на импеданциите $Z(i)$ и коефициентите на распределба k_i

i	елем.	$R(i)$	$X(i)$	$P_\Sigma(i)$	$Q_\Sigma(i)$	$\text{Re}\{k_i\}$	$\text{Im}\{k_i\}$	$ k_i $	$ k_i ^2$	$ k_i ^2 \cdot R(i)$	$ k_i ^2 \cdot X(i)$
/	тип	Ω	Ω	kW	kvar	/	/	/	/	Ω	Ω
1	V1	0.460	0.350	1860	680	1.000	0.000	1.000	1.000	0.460	0.350
2	V2	0.552	0.420	1560	580	0.840	0.005	0.840	0.706	0.390	0.297
3	V3	0.920	0.700	1160	430	0.625	0.003	0.625	0.390	0.359	0.273
4	V4	0.960	0.570	300	100	0.160	-0.005	0.160	0.025	0.024	0.015
5	V5	0.512	0.304	700	250	0.375	-0.003	0.375	0.141	0.072	0.043
6	V6	1.600	0.950	400	150	0.216	0.002	0.216	0.047	0.074	0.044
7	T1	1.638	6.134	400	150	0.216	0.002	0.216	0.047	0.076	0.285
8	T2	1.638	6.134	460	180	0.249	0.006	0.249	0.062	0.102	0.382
9	T3	2.875	9.578	300	100	0.160	-0.005	0.160	0.025	0.073	0.244
10	T4	2.875	9.578	300	100	0.160	-0.005	0.160	0.025	0.073	0.244
11	T5	1.638	6.134	400	150	0.216	0.002	0.216	0.047	0.076	0.285

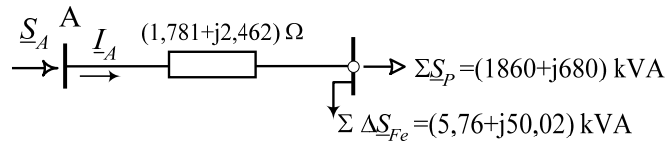
Сумарните загуби во железо, т.е. "константните загуби" се добиваат со сумирање на загубите во железо во сите енергетски трансформатори, т.е.:

$$\Sigma \Delta S_{Fe} = 2 \cdot (0,93 + j8,00) + 3 \cdot (1,3 + j11,34) = (5,76 + j50,02) \text{ kVA}.$$

Параметрите $Z_{ek} = (R_{ek} + jX_{ek})$ на редната гранка на "еквивалентната мрежа" ќе се добие со сумирање на последните две колони од табелата 6.9.1:

$$R_{ek} = \sum_{i=1}^{11} |k_i|^2 \cdot R(i) = 1,781 \Omega; \quad X_{ek} = \sum_{i=1}^{11} |k_i|^2 \cdot X(i) = 2,462 \Omega; \quad Z_{ek} = (1,781 + j2,462) \Omega.$$

Според тоа целата мрежа од сликата 6.9.1 може да се претстави со еквивалентното коло прикажано сликата 6.9.2.



Слика 6.9.2 Еквивалентен модел на дистрибутивната мрежа од слика 6.9.1

Вкупните загуби на моќност во мрежата $\Delta \underline{S}$ ќе се добијат на следниот начин:

$$\underline{S}_{ek} = \Sigma \underline{S}_P + \Sigma \Delta \underline{S}_{Fe} = (1860 + j680) + (5,76 + j50,02) = (1865,76 + j730,02) \text{ kVA};$$

$$\Delta \underline{S} = Z_{ek} \cdot \frac{|\underline{S}_{ek}|^2}{U_n^2} = (1,781 + j2,462) \cdot \frac{1865,76^2 + 730,02^2}{10^2} = (71,5 + j98,8) \text{ kVA}.$$

Според тоа моќноста $\underline{S}_A$ што мрежата ја влече од напојната точка ќе биде:

$$\underline{S}_A = \underline{S}_{ek} + \Delta \underline{S} = (1937,26 + j828,82) = 2082,6 \cdot e^{j22^\circ} \text{ kVA}; \quad I_A = 120,24 \text{ A}.$$

□ □ □

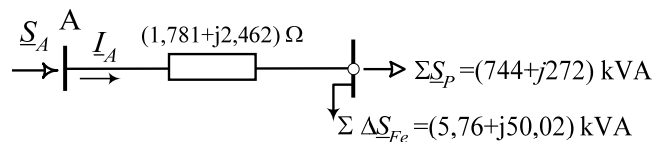
Задача 6.10: Колкави ќе бидат загубите на моќност во мрежата од претходната задача во режимот на минималното оптоварување ако се знае дека е моќностите на потрошувачите во тој режим се за 2,5 пати помали отколку истите во режимот на максималното оптоварување.

Решение:

Бидејќи просторната распределба на товарот во мрежата во режимот на минималното оптоварување ќе биде иста и за режимот на минималното оптоварување, коефициентите на учество k_i , па според тоа и параметрите $Z_{ek} = (R_{ek} + jX_{ek})$ на еквивалентниот модел на мрежата ќе останат исти како и во претходниот режим. Единствената разлика во моделот ќе биде моќноста $\Sigma \underline{S}_P$ на потрошувачката, која сега ќе биде:

$$\Sigma \underline{S}_P = (1860 + j680) / 2,5 = (744 + j272) \text{ kVA}.$$

Според тоа, во режимот на минималното оптоварување ќе се користи следната еквивалентна шема на мрежата:



Слика 6.10.1 Еквивалентен модел на дистрибутивната мрежа од слика 6.9.1 за режимот на минимално оптоварување

Вкупните загуби на моќност во мрежата $\Delta \underline{S}$ сега ќе се бидат помали:

$$\underline{S}_{ek} = \Sigma \underline{S}_P + \Sigma \Delta \underline{S}_{Fe} = (744 + j272) + (5,76 + j50,02) = (749,76 + j322,02) \text{ kVA};$$

$$\Delta \underline{S} = Z_{ek} \cdot \frac{|\underline{S}_{ek}|^2}{U_n^2} = (1,781 + j2,462) \cdot \frac{749,76^2 + 322,02^2}{10^2} = (11,44 + j15,81) \text{ kVA}.$$

Според тоа моќноста $\underline{S}_A$ што мрежата ја влече од напојната точка ќе биде:

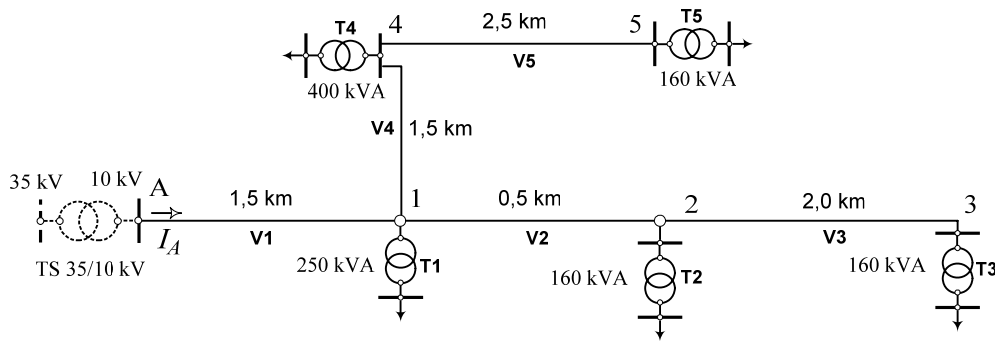
$$\underline{S}_A = \underline{S}_{ek} + \Delta \underline{S} = (761,2 + j337,83) = 832,8 \cdot e^{j23,9^\circ} \text{ kVA}; \quad I_A = 48,08 \text{ A}.$$

□ □ □

Задача 6.11. На сликата 6.11.1 е прикажан извод од една 10 kV надземна мрежа, напојувана од регионална трансформаторска станица TS 35/10 kV/kV. Сите водови во мрежата се со ист

пресек $Al/\check{C} 50/8 \text{ mm}^2$ и со исти подолжни параметри $\underline{z}=(r+jx)=(0,64+j0,38) \Omega/\text{km}$. Со максиграф е отчитана максималната вредност на струјата што мрежата ја презема од напојна точка $I_A=60 \text{ A}$. Покрај тоа со броило се отчитани вредностите на годишните преземени активна и реактивна енергија од мрежата: $W_a = 3.455,4 \text{ MWh}$ и $W_r = 1.135,8 \text{ Mvarh}$. Сите потрошувачи во мрежата се од ист тип – селски домаќинства и имаат приближно ист облик на дневниот дијаграм на оптоварувањето. Исто така може да се смета дека факторот на моќност на потрошувачите $\cos\varphi$ малку се менува во текот на денот и дека е практично константен.

Да се пресметаат загубите на активна моќност во режимот на максималното оптоварување ΔP_M како и годишните загуби на активна електрична енергија ΔW .



Слика 6.11.1 10 kV извод од посматраната надземна дистрибутивната мрежа

Решение:

Бидејќи просторната распределба на товарот во мрежата не е позната ќе ја усвоиме претпоставката дека таа е константна преку целиот ден и дека учеството на моќноста на секој потрошувач од мрежата во сумарната моќност $\underline{S}_A$ е пропорционално на инсталираната моќност на трансформаторот преку којшто тој се напојува. Во тој случај вредностите на коефициентите на учество k_i за поедините гранки од мрежата се пресметуваат сосема едноставно, преку номиналните моќности на одделните трансформатори СН/НН во мрежата, што овозможува едноставно пресметување на параметрите $\underline{Z}_{ek}=(R_{ek}+jX_{ek})$ на еквивалентната импеданција на мрежата.

За илустрација, ќе го пресметаме коефициентот на учество k_4 на гранката бр. 4 (водот V4). Вкупната инсталирана моќност на сите енергетски трансформатори СН/НН во мрежата изнесува:

$$\sum_{j \in \omega_1} S_{nT}(j) = S_{nT1} + S_{nT2} + S_{nT3} + S_{nT4} + S_{nT5} = 250 + 160 + 160 + 400 + 160 = 1130 \text{ kVA}.$$

Множеството трансформатори СН/НН што се напојува преку оваа гранка е $\omega_4 = \{T4, T5\}$, а збирот на нивната инсталирана моќност изнесува:

$$\sum_{j \in \omega_4} S_{nT}(j) = S_{nT4} + S_{nT5} = 400 + 160 = 560 \text{ kVA}.$$

Според тоа, во согласност со релацијата (6.3.4).

$$k_i = \frac{S_{\Sigma}(i)}{\underline{S}_A} = \frac{\sum_{j \in \omega_i} S_{nT}(j)}{\sum S_{nT}} = \text{const.} \quad (i = 1, n_g). \quad (6.3.4)$$

За коефициентот на учество k_4 на водот V4 ќе имаме:

$$k_4 = \frac{\sum_{j \in \omega_4} S_{nT}(j)}{\sum S_{nT}} = \frac{400 + 160}{250 + 160 + 160 + 400 + 160} = \frac{560 \text{ kVA}}{1130 \text{ kVA}} = 0,496.$$

На сличен начин се постапува и при определувањето на коефициентите k_i за останатите гранки од мрежата. Резултатите од пресметките се прикажани во табелата 6.11.1. Податоците за номиналните параметри на енергетските трансформатори, потребни за пресметување на импеданцијата на редната гранка Z_T , се преземени од табелата П.18 од Прилогот 2.

Табела 6.11.1. Резултати од пресметките на импеданциите $Z(i)$ и коефициентите на распределба k_i

i	елем.	$R(i)$	$X(i)$	$\sum_{\omega_j} S_{nt}(j)$	k_i	k_i^2	$ k_i ^2 \cdot R(i)$	$ k_i ^2 \cdot X(i)$
/	тип	Ω	Ω	kVA	/	/	Ω	Ω
1	V1	0.960	0.570	1130	1.000	1.000	0.960	0.570
2	V2	0.320	0.190	320	0.283	0.080	0.026	0.015
3	V3	1.280	0.760	160	0.142	0.020	0.026	0.015
4	V4	0.960	0.570	560	0.496	0.246	0.236	0.140
5	V5	1.600	0.950	160	0.142	0.020	0.032	0.019
6	T1	5.200	15.131	250	0.221	0.049	0.255	0.741
7	T2	9.180	23.254	160	0.142	0.020	0.184	0.466
8	T3	9.180	23.254	160	0.142	0.020	0.184	0.466
9	T4	2.875	9.578	400	0.354	0.125	0.360	1.200
10	T5	9.180	23.254	160	0.142	0.020	0.184	0.466

Сумарните загуби во железо, т.е. "константните загуби" се добиваат со сумирање на загубите во железо во сите енергетски трансформатори, т.е.:

$$\Sigma \Delta S_{Fe} = 3 \cdot (0,46 + j3,20) + (0,65 + j5,00) + (0,93 + j8,00) = (2,96 + j22,60) \text{ kVA.}$$

Параметрите $Z_{ek} = (R_{ek} + jX_{ek})$ на редната гранка на "еквивалентната мрежа" ќе се добијат со сумирање на последните две колони од табелата 6.11.1:

$$R_{ek} = \sum_{i=1}^{10} |k_i|^2 \cdot R(i) = 2,446 \Omega; \quad X_{ek} = \sum_{i=1}^{10} |k_i|^2 \cdot X(i) = 4,099 \Omega; \quad Z_{ek} = (2,446 + j4,099) \Omega.$$

Просечниот фактор на моќност $\cos \varphi$ на товарот ќе го добиеме приближно преку податокот за преземените активна и реактивна енергија W_a и W_r :

$$\tan \varphi = \frac{W_r}{W_a} = \frac{1135,8 \cdot 10^3}{3455,4 \cdot 10^3} = 0,3287 \Rightarrow \cos \varphi = 0,95; \quad \sin \varphi = 0,31225.$$

Според тоа, врвната привидна моќност $S_M = (P_M + jQ_M)$ во режимот на максимално оптоварување ќе биде:

$$P_M = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_A \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 60 \cdot 0,95 = 987,3 \text{ kW};$$

$$Q_M = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_A \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 60 \cdot 0,31225 = 324,5 \text{ kvar};$$

$$S_M = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_A = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 60 = 1039,23 \text{ kVA.}$$

Сега можеме да ги пресметаме (процениме) факторот на товар m , употребното време T_M како и времето на загуби τ .

$$T_M = \frac{W_a}{P_M} = \frac{3455,4 \cdot 10^3}{987,3} = 3500 \text{ h};$$

$$m = \frac{T_M}{T} = \frac{3500}{8760} = 0,399543;$$

$$\theta = \frac{\tau}{T} = 0,17 \cdot m + 0,83 \cdot m^2 = 0,17 \cdot 0,399543 + 0,83 \cdot 0,399543^2 = 0,20042;$$

$$\tau = \theta \cdot T = 0,20042 \cdot 8760 = 1755,7 \text{ h.}$$

Сумарните загуби на активна моќност во мрежата ΔP_{Σ} се состојат од цулови загуби во редните гранки од елементите $\Sigma \Delta P_J = 3 \cdot R_{ek} \cdot I_A^2$ и од загуби во железото на енергетските трансформатори $\Sigma \Delta P_{Fe}$. За режимот на максималното оптоварување струјата во главната делница изнесува $I_A = 60$ A, па според тоа ќе имаме:

$$\Delta P_M = \Sigma \Delta P_J + \Sigma \Delta P_{Fe} = 3 \cdot R_{ek} \cdot I_A^2 + \Sigma \Delta P_{Fe};$$

$$\Delta P_M = 3 \cdot 2,446 \cdot 60^2 + 2.960 = 26.417 + 2.960 = 29.377 \text{ W или}$$

$$\Delta P_M = \Sigma \Delta P_J + \Sigma \Delta P_{Fe} = 26,417 + 2,960 = 29,377 \text{ kW. (2,98 \%)}.$$

Сумарните загуби на активна енергија ΔW_a во мрежата ќе бидат:

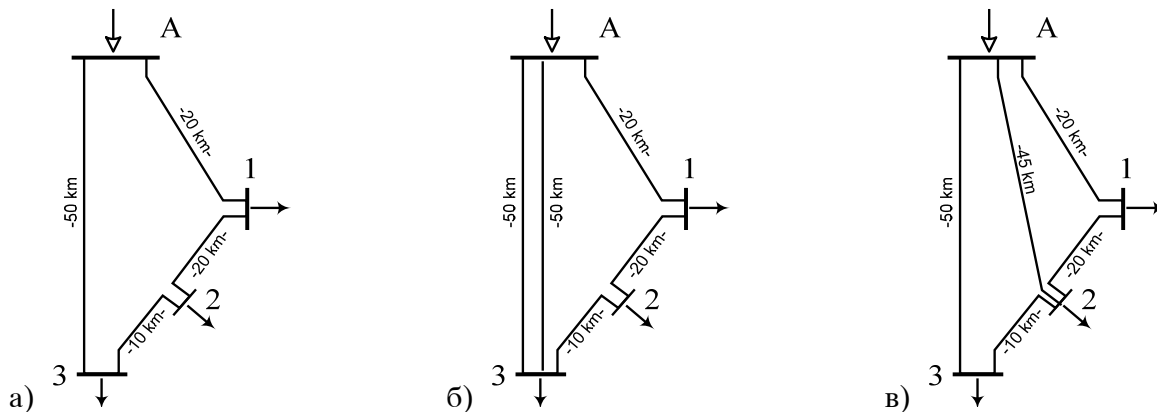
$$\Delta W_a = \Sigma \Delta P_J \cdot \tau + \Sigma \Delta P_{Fe} \cdot T;$$

$$\Delta W_a = 26,417 \cdot 1755,7 + 2,96 \cdot 8760 = 46.380,3 + 25.929,6 = 72.310 \text{ kWh (2,09\%)}.$$

□ □ □

Задача 6.12. На сликата 6.12.1.а е прикажана 110 kV надземна мрежа, изведена со спроводници од типот Al/Č 240/40 mm². Сите водови имаат исти подолжни параметри $\underline{z} = (r+jx) = (0,13+j0,40)$ Ω/km. Должините на водовите се прикажани на самата слика, додека потрошувачите од мрежата во режимот на максималното оптоварување ги имаат следните моќности: $\underline{S}_1 = (40+j20)$ MVA; $\underline{S}_2 = (30+j15)$ MVA; $\underline{S}_3 = (70+j35)$ MVA. Сите потрошувачи се од ист тип и имаат ист дневен, односно годишен, дијаграм на моќност, со употребно време $T_M = 4500$ h/год. ($\tau = 2886$ h/год.) Да се пресметаат годишните загуби на електрична енергија во мрежата за следните три случаи:

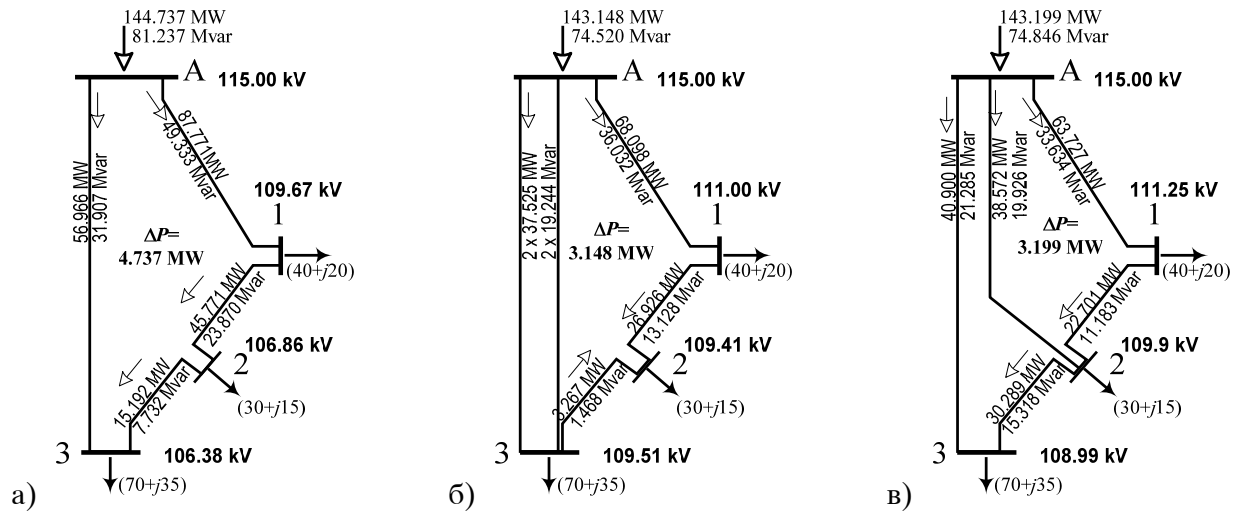
- за постојната состојба, според шемата од сликата 6.12.а;
- доколку се изгради вод помеѓу собирниците А и 3 (слика 6.12.б) со должина $l = 50$ km и со подолжни параметри како и останатите водови;
- доколку се изгради вод помеѓу собирниците А и 2 (слика 6.12.в) со должина $l = 45$ km и со подолжни параметри како и останатите водови.



Слика 6.12.1. 110 kV хомогена надземна јамкаста мрежа пред и после појаувањето

Решение:

Годишните загуби на електрична енергија ΔW ќе ги пресметаме преку загубите на моќност во режимот на врвното оптоварување ΔP_M и преку времето на загуби τ : $\Delta W = \Delta P_M \cdot \tau$. Загубите на моќност ΔP_M , пак, ќе ги добиеме со решавање на тековите на моќности во мрежата во максималниот режим. Бидејќи е мрежата хомогена и престенеста, со една контура во случајот а), односно сложено-затворена со две контури во случајот б), решавањето на тековите на моќности во неа можеме да го вршиме, на пример, со методот на контурни струи, применувајќи го истовремено и методот на раздвојување.



Слика 6.12.2. Текови на моќности во мрежата за секоја нејзина конфигурација

Како резултат од пресметките на секоја од мрежите од сликата 6.12.1, се добива следната распределба, прикажана на сл. 6.12.2. Во пресметките е претпоставено дека напонот во напојната точка изнесува $U_A=115$ kV. Резултатите се добиени со компјутерска програма. Резултатите од пресметките за моќностите и напоните се прикажани и во табелата 6.12.1.

Табела 6.12.1. Моќности (MVA) и напони (kV) во мрежата за разни конфигурации

а) Посвојна состојба на мрежата според сликата 6.12.а. ($\Delta P_a=4,737$ MW)							
Гранка	P' (MW)	Q' (Mvar)	P'' (MW)	Q'' (Mvar)	S (%)	U	kV
A – 1	87.771	49.330	85.771	43.870	78.6	U_A	115.000
1 – 2	45.771	23.870	45.192	22.732	42.4	U_1	109.672
2 – 3	15.192	7.732	15.158	7.942	14.4	U_2	106.857
A – 3	56.966	31.907	54.842	27.058	51.5	U_3	106.378

б) Состојба на мрежата со нов вод A–3, според сликата 6.12.б. ($\Delta P_b=3,148$ MW)							
A – 1	68.098	36.032	66.926	33.128	60.2	U_A	115.000
1 – 2	26.926	13.128	26.734	13.208	24.4	U_1	110.998
2 – 3	-3.266	-1.793	-3.267	-1.468	3.0	U_2	109.408
A – 3	37.525	19.244	36.634	18.234	33.4	U_3	109.507
A – 3	37.525	19.244	36.634	18.234	33.4		

в) Состојба на мрежата со нов вод A–2, според сликата 6.12.в. ($\Delta P_v=3,199$ MW)							
A – 1	63.727	33.634	62.701	31.183	56.3	U_A	115.000
1 – 2	22.701	11.183	22.565	11.436	20.6	U_1	111.254
2 – 3	30.289	15.318	30.164	15.264	27.8	U_2	109.904
A – 3	40.900	21.285	39.836	19.736	36.5	U_3	108.986
A – 2	38.572	19.926	37.724	18.881	34.4		

Според тоа, годишните загуби на електрична енергија за секоја од разгледуваните конфигурации на мрежата ќе бидат:

$$\Delta W_a = \Delta P_a \cdot \tau = 4,737 \cdot 2,886 = 13.671,34 \text{ MWh/год;}$$

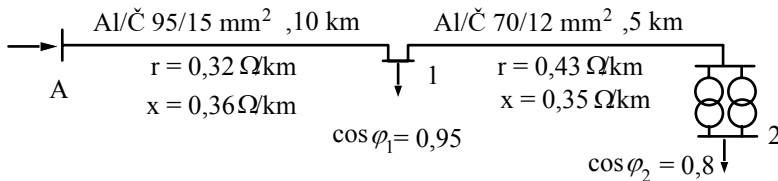
$$\Delta W_b = \Delta P_b \cdot \tau = 3,148 \cdot 2,886 = 9.085,857 \text{ MWh/год;}$$

$$\Delta W_v = \Delta P_v \cdot \tau = 3,379 \cdot 2,886 = 9.751,542 \text{ MWh/год.}$$

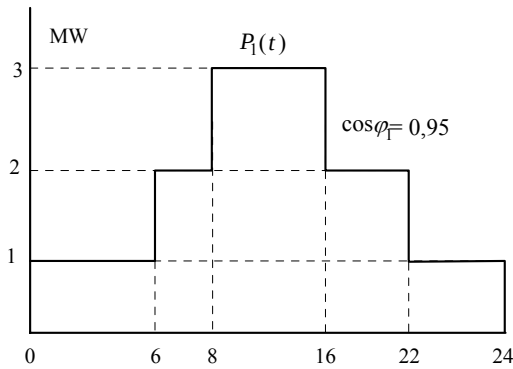
□ □ □

ИСПИТНИ ЗАДАЧИ ОД ОБЛАСТА НА ЗАГУБИ НА МОЌНОСТ И ЕНЕРГИЈА

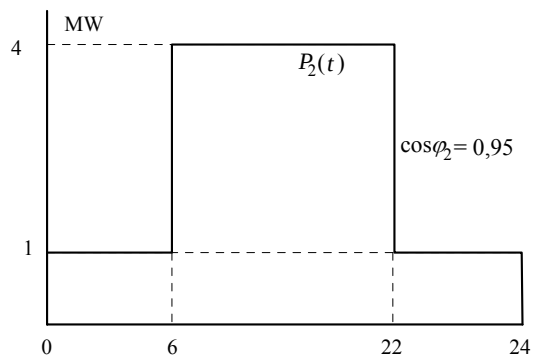
1. Задача (K2 0698/2 и 0605/2). 35 kV мрежа напојува два потрошувача (сл. 1.1) со различни карактеристики и различни дијаграми на оптоварување, прикажани на сликите 1.2 и 1.3. Потрошувачот 2 се напојува преку една трафостаница 35/6 kV/kV во која се наоѓаат два идентични трансформатора со моќности од по 2,5 MVA, при што едниот од нив се исклучува во ноќните саати, во периодот 22⁰⁰ – 6⁰⁰ h. За секој од трансформаторите се познати следните податоци: 35/6 kV/kV 2,5 MVA $u_k = 8\%$ $i_0 = 1\%$ $\Delta P_{Cun} = 24$ kW $\Delta P_{Fe} = 5$ kW. Може да се смета дека сите денови од годината во поглед на оптоварувањето се идентични. Да се пресметаат вкупните годишни загуби на енергија во 35 kV мрежа и во трансформацијата.



Слика 1.1



Слика 1.2



Слика 1.3

Решение:

а) загуби во трансформацијата ΔW_{TR} ; $\Delta P_{Fe} = 5$ kW; $\Delta P_{Cun} = 24$ kW

1 период од 22–06 h; $\Delta t_1 = 8$ h; $P = 1$ MW; $Q = 0,75$ Mvar; $S = 1,25$ MVA; $n = 1$ трансформ. $\alpha = S/S_n = 0,5$

$$\Delta P_1 = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2 = 5 + 24 \cdot 0,5^2 = 11 \text{ kW}; \Delta W_1 = \Delta P_1 \cdot \Delta t_1 = 11 \cdot 8 = 88 \text{ kWh.}$$

2 период од 06 – 22 h; $\Delta t_2 = 16$ h; $P = 4$ MW; $Q = 3$ Mvar; $S = 5$ MVA; $n = 2$ трансформатора. $\alpha = S/S_n = 2$

$$\Delta P_2 = 2 \cdot \Delta P_{Fe} + 0,5 \cdot \Delta P_{Cun} \cdot \alpha^2 = 2 \cdot 5 + 0,5 \cdot 24 \cdot 2^2 = 58 \text{ kW}; \Delta W_2 = \Delta P_2 \cdot \Delta t_2 = 58 \cdot 16 = 928 \text{ kWh.}$$

$$\Delta W_{TR} = \Delta W_1 + \Delta W_2 = \Delta P_1 \cdot \Delta t_1 + \Delta P_2 \cdot \Delta t_2 = 88 + 928 = 1016 \text{ kWh/дневно.}$$

б) загуби во водои V2; $R_2 = 2,15 \Omega$

1 период од 22 – 06 h; $\Delta t_1 = 8$ h; $P = 1$ MW; $Q = 0,75$ Mvar; $S = 1,25$ MVA;

$$\Delta P_1 = (S/U_n)^2 \cdot R_2 = (1,25/35)^2 \cdot 2,15 = 2,742 \text{ kW}; \Delta W_1 = \Delta P_1 \cdot \Delta t_1 = 2,742 \cdot 8 = 21,94 \text{ kWh.}$$

2 период од 06 – 22 h; $\Delta t_2 = 16$ h; $P = 4$ MW; $Q = 3$ Mvar; $S = 5$ MVA;

$$\Delta P_2 = (S/U_n)^2 \cdot R_2 = (5/35)^2 \cdot 2,15 = 43,472 \text{ kW}; \Delta W_2 = \Delta P_2 \cdot \Delta t_2 = 43,472 \cdot 16 = 723,9 \text{ kWh.}$$

$$\Delta W_{V2} = 21,94 + 701,95 = 723,9 \text{ kWh/дневно.}$$

в) загуби во водои V1; $R_1 = 0,32 \cdot 10 = 3,2 \Omega$

1 период од 22 – 06 h; $\Delta t_1 = 8$ h; $P = (1+1) = 2$ MW; $Q = (0,329+0,75) = 1,079$ Mvar; $S = 2,272$ MVA;

$$\Delta P_1 = (S/U_n)^2 \cdot R_1 = (2,272/35)^2 \cdot 3,2 = 13,484 \text{ kW}; \Delta W_1 = \Delta P_1 \cdot \Delta t_1 = 13,484 \cdot 8 = 107,9 \text{ kWh.}$$

2 период од 06–08 и 16–22 h; $\Delta t_2=8$ h; $P=(2+4)=6$ MW; $Q=(0,658+3)=3,658$ Mvar; $S=7,027$ MVA;
 $\Delta P_2 = (S/Un)^2 \cdot R_1 = (7,027/35)^2 \cdot 3,2 = 128,48$ kW; $\Delta W_2 = \Delta P_2 \cdot \Delta t_2 = 128,048 \cdot 8 = 1031,8$ kWh.

3 период од 08–16 h; $\Delta t_3=8$ h; $P=(3+4)=7$ MW; $Q=(0,986+3)=3,986$ Mvar; $S=8,055$ MVA;
 $\Delta P_3 = (S/Un)^2 \cdot R_1 = (8,055/35)^2 \cdot 3,2 = 169,505$ kW; $\Delta W_3 = \Delta P_3 \cdot \Delta t_3 = 169,505 \cdot 8 = 1356$ kWh.

$\Delta W_{V1} = 107,9 + 1031,8 + 1356 = 2495,7$ kWh/дневно.

Вкупни дневни загуби: $\Delta W_{\Sigma\text{-дневно}} = \Delta W_{TR} + \Delta W_{V2} + \Delta W_{V1} = 1016 + 723,9 + 1722,1 = 4235,64$ kWh/ден.

Вкупни годишни загуби: $\Delta W_{\Sigma\text{-годишно}} = 365 \cdot \Delta W_{\Sigma\text{-дневно}} = 365 \cdot 4235,64 = 1.546.007$ kWh/год.

2. Задача (K2 0600/2). Во една индустриска трансформаторска станица 110/6 kV/kV постојат два идентични, паралелно врзани трансформатори. Притоа постојат можности да работи само едниот, или пак обата трансформатора. Потрошувачите што се напојуваат од 6 kV собирници имаат променлив дневен дијаграм на оптоварување, прикажан во табелата 2.1.

Да се пресметаат дневните загуби на активна енергија во трансформацијата за следните два случаја:

- 1) кога обата трансформатора цело време работат во паралела;
- 2) кога едниот од трансформаторите се исклучува во минималниот режим кој трае од 22 часот навечер до 6 часот наутро.

Табела 2.1. Дневен дијаграм на активното и реактивното оптоварување на потрошувачите

Период од денот	6 - 14	14 - 22	22 - 6 наутро
P (MW)	32	25	8
Q (Mvar)	16	12	6

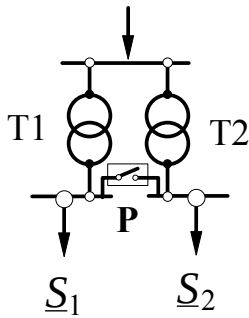
Податоци за еден трансформатор: 20 MVA; 110/6,3 kV/kV; $i_o\%=1\%$; $\Delta P_{Fe}=20$ kW; $\Delta P_{Cun}=120$ kW.

3. Задача (K2 0601/1). Два идентични трансформатора T1 и T2 напојуваат два потрошувача $\underline{S}_1$ и $\underline{S}_2$ (слика 3.1). Првиот потрошувач работи преку целиот ден со константна моќност $\underline{S}_1 = (16+j10)$ MVA, додека вториот потрошувач работи според дијаграмот прикажан на сликата 3.2. Да се пресметаат дневните загуби на енергија во трансформаторот T2 за следните два случаја:

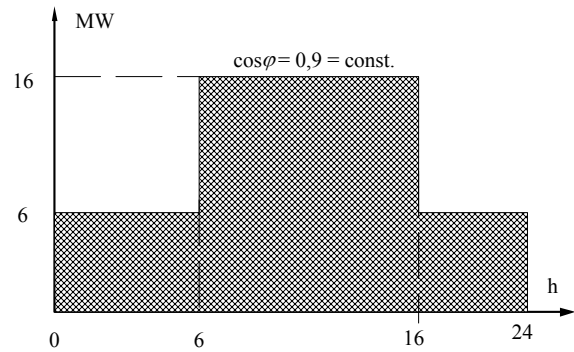
- а) Прекинувачот P е исклучен;
- б) Прекинувачот P е вклучен и трансформаторите работат во паралела.
- в) Колкави ќе бидат загубите на активна моќност ΔP_{T1} и ΔP_{T2} во секој од трансформаторите во режимот на максимално оптоварување при затворен прекинувач P ако трансформаторот T1 работи со номинален преносен однос ($k_{T1} = 110/10,5$) додека трансформаторот T2 работи со преносен однос $k_{T2} = 110/10$.

Податоци за секој од трансформаторите:

20 MVA, 110/10,5 kV/kV; $u_k\% = 11\%$; $i_o\% = 1\%$; $\Delta P_{Cun} = 100$ kW; $\Delta P_{Fe} = 20$ kW.



Слика 3.1



Слика 3.2

4. Задача (K2 0602/3). Во една индустриска трансформаторска станица 110/6 kV/kV постојат два идентични, паралелно врзани трансформатори од типот А, за кои се познати следните податоци.

Податоци за еден од трансформаторите од типот А:

20 MVA; 110/6,3 kV/kV; $i_0\% = 1\%$; $\Delta P_{Fe} = 20$ kW; $\Delta P_{Cun} = 120$ kW

Притоа постојат можности да работи само едниот, или пак обата трансформатора. Потрошувачите што се напојуваат од 6 kV собирници имаат променлива моќност $\underline{S}$, така што е:

$\underline{S} = \underline{S}_1 = (10 + j6)$ MVA за периодот од 0 - 6 h и

$\underline{S} = \underline{S}_2 = (30 + j20)$ MVA за периодот од 6 - 24 h.

Да се пресметаат дневните загуби на активна енергија во трансформацијата за следните два случаја:

- 1) кога обата трансформатора цело време работат во паралела;
- 2) кога едниот од трансформаторите се исклучува во минималниот режим од 0-6 h.

5. Задача (K2 0603/2). На сликата 5.1 е прикажана 20 kV надземна мрежа составена од две секции со следните параметри:

V1: $l_1 = 4$ km; спроводници Al/Fe 50/8; $\underline{z}_1 = (0,6 + j0,38)$ Ω/km ;

V2: $l_2 = 3$ km; спроводници Al/Fe 35/6; $\underline{z}_2 = (0,85 + j0,40)$ Ω/km .

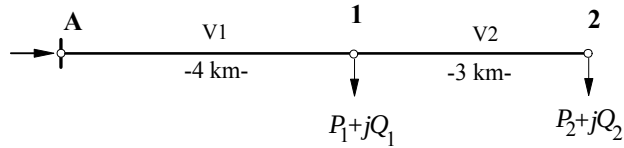
Обата потрошувача работат со променливо оптоварување во текот на денот. Податоците за нивните дневни дијаграми се прикажани во табелата 1. Да се пресмета:

Табела 5.1

интервал (h)	P_1 (MW)	Q_1 (Mvar)	P_2 (MW)	Q_2 (Mvar)
0 - 6	0.5	0.2	1.0	0.4
6 - 8	2.0	0.6	1.0	0.4
8 - 14	3.0	0.8	2.4	1.0
14 - 24	0.5	0.2	1.0	0.4

- а) загубата на напон ΔU и загубата на моќност во мрежата ΔP за режимот на максимално оптоварување;
- б) дневните загуби на активна енергија во мрежата ΔW_d ;
- в) загубата на напон $\Delta U'$ и загубата на моќност во мрежата $\Delta P'$ во режимот на максимално оптоварување ако во јазелот 1 се инсталира кондензаторска батерија која преку целиот ден ќе работи со моќност $Q_{KB} = 1,2$ Mvar.

- г) дали е економски исплатливо инсталирањето на батеријата ако со нејзиното инсталирање дневните загуби на активна енергија се намалат за 6,5%. Цената на батеријата изнесува $K_{KB} = 50.000$ п.е. додека цената на изгубениот kWh изнесува $c_{\Delta W} = 0,15$ п.е. Стапките на амортизација и одржување на кондензаторската батерија KB изнесуваат 7,5% и 2,5% респективно, а коефициентот на ефективност на инвестициите изнесува $p_n = 10\%$.



Слика 5.1

Решение:

Врз основа на податоците за дневните дијаграми на потрошувачите се добива дека режимот на максимално оптоварување настапува во периодот од 8 до 14 h. Во тој режим ќе имаме:

$$a) \Delta U = \frac{P_{A-1} \cdot R_1 + Q_{A-1} \cdot X_1}{U_n} + \frac{P_{1-2} \cdot R_2 + Q_{1-2} \cdot X_2}{U_n} = \frac{5,4 \cdot 2,4 + 1,8 \cdot 1,52}{20} + \frac{2,4 \cdot 2,55 + 1,0 \cdot 1,2}{20} = 1,151 \text{ kV (5,76\%)}$$

$$\Delta P = \Delta P_{A-1} + \Delta P_{1-2} = \frac{P_{A-1}^2 + Q_{A-1}^2}{U_n^2} \cdot R_1 + \frac{P_{1-2}^2 + Q_{1-2}^2}{U_n^2} \cdot R_2 = \frac{5,4^2 + 1,8^2}{20^2} \cdot 2,4 + \frac{2,4^2 + 1,0^2}{20^2} \cdot 2,55 = 237,5 \text{ kW.}$$

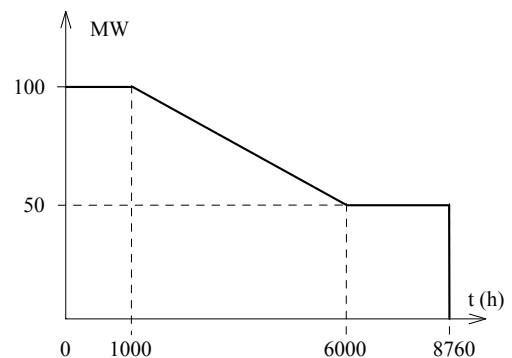
$$b) \Delta W_d = \sum \Delta P_i \cdot \Delta t_i = 23,1 \cdot 6 + 67,4 \cdot 2 + 237,5 \cdot 6 + 23,1 \cdot 10 = 1929,4 \text{ kWh/дневно.}$$

в) По инсталирањето на KB со $Q_{KB}=1,2$ Mvar реактивната моќност Q_{A-1} во максималниот режим ќе се намали на 1,6 Mvar. Затоа загубите на напон и моќност ќе се намалат на вредностите:

$$\Delta P' = \text{kW}; \Delta U' = \text{kV (\%)}$$

г) Год. заштеди на енергија заради поставувањето на KB ќе бидат $0,065 \cdot 1929,4 \cdot 365 = 41.902$ MWh/god., или 6.285 п.е./год. Во исто време пресм. год. трошоци ќе се зголемат за $(p_n + \alpha_a + \alpha_p) \cdot K_{KB} = 0,2 \cdot 50.000 = 10.000$, што значи дека инст. на KB е од економски аспект тоа е неоправдано.

6. Задача (PI 0996/3). На сликата е прикажан подредениот годишен дијаграм на оптоварување на еден потрошувач. Потрошувачот работи преку целата година со константен фактор на моќност. Да се пресметаат времето на максимална моќност T_M и времето на загуби τ на потрошувачот.

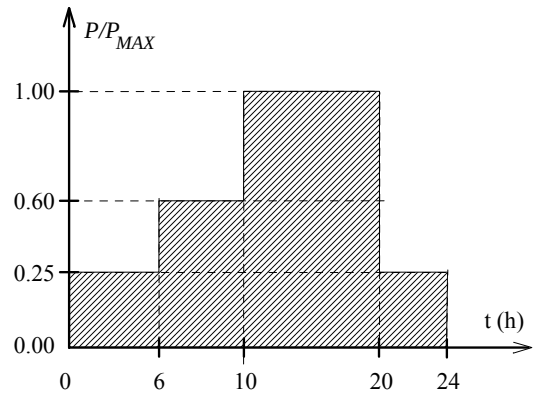


7.Задача (PI 1196/2). Индустриски потрошувач со максимална моќност $P_M = 32 \text{ MW}$; $\cos \varphi = 0,8 = \text{const.}$ и со променлив дијаграм на отоварување (види сл. 7.1) се напојува од една трансформаторска станица TS 110/35 kV. Во трафостаницата се наоѓаат два идентични, паралелно врзани трансформатори, со следните податоци (податоци за еден трансформатор):

20 MVA; 110/36,75 kV/kV $u_k\% = 11\%$; $i_o\% = 0,8\%$;
 $\Delta P_{Cun} = 130 \text{ kW}$; $\Delta P_{Fe} = 22 \text{ kW}$.

Обата трансформатора преку денот работат во паралела, освен во режимот на минимално оптоварување, во периодот од 20⁰⁰ навечер, до 6⁰⁰ часот наутро, кога едниот од нив се исклучува.

Да се пресметаат дневните загуби на активна и реактивна енергија во трансформацијата ΔW_A и ΔW_R .



Слика 7.1

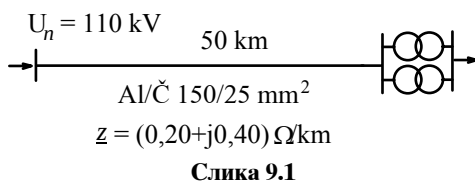
8. Задача (PI 0297/2). Два идентични трансформатора T1 и T2 работат во паралела. Трансформаторот T1 работи со преносен однос $k_{T1} = 10,5/0,4 \text{ kV/kV}$, додека трансформаторот T2 работи со номинален преносен однос $k_{T2} = k_{Tn} = 10/0,4 \text{ kV/kV}$. Напонот на високонапонската (ВН) страна изнесува 10 kV. Да се пресметаат:

- Оптоварувањата на трансформаторите $\underline{S}_{T1}$ и $\underline{S}_{T2}$ во режим на празен од;
- Оптоварувањата на трансформаторите $\underline{S}_{T1}$ и $\underline{S}_{T2}$ кога нивниот заеднички потрошувач, приклучен на нисконапонската (НН) страна, има моќност $\underline{S}_P = (950 + j330) \text{ kVA}$.

Номинални податоци за еден трансформатор:

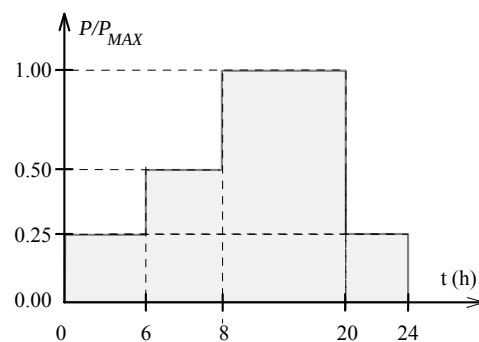
10/0,4 kV/kV ; 630 kVA ; $i_o\% = 1,8\%$; $u_k\% = 4\%$; $\Delta P_{Cun} = 6,5 \text{ kW}$; $\Delta P_{Fe} = 1,3 \text{ kW}$.

9.Задача (PI 0697/2). Индустриски потрошувач со максимална моќност $P_M = 32 \text{ MW}$; $\cos \varphi = 0,8 = \text{const.}$ и со променлив дијаграм на оптоварување (види сл. 9.1) се напојува преку 110 kV вод и една трансформаторска станица TS 110/35 kV (слика 9.2). За водот се познати следните податоци: $l = 50 \text{ km}$ Al/Č 150/25 $r = 0,20 \Omega/\text{km}$ $x = 0,40 \Omega/\text{km}$.



Слика 9.1

Во трафостаницата се наоѓаат два идентични, паралелно врзани трансформатори, со следните податоци (податоци за еден трансформатор): 20 MVA 110/36.75 kV/kV; $u_k\% = 12\%$;
 $\Delta P_{Cun} = 120 \text{ kW}$ $\Delta P_{Fe} = 25 \text{ kW}$.



Слика 9.2

Обата трансформатора преку денот работат во паралела, освен во режимот на минимално оптоварување, во периодот од 20⁰⁰ навечер, до 6⁰⁰ часот наутро, кога едниот од нив се исклучува.

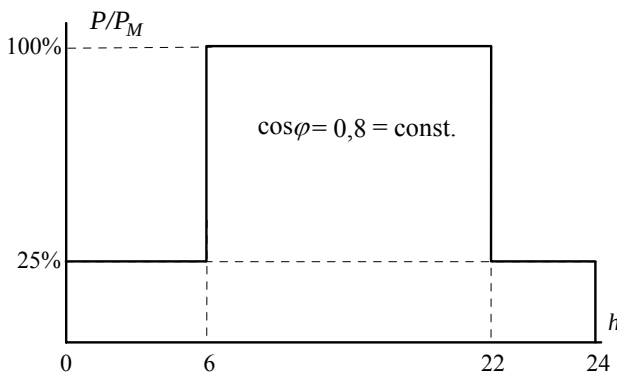
Да се пресметаат вкупните дневните загуби на активна и реактивна енергија ΔW_A и ΔW_R во преносниот вод и во трансформацијата.

10.Задача (PI 0698/2). На сликата 10.1 е прикажан дневниот дијаграм на еден индустриски потрошувач, напојуван преку преносниот систем од сликата 10.2. Сите денови од годината имаат ист облик на дневниот дијаграм и преку целиот ден потрошувачот работи со константен фактор на моќност $\cos \varphi = 0,8 = \text{const.}$ Врвното оптоварување на потрошувачот на почетокот на разгледуваниот период изнесува $P_{M0} = 12 \text{ MW}$ и од година во година расте со константен тренд на пораст од 5% годишно ($x = 1,05$), според законот $P_M(t) = P_{M0} \cdot x^t$ ($t = 1, 2, 3 \dots$). Преносниот систем се состои од 110 kV вод со должина $l = 20 \text{ km}$ и со подолжни параметри $z = (0,2 + j0,4) \Omega/\text{km}$ и трансформатор Т за кој се познати следните податоци: 110/6,3 kV/kV; 25 MVA; $u_k = 11\%$; $i_0 = 0,8\%$; $\Delta P_{\text{Cun}} = 250 \text{ kW}$; $\Delta P_{\text{Fe}} = 55 \text{ kW}$. Да се пресмета:

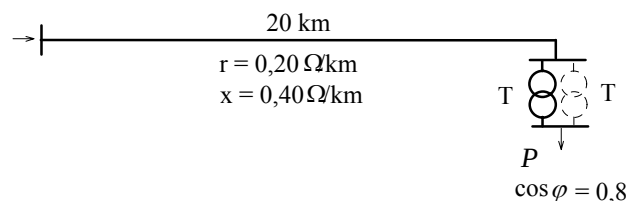
а) После колку години $m = ?$ привидната моќност на потрошувачот ќе ја надмине номиналната моќност на трансформаторот Т така што ќе биде потребно да се постави уште еден таков трансформатор, паралелно со првиот, за да не дојде до негово преоптоварување ?

б) Дали е економски поповолно вториот трансформатор да се инсталира веднаш, уште на почетокот, во годината $t = 0$, или пак е поповолно да се чека тоа да се направи кога ќе биде неопходно, на крајот на m -тата година, за да не дојде до преоптоварување на првиот трансформатор.

Бројни податоци: Цена на трансформаторот Т $K_T = 5 \cdot 10^6$ п.е; цена на загубената ел. енергија $c_{\Delta W} = 1$ п.е./kWh; стапка на амортизација и одржување на трансформаторот Т $\alpha_a = 6\%$ и $\alpha_p = 3\%$, стапка на актуализација $p_a = 10\%$ (п.е. = парична единица).



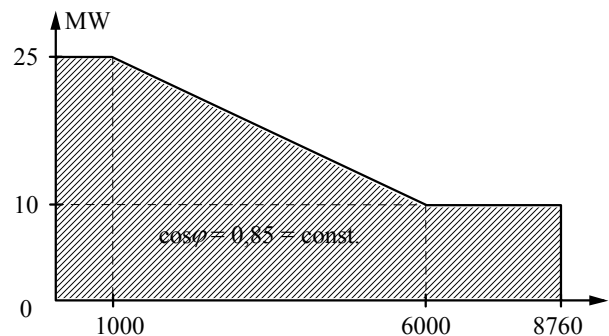
Слика 10.1



Слика 10.2

11. Задача: На сликата 1 е прикажан подредениот годишен дијаграм на еден потрошувач. Потрошувачот ја зема енергијата преку трансформатор Т со познати номинални податоци: $S_n = 31,5 \text{ MVA}$; $U_{1n}/U_{2n} = 110/10,5 \text{ kV/kV}$; $u_k\% = 12\%$; $i_0\% = 0,8\%$; $\Delta P_{\text{Cun}} = 280 \text{ kW}$; $\Delta P_{\text{Fe}} = 75 \text{ kW}$.

Може да се смета дека факторот на моќност на потрошувачот изнесува $\cos \varphi = 0,85$ и е константен преку целата година.



Слика 11.1

Да се пресметаат вкупните год. загуби на активна енергија ΔW во трансформацијата. Колкави ќе бидат загубите ΔW ако место еден, постојат два идентични, паралелно врзани трансформатори.

12. Задача (K2 0600/2). Во една индустриска трансформаторска станица 110/6 kV/kV постојат два идентични, паралелно врзани трансформатора. Притоа постојат можности да работи само едниот, или пак обата трансформатора. Потрошувачите што се напојуваат од 6 kV собирници имаат променлив дневен дијаграм на оптоварување, прикажан во табелата 12.1.

Да се пресметаат дневните загуби на активна енергија во трансформацијата за следните два случаја:

- 1) кога обата трансформатора цело време работат во паралела;
- 2) кога едниот од трансформаторите се исклучува во минималниот режим кој трае од 22 часот навечер до 6 часот наутро.

Табела 12.1. Дневен дијаграм на активното и реактивното оптоварување на потрошувачите

Период од денот	6 - 14	14 - 22	22 - 6 наутро
P (MW)	32	25	8
Q (Mvar)	16	12	6

Податоци за еден трансформатор: 20 MVA; 110/6,3 kV/kV; $i_0\% = 1\%$; $\Delta P_{Fe} = 20$ kW; $\Delta P_{Cun} = 120$ kW

13. Задача (K2 0602/3). Во една индустриска трансформаторска станица 110/6 kV/kV постојат два идентични, паралелно врзани трансформатори за кои се познати следните податоци: 20 MVA; 110/6,3 kV/kV; $i_0\% = 1\%$; $\Delta P_{Fe} = 20$ kW; $\Delta P_{Cun} = 120$ kW.

Притоа постојат можности да работи само едниот, или пак обата трансформатора. Потрошувачите што се напојуваат од 6 kV собирници имаат променлива моќност $\underline{S}$, така што е:

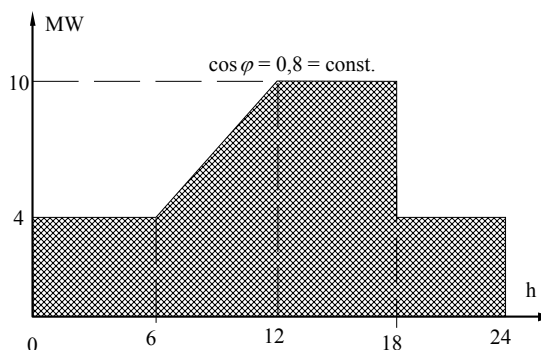
$\underline{S} = \underline{S}_1 = (10+j6)$ MVA за периодот од 0 ÷ 6 h и $\underline{S} = \underline{S}_2 = (30+j20)$ MVA за периодот од 6 ÷ 24 h.

Да се пресметаат дневните загуби на активна енергија во трансформацијата за следните два случаја:

- 1) кога обата трансформатора цело време работат во паралела;
- 2) кога едниот од трансформаторите се исклучува во минималниот режим од 0-6 h.

14. Задача (PI 06/2/3). На сликата 14.1 е прикажан дневниот дијаграм на оптоварување на еден потрошувач. Потрошувачот преку целиот ден работи со константен фактор на моќност $\cos \varphi = 0,8 = \text{const.}$ Да се пресмета:

- а) испорачаната електрична енергија во текот на еден ден W ,
- б) времето на максимална моќност T_M ,
- в) времето на загуби τ .



Слика 14.1

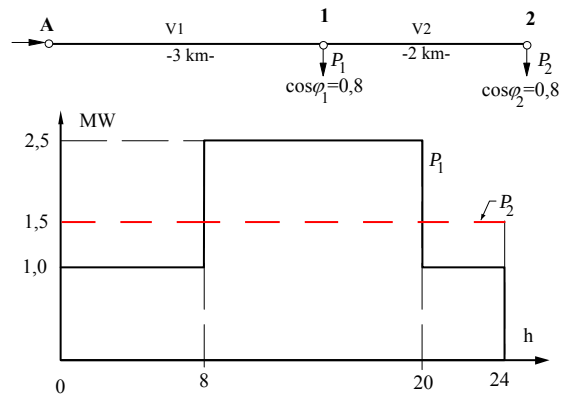
15. Задача (PI 0203/2). На сликата 15.1 е прикажана 10 kV кабелска мрежа составена од две секции со следните параметри:

V1: $l_1 = 3$ km; кабел тип ХНР 48 А 3x1x150/25 6/10 kV $z = (0,2 + j0,06) \Omega/\text{km}$;

V2: $l_2 = 2$ km; кабел тип ХНР 48 А 3x1x150/25 6/10 kV $z = (0,2 + j0,06) \Omega/\text{km}$.

Дневните дијаграми на потрошувачите $P_1(t)$ и $P_2(t)$, кои преку целиот ден работат со константен фактор на моќност $\cos\varphi = 0,8 = \text{const.}$ се исто така прикажани на сликата. Да се пресмета:

- загубата на напон во мрежата, во %, за режимот на максимално оптоварување;
- дневните загуби на активна енергија во мрежата ΔW_d ;
- дневните загуби на активна енергија во мрежата $\Delta W'_d$ ако во точката 2 се инсталира кондензаторска батерија која преку целиот ден ќе работи со моќност $Q_{KB} = 1,5$ Mvar.
- дали е економски исплатливо инсталирањето на батеријата ако цената на батеријата изнесува $K_{KB} = 60.000$ п.е. додека цената на изгубениот kWh изнесува $c_{\Delta W} = 0,1$ п.е. Стапките на амортизација и одржување на кондензаторската батерија КБ изнесуваат 7,5% и 2,5% респективно, а коефициентот на ефективност на инвестициите $p_n = 10\%$.



Слика 15.1

16. Задача (PI0403/2). Во ТС СН/НН е приклучен индустриски потрошувач чија моќност во режимот на максимално оптоварување, кое трае од 6-22 часот, изнесува $\underline{S} = (P + jQ) = (240 + j180)$ kVA, додека во преостанатиот дел од денот оптоварувањето е практично 0. Во трафостаницата е инсталиран трансформатор T1 со номинална моќност $S_{n1} = 400$ kVA. Да се пресмета:

- Колкава е загубата на напон и загубата на активна моќност ΔP_1 во трансформацијата во режимот на максимално оптоварување;
- Постои можност за замена на трансформаторот T1 со нов, поголем, трансформатор T2 со моќност $S_{n2} = 630$ kVA. Да се утврди дали оваа замена ќе биде поволна од аспект на намалување на загубите на активна енергија во трансформацијата.
- Колкави ќе бидат годишните заштеди на електрична енергија после извршената замена.

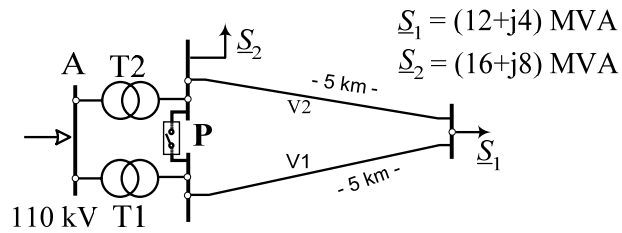
Карактеристики на трансформаторите:

T1: 10/0,4 kV/kV; 400 kVA; $u_k\% = 4\%$; $i_0\% = 2,0\%$; $\Delta P_{Fe} = 930$ W; $\Delta P_{Cun} = 4600$ W.

T2: 10/0,4 kV/kV; 630 kVA; $u_k\% = 4\%$; $i_0\% = 1,8\%$; $\Delta P_{Fe} = 1300$ W; $\Delta P_{Cun} = 6500$ W.

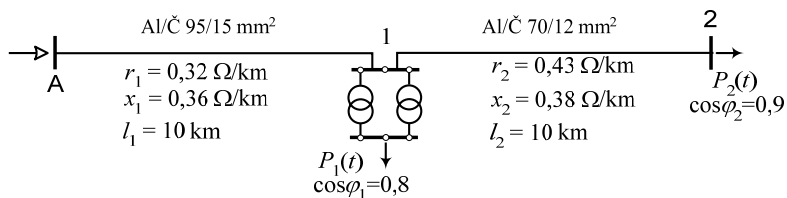
17. Задача (PI 0904/2). На сликата 17.1 е прикажана една 10 kV мрежа, напојувана од два трансформатора T1 и T2. Обата трансформатора имаат идентични карактеристики: 20 MVA, 110/10,5 kV/kV; $u_k\% = 12\%$; $i_0\% = 1\%$; $\Delta P_{Cun} = 100$ kW; $\Delta P_{Fe} = 20$ kW. Во разгледуваниот режим трансформаторот T2 работи со номинален преносен однос $k_{T2} = 110/10,5$ kV/kV, додека трансформаторот T1 работи со преносен однос $k_{T1} = 110/10$ kV/kV. Водовите V1 и V2 имаат исти должини $l_1 = l_2 = 5$ km и исти подолжни карактеристики $z = (r + jx) = (0,32 + j0,12) \Omega/\text{km}$. Податоците за потрошувачите се дадени на самата слика 17.1.

Да се пресметаат загубите на активна моќност во трансформаторот T2 во следните два случаја: 1) кога прекинувачот P е исклучен и 2) кога прекинувачот P е вклучен.

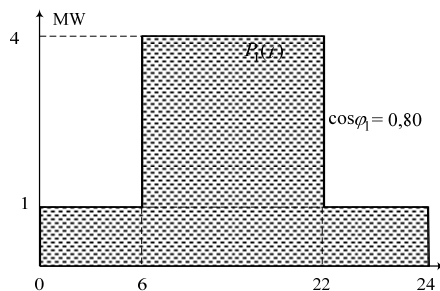


Слика 17.1

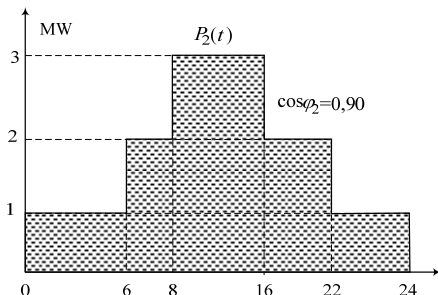
18.Задача (PI 0605/2). 35 kV мрежа напојува два потрошувача P_1 и P_2 (слика 18.1) со различни карактеристики и различни дијаграми на оптоварување, прикажани на сликите 18.2 и 18.3. Потрошувачот P_1 се напојува преку една трафостаница 35/6 kV/kV во која се наоѓаат два идентични трансформатора со моќности од по 2,5 MVA, при што едниот од нив се исклучува во ноќните саати, во периодот 22⁰⁰ – 6⁰⁰ h. За секој од трансформаторите се познати следните податоци: 35/6 kV/kV 2,5 MVA $u_k = 8\%$ $i_o = 1\%$ $\Delta P_{Cun} = 24 \text{ kW}$ $\Delta P_{Fe} = 5 \text{ kW}$. Може да се смета дека сите денови од годината во поглед на оптоварувањето се идентични. Да се пресметаат вкупните годишни загуби на енергија: а) во трансформацијата; б) во 35 kV мрежа.



Слика 18.1

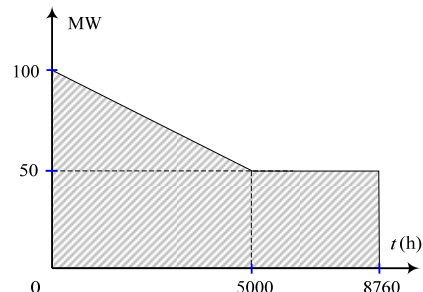


Слика 18.2



Слика 18.3

19.Задача (PI 0605/3). На сликата 19.1 е прикажан подредениот годишен дијаграм на оптоварување на еден потрошувач. Потрошувачот работи преку целата година со константен фактор на моќност. Да се пресметаат времето на максимална моќност T_M и времето на загуби τ на потрошувачот.



Слика 19.1

7. ТЕХНИЧКО-ЕКОНОМСКИ АНАЛИЗИ

Пример 7.1. Индустриски потрошувач треба да се напојува со електрична енергија преку еден 110 kV далекувод со должина $l = 50$ km. Дневниот дијаграм на промената на оптоварувањето на потрошувачот е даден во следната табела:

Табела 7.1.1. Податоци за дневниот дијаграм на оптоварување

Временски период (h)	0 – 6	6 – 22	22 – 24
Однос P/P_M	0,2	1,0	0,2

Потрошувачот работи цело време со константен фактор на моќност $\cos \varphi = 0,8 = \text{const.}$ Максималната моќност на потрошувачот P_M од година во година се менува (расте), и тоа на следниот начин:

$$P_M(0) = P_M(1) = 30 \text{ MW} ; \quad P_M(2) = 40 \text{ MW} ; \quad P_M(3) = 50 \text{ MW} ;$$

$$P_M(4) = P_M(5) = \dots = P_M(20) = 60 \text{ MW}.$$

Споменатиот вод треба да биде изведен со спроводници Al/Č 240/40 mm² ($R_1 = r_1 \cdot l = 6,15 \Omega$) и неговата цена ќе биде $K_1 = 500 \cdot 10^6$ парични единици (п.е.).

Да се пресметаат тековните трошоци во работењето по години и да се пресмета сумата на вкупните актуализирани трошоци за изградбата и експлоатацијата на преносниот вод за првите $n = 20$ години од работењето на потрошувачот.

Актуализацијата да се врши со стапка $p_a \% = 10\%$. Стапките на амортизација и одржување на преносниот вод изнесуваат $\alpha_a \% = 3,3\%$ и $\alpha_p \% = 1,5\%$, респективно.

Цената на изгубениот киловатчас изнесува $c_{\Delta W} = 10$ п.е.

Да се испита дали во истите услови напојувањето преку двосистемски вод ($2 \times 3 \times \text{Al/Č } 150/25 \text{ mm}^2$) изведен со спроводници од типот Al/Č 150/25 mm² и чија цена е за 30% повисока од претходната, ќе претставува економски поповолно решение. Активната отпорност (по фаза) на двосистемскиот вод изнесува $R_2 = r_2 \cdot l = 5 \Omega$.

Решение:

Тековните трошоци f , во општ случај, можеме да ги поделиме на два дела: константен дел k (трошоци за амортизација и одржување на далекуводот) и дел што е зависен од оптоварувањето (променлив дел) Δ и кој ги опфаќа трошоците заради загубената електрична енергија во преносот:

$$f = k + \Delta(i) ; \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Ќе ја посматраме варијантата кога напојувањето на потрошувачот се врши со надземен вод со спроводници од типот Al/Č 240/40 mm². Оваа варијанта ќе ја означиме со бројот 1, а понатаму сите трошоци сврзани со неа ќе го добијат индексот "1".

Константниот дел од трошоците е за сите години ист и изнесува:

$$k = k_1 = (a_a + a_p) \cdot K_1 = (3,3/100 + 1,5/100) \cdot 500 \cdot 10^6 = 24 \cdot 10^6 \text{ п.е./год.}$$

Променливиот дел од трошоците во случајов ќе расте од година во година во текот на првите четири години од разгледуваниот период, Потоа, во натамошниот период, бидејќи оптоварувањето ќе биде константно, и овој дел од трошоците нема да се менува.

Ќе ја посматраме најнапред првата година од работењето ($t = 1$), кога врвното оптоварување на потрошувачот ќе изнесува $P_M = P_{M1} = 30 \text{ MW}$. Дневните загуби на електрична енергија во преносниот вод ΔW_{d1} во овој случај ќе бидат:

$$\Delta W_{d1} = \sum \Delta P_i \cdot \Delta t_i = \sum \frac{R_1 \cdot P_i^2}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi} \cdot \Delta t_i, \text{ или:}$$

$$\Delta W_{d1} = \frac{6,15 \cdot 6^2}{110^2 \cdot 0,8^2} \cdot 6 + \frac{6,15 \cdot 30^2}{110^2 \cdot 0,8^2} \cdot 16 + \frac{6,15 \cdot 6^2}{110^2 \cdot 0,8^2} \cdot 2 = 11,665 \text{ MWh/ден.},$$

додека соодветните годишни загуби на електрична енергија во текот на првата година ќе изнесуваат:

$$\Delta W_1 = 365 \cdot \Delta W_{d1} = 4.257,6 \text{ MWh.}$$

Нивната вредност, како трошок, ќе изнесува:

$$\Delta_1(1) = c_{\Delta W} \cdot \Delta W_1(1) = 10 \cdot 4.257 \cdot 10^3 = 42,76 \cdot 10^6 \text{ п.е.}$$

Според тоа, тековните трошоци $f_1(1)$ остварени во текот на првата година од работењето ќе бидат:

$$f_1(1) = k_1 + \Delta_1(1) = 24 \cdot 10^6 + 42,576 \cdot 10^6 = 66,576 \cdot 10^6 \text{ п.е.}$$

На сличен начин се определуваат и тековните трошоци за преостанатите години од разгледуваниот период. Резултатите од пресметките се прикажани во табелата 7.1.2. Притоа во табелата се внесени тековните трошоци во работењето за споменатите две варијанти на напојувањето на потрошувачот: 1. напојување со едносистемски далекувод, со спроводници Al/Č 240/40 mm² и 2. напојување со двосистемски далекувод, со спроводници Al/Č 150/25 mm²

Табела 7.1.2. Приказ на хронолошкиот редослед на остварувањето на трошоците

год.	P_{Mi} (MW)	3xAl/Č 240/40 mm ²			2x3xAl/Č 150/40 mm ²		
		ΔW_i (MWh)	Δ_i $\times 10^6$ п.е.	f_i $\times 10^6$ п.е.	ΔW_i (MWh)	Δ_i $\times 10^6$ п.е.	f_i $\times 10^6$ п.е.
1	30	4257,6	42,576	66,576	3641,4	36,414	67,614
2	40	7569,1	75,691	99,691	6153,7	61,537	92,737
3	50	11826,7	118,267	162,267	9615,2	96,152	127,352
4	60	17030,4	170,304	194,030	13845,9	138,459	169,659
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
20	60	17030,4	170,304	194,030	13845,9	138,459	169,659

Сумата на актуализираните трошоци Σ_1 за првиот случај ќе изнесува:

$$\Sigma_1 = K_1 + \sum_{i=1}^n \frac{f_1(i)}{q^i} = 10^6 \cdot \left(500 + \frac{66,576}{q} + \frac{99,691}{q^2} + \dots + \frac{194,030}{q^{20}} \right)$$

$$\Sigma_1 = 2145 \cdot 10^6 \text{ п.е.}$$

Слично на тоа, за втората можност на напојувањето (со двосистемски вод) добиваме:

$$\Sigma_2 = K_2 + \sum_{i=1}^n \frac{f_2(i)}{q^i} = 10^6 \cdot \left(650 + \frac{67,614}{q} + \frac{92,737}{q^2} + \dots + \frac{169,659}{q^{20}} \right)$$

$$\Sigma_2 = 2264 \cdot 10^6 \text{ п.е.}$$

□ □ □

Пример 7.2. Индустриски потрошувач се наоѓа на 50 km од најблиската распределителна точка и треба да се напојува со електрична енергија на ниво 110 kV. Потрошувачот ги има следните карактеристики: $P_M = 40 \text{ MW}$; $\cos \varphi = 0,8$; $T_M = 4500 \text{ h}$. За напојување на потрошувачот можни се две варијанти:

- 1) изградба на 110 kV далекувод со спроводници Al/Č 240/40 mm², чија единечна цена изнесува $k_1 = 1 \cdot 10^6$ ден./km;

2) изградба на 110 kV далекувод со спроводници Al/Č 150/25 mm², чија единечна цена изнесува $k_2 = 0,8 \cdot 10^6$ ден./km.

Обата далекуводи се со челично-решеткисти столбови и стапките за нивната амортизација и одржување изнесуваат $\alpha_a\% = 3\%$ и $\alpha_p\% = 2,5\%$, додека цената на изгубениот kWh изнесува $c_{\Delta W} = 1$ ден./kWh. Со помош на методот на пресметковни годишни трошоци да се утврди која од овие две варијанти е економски поповолна.

Решение:

1) Варијантата со спроводници Al/Č 240/40 mm² ($r_1 = 0,129 \Omega/\text{km}$; $x_1 = 0,39 \Omega/\text{km}$; $k_1 = 1 \cdot 10^6$ ден./km).

Инвестиционите трошоци K_1 во оваа варијанта ќе бидат: $K_1 = k_1 \cdot l = 50 \cdot 10^6$ ден.

Годишните трошоци за амортизација и одржување на далекуводот ќе бидат:

$$K_a + K_p = (\alpha_a + \alpha_p) \cdot K_1 = (0,03 + 0,025) \cdot 50 \cdot 10^6 = 2,75 \cdot 10^6 \text{ ден./годишно.}$$

Загубите на активната моќност во режимот на максимално оптоварување ќе изнесуваат:

$$\Delta P_{M1} = 3 \cdot R_1 \cdot I_M^2 \approx R_1 \cdot \frac{P_M^2}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi} = (0,129 \cdot 50) \cdot \frac{40^2}{110^2 \cdot 0,8^2} = 1,333 \text{ MW.}$$

Времето на загуби τ може приближно да се процени преку познатата вредност на времето на максимална моќност T_M , со помош на следната формула:

$$\tau = (0,124 + T_M/10.000)^2 \cdot 8760 = (0,124 + 0,45)^2 \cdot 8760 = 2886 \text{ часови годишно.}$$

Годишните загуби на активната енергија ќе бидат:

$$\Delta W_1 = \Delta P_{M1} \cdot \tau = 1,333 \cdot 2886 = 3847 \text{ MWh/год. } (\Delta W_1 = 3,847 \cdot 10^6 \text{ kWh/год.})$$

а соодветните трошоци за изгубената електрична енергија во преносот ќе изнесуваат:

$$\Delta_1 = c_{\Delta W} \cdot \Delta W_1 = 1 \cdot 3,847 \cdot 10^6 = 3,847 \cdot 10^6 \text{ ден./год.}$$

Според тоа, вкупните тековни годишни трошоци на оваа варијанта изнесуваат:

$$f_1 = K_a + K_p + \Delta_1 = 2,75 \cdot 10^6 + 3,847 \cdot 10^6 = 6,597 \cdot 10^6 \text{ ден./год.}$$

Пресметковните годишни трошоци за оваа варијанта ќе бидат:

$$T_1 = p_n \cdot K_1 + f_1 = 0,1 \cdot 50 \cdot 10^6 + 6,597 \cdot 10^6 = 11,597 \cdot 10^6 \text{ ден./год.}$$

2) Варијантата со спроводници Al/Č 150/25 mm² ($r_2 = 0,21 \Omega/\text{km}$; $x_2 = 0,40 \Omega/\text{km}$; $k_2 = 0,8 \cdot 10^6$ ден./km).

Инвестиционите трошоци K_2 во оваа варијанта ќе бидат: $K_2 = k_2 \cdot l = 40 \cdot 10^6$ ден.

Годишните трошоци за амортизација и одржување на далекуводот ќе бидат:

$$K_a + K_p = (\alpha_a + \alpha_p) \cdot K_2 = (0,03 + 0,025) \cdot 40 \cdot 10^6 = 2,20 \cdot 10^6 \text{ ден./годишно.}$$

Загубите на активната моќност во режимот на максимално оптоварување ќе изнесуваат:

$$\Delta P_{M2} = 3 \cdot R_2 \cdot I_M^2 \approx R_2 \cdot \frac{P_M^2}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi} = (0,21 \cdot 50) \cdot \frac{40^2}{110^2 \cdot 0,8^2} = 2,17 \text{ MW.}$$

Годишните загуби на активната енергија ќе бидат:

$$\Delta W_2 = \Delta P_{M2} \cdot \tau = 2,17 \cdot 2886 = 6263 \text{ MWh/год. } (\Delta W_2 = 6,263 \cdot 10^6 \text{ kWh/год.}),$$

а соодветните трошоци Δ_2 за изгубената електрична енергија во преносот ќе изнесуваат:

$$\Delta_2 = c_{\Delta W} \cdot \Delta W_2 = 1 \cdot 6,263 \cdot 10^6 = 6,263 \cdot 10^6 \text{ ден./год.}$$

Според тоа, вкупните тековни годишни трошоци на оваа варијанта изнесуваат:

$$f_2 = K_a + K_p + \Delta_2 = 2,20 \cdot 10 + 6,263 \cdot 10^6 = 8,463 \cdot 10^6 \text{ ден./год.}$$

Пресметковните годишни трошоци за оваа варијанта ќе бидат:

$$T_2 = p_n \cdot K_2 + f_2 = 0,1 \cdot 40 \cdot 10^6 + 8,463 \cdot 10^6 = 12,463 \cdot 10^6 \text{ ден./год.}$$

Во следната табела се прикажани техничките и економските показатели за обете разгледувани варијанти.

Табела 7.2.1. Технички и економски показатели на разгледуваните варијанти

Варијанти	Технички показатели		Економски показатели (трошоци во 10^6 денари годишно)					
	ΔU (%)	ΔP (MW)	K	K_a	K_p	Δ	f	T
1) Al/Č 240/40 mm ²	6,97	1,333	50	1,50	1,25	3,847	6,597	11,597
2) Al/Č 150/25 mm ²	8,38	2,170	40	1,20	1,00	6,263	8,463	12,463

Од прикажаната табела заклучуваме дека првата варијанта се карактеризира со поголеми инвестициони вложувања, но затоа таа има значително помали тековни трошоци кои ќе се јавуваат во текот на експлоатацијата на преносниот вод. Поради тоа и пресметковните годишни трошоци T за оваа варијанта се за околу 7% помали во однос на пресметковните годишни трошоци кај втората варијанта, па според тоа првата варијанта ќе биде, од економски аспект, поповолна во однос на втората. Таа исто така е поповолна и од технички аспект бидејќи обезбедува помали загуби на напон и помали загуби на моќност.

□ □ □

Пример 7.3. Трошоците по километар должина V за изградба на преносните водови зависат како од номиналниот напон U_n така и од пресекот A на спроводниците. За надземните водови со спроводници од комбинираното јаже Al/Č со однос на пресеците $\varepsilon = 6:1$ овие трошоци можат приближно да се опишат со следната релација:

$$V = (v_1 + v_2 \cdot U_n + v_3 \cdot A) = (140 + 3,9 \cdot U_n + 1,5 \cdot A) \cdot 10^3 \text{ п.е./km.}$$

Цената на произведениот, па според тоа и цената за изгубениот киловатчас во пренесувањето на електричната енергија $c_{\Delta W}$, од своја страна, зависи од режимот на работата на изворите на електрична енергија, т.е. од нивното време на искористување (т.е. време на максимална моќност) T_M . Споменатата зависност е прикажана табеларно во табелата 7.3.1.

Табела 7.3.1. Табеларен приказ на зависноста на цената на електричната енергија $c_{\Delta W}$ од употребното време T_M

T_M (h)	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500
$c_{\Delta W}$ (п.е./kWh)	1,68	1,38	1,11	0,96	0,84	0,75	0,69	0,60	0,53

Вкупните трошоци, сврзани со изградбата и експлоатацијата на надземните водови, зависат како од вложените инвестиции K така и од тековните трошоци f што се јавуваат во текот на нивната работа, вклучувајќи ја тука и вкупната изгубена електрична енергија ΔW во преносот.

Ако економска *густина на струјања* j_e ја наречеме онаа густина на струјата за која пресметковните годишни трошоци T за пренесување на електричната енергија се најмали, тогаш е потребно нејзината вредност да се определи за разни вредности на времето на искористување на изворите T_M . Зависноста $j_e = f(T_M)$ да се прикаже табеларно.

Решение:

Пресметковните годишни трошоци T се составени од два члена: 1. тековните трошоци f , и 2. членот $p_n \cdot K$ кој ги репрезентира, т.е. уважува инвестиционите вложувања K . Според тоа, ќе имаме:

$$K = V \cdot l = (v_1 + v_2 \cdot U_n + v_3 \cdot A) \cdot l,$$

$$f = K_a + K_p + \Delta = (\alpha_a + \alpha_p) \cdot K + \Delta = p_s \cdot K + \Delta,$$

$$\Delta = c_{\Delta W} \cdot \Delta W = c_{\Delta W} \cdot (\Delta P_M \cdot \tau) = c_{\Delta W} \cdot 3 \cdot R \cdot I^2 \cdot \tau.$$

Бидејќи е:

$$R = r \cdot l = \frac{1000}{\sigma \cdot A} \cdot l, \text{ добиваме:}$$

$$\Delta = \frac{3 \cdot c_{\Delta W} \cdot \tau \cdot 10^3}{\sigma} \cdot \frac{I^2}{A} \cdot l = \xi \cdot \frac{I^2}{A} \cdot l.$$

Според тоа, пресметковните годишни трошоци T сврзани со изградбата и погонот (експлоатацијата) на надземните преносни водови ќе бидат:

$$T = p_s \cdot K + f = (p_n + p_s) \cdot K + \Delta,$$

или:

$$T = (p_n + p_s) \cdot V \cdot l + \xi \cdot \frac{I^2}{A} \cdot l = [(p_n + p_s) \cdot V + \xi \cdot \frac{I^2}{A}] \cdot l,$$

т.е. тие зависат од пресекот A . Понатаму имаме:

$$\frac{dT}{dA} \equiv [(p_n + p_s) \cdot \frac{dV}{dA} - \xi \cdot \frac{I^2}{A^2}] \cdot l = 0.$$

Бидејќи е:

$$\frac{dV}{dA} = v_3 \text{ и } \frac{I}{A} = j_e, \text{ следува:}$$

$$(p_n + p_s) \cdot v_3 - \xi \cdot j_e^2 = 0, \text{ ,}$$

од каде се добива:

$$j_e = \sqrt{\frac{v_3 \cdot (p_n + p_s)}{\xi}} = \sqrt{\frac{v_3 \cdot (p_n + p_s) \cdot \sigma}{3 \cdot 10^3 \cdot c_{\Delta W} \cdot \tau}}.$$

Ако во последниот израз ги замениме бројните вредности на поедините величини, усвојувајќи притоа $p_n = 0,1$ и $p_s = 0,055$ ($p_s\% = 5,5\%$) и изразувајќи ја цената на изгубениот киловатчас $c_{\Delta W}$ во единици (п.е./MWh), економската густина на струјата j_e ќе ја добиеме во (kA/mm²). Притоа времето на загуби τ го пресметуваме (проценуваме) приближно, со помош на следната емпириска релација:

$$\tau = (0,124 + T_M/10.000)^2 \cdot 8760.$$

На тој начин за разни вредности на употребното време T_M ги определуваме соодветните вредности на економската густина на струјата j_e . Пресметаните резултати се прикажани во табелата 7.3.2.

Табела 7.3.2. Табеларен приказ на зависноста на економската густина на струјата j_e од употребното време T_M

T_M (h)	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500
τ (h)	1225	1575	1968	2405	2886	3411	3980	4591	5248
$c_{\Delta W} \cdot \tau$	2058	2173	2184	2308	2424	2558	2746	2754	2781
j_e (A/mm ²)	1,10	1,07	1,065	1,036	1,01	0,97	0,95	0,94	0,935

Како што може да се забележи, во изразот за економската густина на струјата не фигурира ниту номиналниот напон на далекуводот ниту пак неговата должина. Тоа значи дека економската густина на струјата кај надземните водови не зависи ниту од напонот на водот ниту од неговата должина, туку е иста за сите надземни водови кои се изведени со спроводници од ист материјал. Истиот заклучок наполно важи и за енергетските кабли.

□ □ □

Пример 7.4. 10 kV далекувод со должина $l = 3,2 \text{ km}$ и со спроводници $\text{Al}/\text{Č} 50/8 \text{ mm}^2$ ($r = 0,625 \text{ } \Omega/\text{km}$; $x = 0,40 \text{ } \Omega/\text{km}$) напојува потрошувач за кој е познато: $P_M = 1,6 \text{ MW}$; $\cos \varphi = 0,75$; $T_M = 5000 \text{ h}$ ($\tau = 3410 \text{ h}$). За да се поправат напонските прилики и да се намалат загубите на моќност и енергија во преносот, се предвидува инсталирање на кондензаторска батерија (КБ) кај самиот потрошувач. Ваквиот зафат ќе доведе до појава на дополнителни инвестициони вложувања за набавка на кондензаторската батерија, но од друга страна со тоа ќе се намалат загубите на електрична енергија во преносот и, веројатно, со тоа ќе се намалат тековните трошоци во погонот f .

Инвестиционите трошоци K_B за инсталирањето на кондензаторската батерија, коишто линеарно зависат од инсталираната моќност на батеријата Q_B , можат да се опишат со следната релација:

$$K_B = (a + b \cdot Q_B) = (150 + 500 \cdot Q_B) \cdot 10^3 \text{ п.е.}$$

при што моќноста на батеријата Q_B се изразува во мегавари (Mvar).

Да се определи оптималната вредност на инсталираната моќност Q_B на батеријата за која пресметковните годишни трошоци ќе бидат најмали. Потоа, за така определената вредност на моќноста на батеријата, да се определи вкупната количина на активна енергија што ќе се заштедува секоја година за сметка на намалувањето на загубите во преносот поради поправката на факторот на моќност $\cos \varphi$. Колкаво ќе биде намалувањето ΔT на пресметковните годишни трошоци по инсталирањето на кондензаторската батерија?

Цената на електричната енергија загубена во преносот изнесува $c_{\Delta W} = 1,5 \text{ п.е./kWh} = 1000 \text{ п.е./MWh}$. Нормативниот коефициент на ефективност на инвестициите изнесува $p_n = 0,1$, додека годишните стапки на амортизација и одржување на кондензаторската батерија изнесуваат $\alpha_a \% = 7,5\%$ и $\alpha_p \% = 2,5\%$.

Решение:

Ќе ги посматраме двете можни варијанти:

- 1) работа на далекуводот без инсталирање на кондензаторска батерија (т.е. постојна состојба);
- 2) работа на далекуводот со инсталирана кондензаторска батерија кај потрошувачот.

Во првиот случај (1) годишните загуби на електрична енергија во преносот ќе бидат:

$$\Delta W_1 = \frac{P_M^2}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi_1} \cdot R \cdot \tau = \frac{1,6^2}{10^2 \cdot 0,75^2} \cdot 2 \cdot 3410 = 310,4 \frac{\text{MWh}}{\text{год.}},$$

а соодветните трошоци Δ_1 ќе бидат:

$$\Delta_1 = c_{\Delta W} \cdot \Delta W_1 = 1,5 \cdot 310,4 \cdot 10^3 = 465,6 \cdot 10^3 \text{ п.е./годишно.}$$

Во вториот случај (2) годишните загуби на електрична енергија ќе се намалат на вредноста:

$$\Delta W_2 = \frac{P_M^2}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi_2} \cdot R \cdot \tau,$$

којашто засега не ни е позната. Меѓутоа, инсталирањето на кондензаторската батерија ќе доведе, наедно, и до зголемување на тековните трошоци f за вредноста:

$$p_n \cdot K_B + (\alpha_a + \alpha_p) \cdot K_B = p_{\Sigma} \cdot K_B,$$

што се однесува на инвестицијата K_B (соодветно превреднувана во тековен трошок) и на идните трошоци за амортизација и одржување на кондензаторската батерија.

Ако со T_1 и T_2 ги означиме пресметковните годишни трошоци на првата односно втората варијанта, тогаш нивната разлика ΔT , т.е. годишните заштеди поради инсталирањето на кондензаторската батерија, ќе бидат:

$$\Delta T = T_1 - T_2 = (\Delta_1 - \Delta_2) - p_{\Sigma} \cdot K_B,$$

$$\Delta_1 - \Delta_2 = \frac{c_{\Delta W} \cdot P_M^2 \cdot R \cdot \tau}{U_n^2} \cdot \left(\frac{1}{\cos^2 \varphi_1} - \frac{1}{\cos^2 \varphi_2} \right);$$

$$\Delta_1 - \Delta_2 = \frac{c_{\Delta W} \cdot P_M^2 \cdot R \cdot \tau}{U_n^2} \cdot (\operatorname{tg}^2 \varphi_1 - \operatorname{tg}^2 \varphi_2).$$

Имајќи ги предвид изразите:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{Q_M}{P_M}; \quad \operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{Q_M - Q_B}{P_M}, \text{ добиваме:}$$

$$\Delta_1 - \Delta_2 = \frac{c_{\Delta W} \cdot P_M^2 \cdot R \cdot \tau}{U_n^2} \cdot \left[\frac{Q_M^2}{P_M^2} - \frac{(Q_M - Q_B)^2}{P_M^2} \right]$$

$$\Delta_1 - \Delta_2 = \frac{c_{\Delta W} \cdot R \cdot \tau}{U_n^2} \cdot (Q_B \cdot (2Q_M - Q_B)).$$

Значи, годишните заштеди во енергија, како и паричните заштеди врз таа основа се директно зависни од инсталираната моќност на кондензаторската батерија Q_B . Понатаму, разликата ΔT во пресметковните годишни трошоци ќе биде:

$$\Delta T = \Delta_1 - \Delta_2 - p_{\Sigma} \cdot K_B = \Delta_1 - \Delta_2 - p_{\Sigma} \cdot (a + b \cdot Q_B),$$

или:

$$\Delta T = \frac{c_{\Delta W} \cdot R \cdot \tau}{U_n^2} \cdot (Q_B \cdot (2Q_M - Q_B) - p_{\Sigma} \cdot (a + b \cdot Q_B)).$$

Значи, и вкупните годишни заштеди можат да се изразат како функција од моќноста на батеријата Q_B . Понатаму, оптималната вредност на моќноста Q_B за која се постигнуваат најголеми заштеди ќе ја добијеме од условот:

$$\frac{d}{dQ_B}(\Delta T) = \frac{2c_{\Delta W} \cdot R \cdot \tau}{U_n^2} \cdot (Q_M - Q_B) - p_{\Sigma} \cdot b \equiv 0,$$

од каде што понатаму следува:

$$Q_B = Q_M - \frac{b \cdot p_{\Sigma} \cdot U_n^2}{2 \cdot c_{\Delta W} \cdot R \cdot \tau}.$$

Последниот израз ја дава оптималната вредност на инсталираната моќност на кондензаторската батерија. Имајќи предвид дека реактивната моќност Q_M на потрошувачот во режимот на максимално оптоварување изнесува $Q_M = P_M \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 = 1,6 \cdot 0,882 = 1,411 \text{ Mvar}$, за оптималната вредност на моќноста на батеријата ќе добијеме:

$$Q_B = 1,411 - \frac{500 \cdot 10^3 \cdot (0,1 + 0,075 + 0,025) \cdot 10^2}{2 \cdot 1,5 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 3410} = 0,922 \text{ Mvar}.$$

Значи, после компензацијата ќе имаме нов фактор на моќност $\cos \varphi_2$:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = (Q_M - Q_B) / P_M = 0,306 \quad \operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{Q_M - Q_B}{P_M} = \frac{0,489}{1,6} = 0,306; \quad \cos \varphi_2 = 0,956.$$

а годишните загуби на активната енергија ќе се намалат и сега тие ќе изнесуваат:

$$\Delta W_2 = \frac{P_M^2}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi_2} \cdot R \cdot \tau = \frac{1,6^2}{10^2 \cdot 0,909^2} \cdot 2 \cdot 3410 = 190,9 \frac{\text{MWh}}{\text{год.}},$$

односно ќе имаме годишни заштеди во активна енергија во износ:

$$\Delta W_1 - \Delta W_2 = 310,4 - 190,9 = 119,5 \text{ MWh/год.},$$

што изнесува околу 2,2% од вкупната пренесена електрична енергија во текот на една година.

Вредноста на овој износ, изразен во парични единици (п.е.), годишно ќе биде:

$$\Delta_1 - \Delta_2 = c_{\Delta W} \cdot (\Delta W_1 - \Delta W_2) = 1,5 \cdot 119,500 = 179.250 \text{ п.е./год.}$$

Цената на кондензаторската батерија со оптимална инсталирана моќност ќе биде:

$$K_B = (150 + 500 \cdot 0,922) \cdot 10^3 = 611.000 \text{ п.е.}$$

Според тоа, инсталирањето на кондензаторската батерија со својата оптимална вредност, освен веќе споменатите ефекти, ќе доведе до намалување на пресметковните годишни трошоци за вредноста:

$$\Delta T = (\Delta_1 - \Delta_2) - p_{\Sigma} \cdot K_B = 179.250 - 0,2 \cdot 611.000 = 57.050 \text{ п.е./год.}$$

Бидејќи заштедите од компензацијата ΔT се позитивни, произлегува дека инсталирањето на кондензаторската батерија со спомената моќност од 922 kva е не само технички туку и економски сосема оправдана.

□ □ □

Пример 7.5. 110 kV далекувод со спроводници Al/Č 240/40 mm² ($r = 0,129 \Omega/\text{km}$; $x = 0,40 \Omega/\text{km}$) и со должина $l=50 \text{ km}$ треба да напојува еден индустриски потрошувач со следните карактеристики: $P_M = 40 \text{ MW}$; $\cos \varphi = 0,8 = \text{const}$; $T_M = 4500 \text{ h}$ ($\tau = 2886 \text{ h}$). Ако стапките на амортизација и одржување изнесуваат $\alpha_a \% = 3\%$ и $\alpha_p \% = 2,5\%$, а единечната цена на далекуводот е $V = 1 \cdot 10^6 \text{ п.е./km}$ и притоа цената на изгубениот киловатчас изнесува $c_{\Delta W} = 1 \text{ п.е./kWh} = 10^3 \text{ п.е./kWh}$, да се определи сумата на актуализираните трошоци, сврзани со изградбата и експлоатацијата на далекуводот, за период од $n = 20$ години, и тоа за следните два случаја:

- а) моќноста на потрошувачот со текот на времето не се менува;
 - б) моќноста на потрошувачот P_M расте од година во година со тренд на пораст од 4,5% годишно (односно расте со фактор на пораст $x = 1,045$).
- Актуализацијата на трошоците да се врши со стапка $p_a \% = 8\%$.

Решение:

Кај ваквите анализи е вообичаено за основна временска единица да се усвои периодот од една година, т.е. единица за време да биде 1 година. Притоа, со $t = 0$ ќе го означиме моментот кога е завршена изградбата на објектот и почетокот на неговата работа, а тоа ќе биде наедно и почетокот на посматраниот период од $n = 20$ години. Со индексот i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) ќе го означуваме крајот на првата, втората итн. година. Освен тоа, заради упростување, ќе сметаме дека тековните трошоци f_i , кои фактички се остваруваат распределено, во текот на целата i -та година, се остваруваат концентрирано на крајот од посматраната година.

- а) Моќноста на потрошувачот не се менува ($P_M = P_0 = 40 \text{ MW} = \text{const.}$)

Во овој случај, согласно напред реченото, во $t = 0$ ќе се појават инвестиционите трошоци $K = V \cdot l$ за изградба на далекуводот, а потоа, во секоја наредна година од работата, ќе се остваруваат исти тековни трошоци, т.е. $f_1 = f_2 = \dots = f_n = f = \text{const.}$ Притоа имаме:

$$K = V \cdot l = 1 \cdot 10^6 \cdot 50 = 50 \cdot 10^6 \text{ п.е.}$$

$$k = p_s \cdot K = (\alpha_a + \alpha_p) \cdot K = 0,055 \cdot 50 \cdot 10^6 = 2,75 \cdot 10^6 \text{ п.е./год.}$$

$$f = K_a + K_p + \Delta = p_s \cdot K + \Delta = \text{const.}$$

$$\Delta P_M = R \cdot (P_M / U_n / \cos \varphi)^2 = 6,45 \cdot (40 / 110 / 0,8)^2 = 1,333 \text{ MW.}$$

$$\Delta = c_{\Delta W} \cdot \Delta W = c_{\Delta W} \cdot (\Delta P_M \cdot \tau);$$

$$\Delta = 1 \cdot 10^3 \cdot 1,333 \cdot 2886 = 3,846 \cdot 10^6 \text{ п.е./год.}$$

$$f = 2,75 \cdot 10^6 + 3,846 \cdot 10^6 = 6,596 \cdot 10^6 \text{ п.е./год.} = \text{const.}$$

Сумата на актуализираните трошоци Σ_a за посматраниот период од $n = 20$ години во овој случај ќе биде:

$$\Sigma_a = \frac{K}{q^0} + \frac{f_1}{q^1} + \frac{f_2}{q^2} + \dots + \frac{f_n}{q^n} = K + \sum_{i=1}^n \frac{f_i}{q^i}, \text{ т.е.}$$

$$\Sigma_a = K + f \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{q^i} = K + f \cdot \Gamma(n),$$

каде што е:

$$\Gamma(n) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{q^i} = \frac{q^n - 1}{q^n \cdot (q - 1)}.$$

Понатаму имаме:

$$\Gamma(20) = \frac{1,08^{20} - 1}{1,08^{20} \cdot (1,08 - 1)} = 9,818;$$

$$\Sigma_a = 50 \cdot 10^6 + 9,818 \cdot 6,596 \cdot 10^6 = 114,76 \cdot 10^6 \text{ п.е./год.}$$

б) Моќноста на потрошувачот расте со трендна пораст од 4,5% годишно

Во овој случај максималната моќност на потрошувачот P_M не е константна, туку од година во година ќе расте континуирано, по следниот закон:

$$P_M(t) = P_0 \cdot x^t \quad (t = 1, 2, \dots, n),$$

т.е:

$$P_M(t) = 40 \cdot 1,045^t \quad (t = 1, 2, \dots, n).$$

За поедноставно пресметување ќе сметаме дека во текот на првата година максималната моќност на потрошувачот не се зголемува континуирано, туку е константна, еднаква на вредноста $P_M(1) = P_M(0) \cdot x^1 = P_0 \cdot x^1$. Слично, во текот на втората година ќе сметаме дека моќноста на потрошувачот е константна, еднаква на вредноста $P_M(2) = P_0 \cdot x^2$, итн., како што е тоа прикажано со искршената линија на дијаграмот од слика 7.4.

Јасно е дека во овој случај загубите на електрична енергија ΔW од година во година ќе растат и тоа по следниот закон:

$$\Delta W_0 = \frac{P_0^2}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi} \cdot R \cdot \tau;$$

$$\Delta W_1 = \frac{P_M^2(1)}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi} \cdot R \cdot \tau = \Delta W_0 \cdot x^2;$$

$$\Delta W_2 = \frac{P_M^2(2)}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi} \cdot R \cdot \tau = \Delta W_0 \cdot x^4;$$

$$\Delta W_i = \frac{P_M^2(i)}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi} \cdot R \cdot \tau = \Delta W_0 \cdot x^{2i}; \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Во овој случај сумата на актуализираните трошоци за периодот од n години ќе биде:

$$\Delta_i = c_{\Delta W} \cdot \Delta W_i = c_{\Delta W} \cdot \Delta W_0 \cdot x^{2i} = \Delta_0 \cdot x^{2i}; \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

$$\Sigma_b = K + \sum_{i=1}^n \frac{p_s \cdot K}{q^i} + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta_0 \cdot x^{2i}}{q^i};$$

или:

$$\Sigma_b = K + p_s \cdot K \cdot \Gamma(n) + \Delta_0 \cdot \Gamma(x, n),$$

каде што е:

$$\Gamma(x, n) = \sum_{i=1}^n \frac{x^{2i}}{q^i} = \frac{(q/x^2)^n - 1}{(q/x^2)^n \cdot [(q/x^2) - 1]} = \frac{0,989^{20} - 1}{0,989^{20} \cdot (0,989 - 1)} = 22,51.$$

Понатаму имаме:

$$\Delta_0 = c_{\Delta W} \cdot \Delta W_0 = c_{\Delta W} \cdot \Delta P_0 \cdot \tau$$

$$\Delta_0 = c_{\Delta W} \cdot \frac{P_0^2}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi} \cdot R \cdot \tau = 3,846 \cdot 10^6 \text{ п.е./год},$$

$$\Sigma_b = 50 \cdot 10^6 + 0,055 \cdot 50 \cdot 10^6 + 3,846 \cdot 10^6 \cdot 22,51 = (50 + 27 + 86,573) \cdot 10^6$$

$$\Sigma_b = 163,573 \cdot 10^6 \text{ п.е.}$$

□ □ □

Пример 7.6. Потрошувач со карактеристики како во претходната задача треба да се напојува преку еден 110 kV далекувод со должина $l = 50 \text{ km}$. Притоа се можни следните три варијанти на напојувањето:

- напојување со обичен едносистемски 110 kV далекувод, со спроводници Al/Č 240/40 mm² ($r_a = 0,129 \text{ } \Omega/\text{km}$; $x_a = 0,39 \text{ } \Omega/\text{km}$) чија единечна цена изнесува $V_a = 1 \cdot 10^6 \text{ п.е.}$;
- напојување со еден двосистемски 110 kV далекувод, со спроводници Al/Č 150/25 mm² ($r_b = 0,105 \text{ } \Omega/\text{km}$; $x_b = 0,30 \text{ } \Omega/\text{km}$) чија единечна цена изнесува $V_b = 1,28 \cdot 10^6 \text{ п.е.}$;
- напојување со еден двосистемски 110 kV далекувод, со спроводници Al/Č 240/40 mm² ($r_b = 0,0065 \text{ } \Omega/\text{km}$; $x_b = 0,30 \text{ } \Omega/\text{km}$) чија единечна цена изнесува $V_b = 1,6 \cdot 10^6 \text{ п.е.}$

Со помош на методот на минимални вкупни актуализирани трошоци да се утврди која од трите споменати варијанти е економски најповолна.

Трошоците да се посматраат за период од $n = 20$ години, а актуализацијата да се врши со стапка на актуализација $p_a \% = 8\%$.

Годишните стапки на амортизација $\alpha_a \%$ и одржување $\alpha_p \%$ на далекуводот изнесуваат 3,0% и 2,5% респективно. Значи, вкупната годишна стапка $p_s \% = \alpha_a \% + \alpha_p \% = 5,5\%$.

Просечната цена на загубениот киловатчас изнесува: $c_{\Delta W} = 1 \text{ п.е./kWh}$.

Решение:

Сумата од вкупните актуализирани трошоци што се остваруваат при изградбата и експлоатацијата на еден далекувод за период од n години изнесува (види пример 7.5):

$$\Sigma = K + p_s \cdot K \cdot \Gamma(n) + \Delta_0 \cdot \Gamma(x, n) \text{ , или:}$$

$$\Sigma = K \cdot [1 + p_s \cdot \Gamma(n)] + c_{\Delta W} \cdot \Delta W_0 \cdot \Gamma(x, n) .$$

При $n = 20$ години и тренд на пораст $x = 1,045$, со зададената стапка на актуализација $p_a \% = 8\%$, добиваме (види пример 7.5):

$$\Gamma(n) = 9,818 ; \quad \Gamma(x, n) = 22,512 ; \quad 1 + p_s \cdot \Gamma(n) = 1 + 0,055 \cdot 9,818 = 1,54 .$$

а) Напојување преку едносистемски далекувод со спроводници Al/Č 240/40 mm².

Во овој случај ќе имаме:

$$V_a = 1 \cdot 10^6 \text{ п.е./km}; \quad K_a = V_a \cdot l = 50 \cdot 10^6 \text{ п.е.}; \quad R_a = r_a \cdot l = 0,129 \cdot 50 = 6,45 \text{ } \Omega.$$

$$\Delta W_0 = \frac{P_0^2}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi} \cdot R_a \cdot \tau ; \quad \Delta W_0 = \frac{40^2}{110^2 \cdot 0,8^2} \cdot 6,45 \cdot 2886 = 3,846 \cdot 10^6 \text{ kWh} ,$$

$$\Sigma_a = 1,54 \cdot 50 \cdot 10^6 + 1 \cdot 3,846 \cdot 10^6 \cdot 22,512 = (77 + 86,58) \cdot 10^6$$

$$\Sigma_a = 163,58 \cdot 10^6 \text{ п.е.}$$

б) Напојување преку двосистемски вод со сироводници $Al/\check{C}$ 150/25 mm².

На наполно ист начин се пресметува сумата на актуализираните трошоци и за оваа варијанта, а подоцна и за варијантата "в". Резултатите од овие пресметки се прикажани во табелата 7.6.1. Трошоците во табелата се изразени во милиони парични единици, т.е. 10⁶ п.е.

Од пресметаното произлегува дека првата варијанта ветува најмали вкупни актуализирани трошоци, па според тоа таа би требало да се усвои како економски најповолна. Меѓутоа, од резултатите произлегува дека третата варијанта е поскапа во однос на првата за само 1,78%.

Табела 7.6.1. Економски карактеристики на споредуваните варијанти

Варијанта	K	$p_{\Sigma} \cdot K \cdot \Gamma(n)$	ΔW_0 (MWh)	$\Delta_0 \cdot \Gamma(x,n)$	Σ
а	50	27,00	384,6	86,58	163,58
б	60	34,56	313,0	70,46	169,00
в	80	43,20	192,3	43,29	166,49

Толку мала разлика не може да ѝ обезбеди несомнена предност на првата варијанта, со оглед на тоа што ваквите анализи претставуваат само приближни, т.е. груби проценки на економските показатели на разгледуваните варијанти. Освен тоа, третата варијанта има изразито поповолни технички карактеристики како во поглед на преносната способност и доверливоста во напојувањето така и во поглед на загубите на напон и моќност во преносот, што се одразува врз квалитетот на испорачаната електрична енергија и што е особено изразено во подоцнежната фаза на работењето кога оптоварувањето ќе ја достигне својата конечна вредност од $1,045^{20} \cdot 40 = 96,5$ MW (што при $\cos \varphi = 0,8$ дава 121 MVA, а тоа е веќе на самата термичка граница на преносната моќ на водот).

Затоа, во ваквите случаи, кога економските споредувања на варијантите не даваат неспорно предимство на некоја од нив, последниот збор ќе го даде споредувањето на техничките карактеристики на секоја од варијантите (и кои во применетиот модел не се економски вреднувани). Во конкретниов случај е јасно дека, гледано од технички аспект, третата варијанта има изразито предимство во однос на првата, па според тоа најправилно би било неа да ја прогласиме за најповолна.

□ □ □

Пример 7.7[▼]. Претходната задача да се реши со нова стапка на актуализација $p_a \% = 10\%$.

Решение:

$$\Gamma(n) = 8,514 \text{ и } \Gamma(x,n) = 18,545;$$

$$\Sigma_a = 144,72 \cdot 10^6 \text{ п.е.}; \quad \Sigma_b = 151,99 \cdot 10^6 \text{ п.е.}; \quad \Sigma_v = 153,10 \cdot 10^6 \text{ п.е.}$$

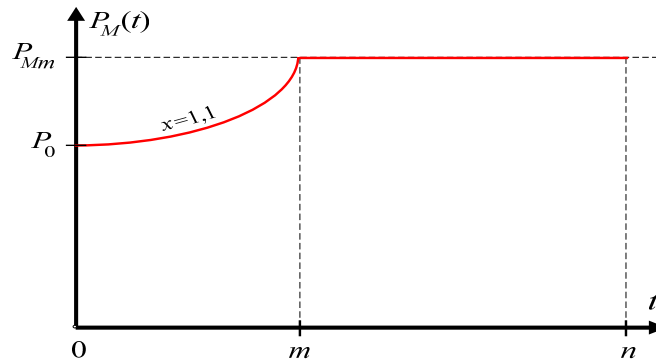
□ □ □

Пример 7.8. Потрошувач со карактеристики $P_0 = 30$ MW, $\cos \varphi = 0,8$; $T_M = 4500$ h; ($\tau = 2886$ h) треба да се напојува со електрична енергија преку еден 110 kV далекувод, долг $l = 40$ km. Во првите $m = 5$ години од работењето моќноста на потрошувачот ќе расте по експоненцијален закон со просечен тренд на пораст од 10% годишно ($x = 1,1$). После петтата година максималната моќност на потрошувачот се задржува на вредноста $P_{Mm} = P_0 \cdot x^m = 48,32$ MW и понатаму нема да се менува, како што е тоа прикажано на сликата 7.8.1.

При изборот на пресекот на спроводниците се разгледуваат две варијанти:

а) $Al/\check{C}$ 150/25 mm²; $r = 0,20$ Ω /km; $x = 0,41$ Ω /km; $V_a = 1,2 \cdot 10^6$ п.е.;

б) $Al/\check{C}$ 240/40 mm²; ($r = 0,123$ Ω /km; $x = 0,40$ Ω /km; $V_b = 1,5 \cdot 10^6$ п.е.



Слика 7.8.1. Пораст на врвното оптоварување на потрошувачот

Со помош на методот на вкупни актуализирани трошоци да се утврди која од двете разгледувани варијанти е економски поповолна. Притоа да се посматра период на работа од $n = 20$ години.

Бројни вредносѝ:

- стапка на актуализација $p_a \% = 10\%$,
- стапка на амортизација+одржување $p_s \% = \alpha_a \% + \alpha_p \% = 5\%$,
- цена на изгубената електрична енергија $c_{\Delta W} = 1,5$ п.е./kWh.

Решение:

Во овој случај и во двете варијанти ќе имаме:

$$\Gamma(m) = \Gamma(5) = 3,791; \quad \Gamma(n) = \Gamma(20) = 8,514; \quad \Gamma(n-m) = \Gamma(15) = 7,606; \quad \Gamma(x, m) = 6,716;$$

$$\Gamma(x, n) = 63,003; \quad x^m = 1,1,611.$$

Посматраниот период од $n = 20$ години ќе го поделиме на два дела: $(0-m)$ и $(m-n)$. Значи, првиот дел ги опфаќа првите $m = 5$ години, а вториот преостанатите $m+1, m+2, \dots$ итн., години.

Во првиот временски интервал $(0-m)$, кога врвната моќност на потрошувачот расте од година во година со константен тренд на пораст x , тековните трошоци ќе се состојат од константен дел $k = p_s \cdot K$ и променлив (варијабилан) дел $\Delta_i = \Delta_0 \cdot x^{2i}$ (видете го примерот 7.5).

Според тоа, вкупните тековни трошоци f_i во i -тата година ($i \leq m$) ќе бидат:

$$f_i = k + \Delta_i = k + \Delta_0 \cdot x^{2i}.$$

Во последните изрази со K е означена цената на чинење на далекуводот, а со Δ_0 се означени трошоците заради загубената електрична енергија во "нултата" година, во која оптоварувањето е еднакво на P_0 , т.е:

$$\Delta_0 = c_{\Delta W} \cdot \Delta W_0 = c_{\Delta W} \cdot \frac{P_0^2}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi} \cdot R \cdot \tau.$$

Во вториот временски интервал ($i > m$) тековните трошоци се константни, т.е:

$$f_i = f_m = k + \Delta_m = k + \Delta_0 \cdot x^{2m} = \text{const.} \quad (i = m+1, m+2, \dots, n).$$

Согласно со напред реченото, сумата на вкупните актуализирани трошоци што ќе се остварат во текот на целиот разгледуван период од n години ќе биде:

$$\Sigma = K + \sum_{i=1}^m \frac{f_i}{q^i} + \sum_{i=m+1}^n \frac{f_m}{q^i} = K + \sum_{i=1}^m \frac{k + \Delta_0 \cdot x^{2i}}{q^i} + \sum_{i=m+1}^n \frac{f_m}{q^i},$$

$$\Sigma = K + k \cdot \Gamma(m) + \Delta_0 \cdot \Gamma(x, m) + f_m \cdot [\Gamma(n) - \Gamma(m)] ; \quad \text{или:}$$

$$\Sigma = K + k \cdot \Gamma(n) + \Delta_0 \cdot \{ \Gamma(x, m) + x^{2m} \cdot [\Gamma(n) - \Gamma(m)] \} \quad \text{или} \quad \Sigma = c \cdot K + d \cdot \Delta_0;$$

каде што е:

$$c = 1 + p_s \cdot \Gamma(n) = 1 + 0,05 \cdot 8,514 = 1,426 ;$$

$$d = \Gamma(x, m) + x^{2m} \cdot [\Gamma(n) - \Gamma(m)]; \quad d = 6,716 + 2,594 \cdot [8,514 - 3,791] = 18,965 .$$

Сега лесно можеме да ги добиеме вкупните трошоци за секоја од двете разгледувани варијанти.

а) Варијанта со сироводници Al/Č 150/25 mm² ;

$$K_a = 48 \cdot 10^6 \text{ п.е.}; \quad R_a = 0,240 = 8 \Omega;$$

$$\Delta P_0 = R_a \cdot (P_0 / U_n / \cos \varphi)^2 = 8 \cdot (30 / 110 / 0,8)^2 = 0,93 \text{ MW};$$

$$\Delta W_0 = \Delta P_0 \cdot \tau = 0,93 \cdot 2886 = 2683 \text{ MWh};$$

$$\Delta_0 = c_{\Delta W} \cdot \Delta W_0 = 1,5 \cdot 2,683 \cdot 10^6 = 4,025 \cdot 10^6 \text{ п.е.};$$

$$\Sigma_a = c \cdot K_a + d \cdot \Delta_0; \quad \Sigma_a = 1,426 \cdot 48 \cdot 10^6 + 18,965 \cdot 4,025 \cdot 10^6 = 144,8 \cdot 10^6 \text{ п.е.}$$

б) Варијанта со сироводници Al/Č 240/40 mm² ;

$$K_b = 60 \cdot 10^6 \text{ п.е.};$$

$$R_b = 0,12340 = 4,92 \Omega.$$

$$\Delta P_0 = R_b \cdot (P_0 / U_n / \cos \varphi)^2 = 4,92 \cdot (30 / 110 / 0,8)^2 = 0,572 \text{ MW};$$

$$\Delta W_0 = \Delta P_0 \cdot \tau = 0,572 \cdot 2886 = 1651 \text{ MWh};$$

$$\Delta_0 = c_{\Delta W} \cdot \Delta W_0 = 1,5 \cdot 1,651 \cdot 10^6 = 2,476 \cdot 10^6 \text{ п.е.};$$

$$\Sigma_b = c \cdot K_b + d \cdot \Delta_0 = 1,426 \cdot 60 \cdot 10^6 + 18,965 \cdot 2,476 \cdot 10^6; \quad \Sigma_b = 132,5 \cdot 10^6 \text{ п.е.}$$

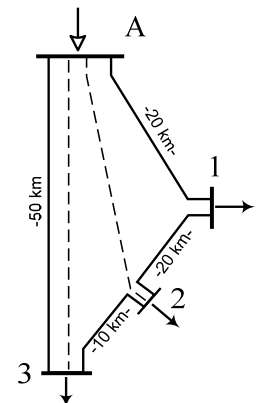
□ □ □

Пример 7.9^{*}. На сликата е прикажана 110 kV надземна мрежа, изведена со спроводници од типот Al/Č 240/40 m². Сите водови имаат исти подолжни параметри $\underline{z} = (r + jx) = (0,13 + j0,40) \Omega/\text{km}$. Должините на водовите се прикажани на самата слика, додека потрошувачите ги имаат следните моќности: $\underline{S}_1 = (40 + j20) \text{ MVA}$; $\underline{S}_2 = (30 + j15) \text{ MVA}$; $\underline{S}_3 = (70 + j35) \text{ MVA}$. Сите потрошувачи се од ист тип и имаат ист дневен, односно годишен, дијаграм на моќност, со употребно време $T_M = 4500 \text{ h/год.}$ и време на загуби $\tau = 2886 \text{ h/год.}$

Заради намалување на загубите на моќност и енергија во мрежата се предвидува изградба на уште еден вод со исти карактеристики како и останатите. Се разгледуваат две варијанти:

- 1) изградба на вод помеѓу собирниците А и 3, паралелно со постојниот вод А-3, со должина $l_1 = 50 \text{ km}$;
- 2) изградба на вод што ќе ги сврзува директно собирниците А и 2 со должина $l_2 = 45 \text{ km}$.

Со помош на методот на пресметковни годишни трошоци да се утврди која од двете разгледувани варијанти е економски поповолна. Цената на 1 km 110 kV надземен вод изнесува $k = 150.000 \text{ п.е./km}$.



Останати економски показатели: цена на изгубената електрична енергија $c_{\Delta W} = 0,1 \text{ п.е./kWh}$; годишни стапки на амортизација и одржување на надземните водови $\alpha_a = 3\%$ $\alpha_p = 1\%$; коефициент на ефективност на инвестициите $p_n = 0,1 (10\%)$.

Напомена: Прикажаната мрежа е хомогена и може да се решава со помош на методот на раздвојување. Фактот што сите потрошувачи имаат ист фактор на моќност $\cos \varphi$ исто така ја олеснува пресметката на тековите на моќности.

Решение:

каде што со $\Delta W_2(0)$ се означени годишните загуби на електрична енергија во мрежата за втората состојба и за ниво на оптоварување на мрежата од "нулатата година", кога врвното оптоварување е $P_M = P_M(0) = 140 \text{ MW}$. Притоа, според резултатите од задачата 7.9, имаме:

$$\Delta W_2(0) = \Delta W_g = \Delta P_g \cdot \tau = 3,379 \cdot 2,886 = 9.751,542 \text{ MWh/год.} \sim 9,751 \cdot 10^6 \text{ kWh/god.}$$

Ако трошоците за амортизација и одржување на мрежата, како заеднички за обете варијанти, ги испуштиме од анализите, тогаш за првиот период (состојба 1) ќе имаме само трошоци заради изгубена електрична енергија, т.е:

$$f_1(i) = 0 + \Delta_1(i) = c_{\Delta W} \cdot \Delta W_1(i) = c_{\Delta W} \cdot \Delta W_1(0) \cdot x^{2i} \equiv \Delta_1(0) \cdot x^{2i}; \quad i=1, m;$$

$$\Delta_1(0) = 0,1 \cdot 13.671 = 1,3671 \cdot 10^6 \text{ п.е.}$$

Сумата Σ_I на актуализираните трошоци за овој период ќе биде:

$$\Sigma_I = \sum_{i=1}^m \frac{f_1(i)}{q^i} = \sum_{i=1}^m \Delta_1(0) \cdot \frac{x^{2i}}{q^i} = \Delta_1(0) \cdot \Gamma(x, m).$$

По истекот на m -тата година доаѓа до реализација на инвестицијата K и започнува вториот период. Сега, во секоја од наредните години $i = m+1, m+2, \dots, n-1, n$, годишните трошоци $f_2(i)$ ќе се состојат од константен дел k_2 , којшто се однесува на амортизацијата и одржувањето на далноводот и варијабилан дел $\Delta_2(i)$ којшто се должи на трошоците заради изгубената електрична енергија. Притоа важи:

$$f_2(i) = k_2 + \Delta_2(i) = k_2 + \Delta_2(0) \cdot x^{2i}; \quad i = m+1, \dots, n;$$

$$k_2 = (\alpha_p + \alpha_a) \cdot K = \alpha_s \cdot K = 0,05 \cdot 6,75 \cdot 10^6 = 0,3375 \cdot 10^6 \text{ п.е.};$$

$$\Delta_2(0) = c_{\Delta W} \cdot \Delta W_2(0) = 0,1 \cdot 9,751 \cdot 10^6 = 0,9751 \cdot 10^6 \text{ п.е.};$$

Сумата Σ_{II} на актуализираните трошоци за овој период ќе биде:

$$\Sigma_{II} = \sum_{i=m+1}^n \frac{f_2(i)}{q^i} = \sum_{i=m+1}^n \frac{k_2 + \Delta_2(0) \cdot x^{2i}}{q^i} = k_2 \cdot [\Gamma(n) - \Gamma(m)] + \Delta_2(0) \cdot [\Gamma(x, n) - \Gamma(x, m)].$$

И конечно, вкупната сума Σ на актуализираните трошоци за целиот период од $n = 30$ години ќе биде:

$$\Sigma = \Sigma_I + \frac{K}{q^m} + \Sigma_{II} = \Delta_1(0) \cdot \Gamma(x, m) + \frac{K}{q^m} + k_2 \cdot [\Gamma(n) - \Gamma(m)] + \Delta_2(0) \cdot [\Gamma(x, n) - \Gamma(x, m)].$$

Гледаме дека сумата Σ на актуализираните трошоци зависи, меѓу другото, од моментот на инвестирање, т.е. зависи од годината m кога е изграден далноводот. Земајќи предвид дека е:

$$\Gamma(n) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{q^i} = \frac{q^n - 1}{q^n \cdot (q - 1)} = 11.2578; \quad \Gamma(m) = \sum_{i=1}^m \frac{1}{q^i} = \frac{q^m - 1}{q^m \cdot (q - 1)};$$

$$\Gamma(x, n) = \sum_{i=1}^n \frac{x^{2i}}{q^i} = \frac{(q/x^2)^n - 1}{(q/x^2)^n \cdot [(q/x^2) - 1]} = 41.9581; \quad \Gamma(x, m) = \sum_{i=1}^m \frac{1}{q^i} = \frac{(q/x^2)^m - 1}{(q/x^2)^m \cdot [(q/x^2) - 1]};$$

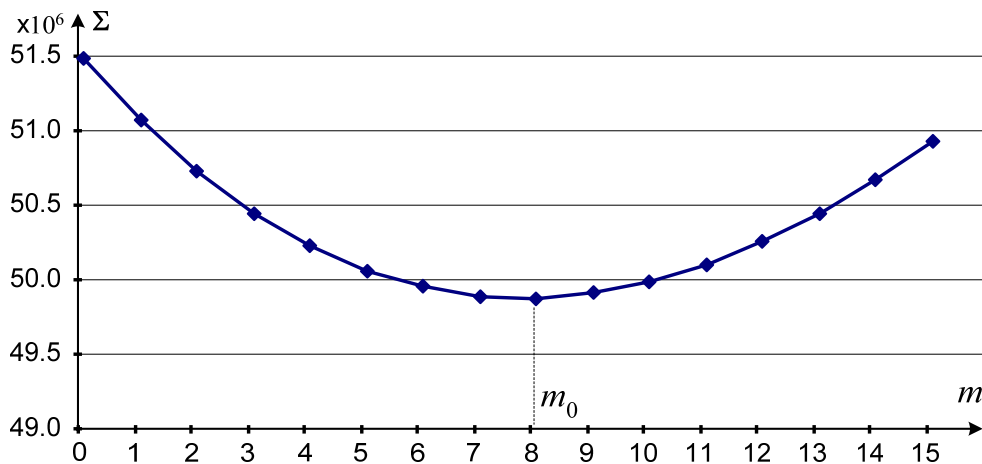
и заменувајќи ги вредностите:

$$\Delta_1(0) = 1,3671 \cdot 10^6 \text{ п.е.}; \quad k_2 = 0,3375 \cdot 10^6 \text{ п.е.} \text{ и } \Delta_2(0) = 0,97511 \cdot 10^6 \text{ п.е.};$$

во изразот за сумата Σ , ќе ја добиеме зависноста $\Sigma(m)$. Таа е прикажана во табелата 7.10.1. Истата зависност е прикажана и графички, на дијаграмот од сликата 7.10.1.

Табела 7.10.1. Вк. актуализирани трошоци Σ во зависност од годината на градба на новиот вод m

m	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Σ	51.480	51.067	50.723	50.443	50.223	50.060	49.950	49.891	49.879	49.911	49.986	50.101



Слика 7.10.1. Зависност на вк. актуализирани трошоци од годината на градба на новиот вод $\Sigma(m)$

Од пресметките произлегува дека, посматрано од економски аспект, најповолно е ако предвидениот далновод помеѓу собирниците А и 2 се изгради после $m_0 = 8$ години сметано од почетокот на посматрањето на процесот. Сепак треба да се истакне дека овој оптимум не е воопшто изразен и дека разликата во вкупните актуализирани трошоци помеѓу оптималното решение и најнеповолниот случај (изградба веднаш на почетокот, во $m = 0$) е само 3,2%.

□ □ □

Пример 7.11'. Индустриски потрошувач треба да се напојува со електрична енергија преку 10 kV кабелска мрежа. ($U_n = 10$ kV). Врвната моќност на потрошувачот од година во година расте со константен тренд на пораст од 7 % годишно, по законот: $P_M(t) = P_M(0) \cdot x^t = 2 \cdot 1,07^t$ (MW). Времето на максимална моќност на потрошувачот изнесува $T_M = 5000$ h/год. и тоа не се менува, додека факторот на моќност на потрошувачот изнесува $\cos \varphi = 0,8 = \text{const.}$ Напојувањето ќе се изведува со кабли од типот IPO 13 A, 3x150, 10 kV со должина $l = 2$ km, за кои е познато: единечна цена $k_1 = 60.000$ п.е./km; $\underline{z} = (r+jx) = (0,2 + j0,08) \Omega/\text{km}$; $I_d = 255$ A; $S_d = 4,17$ MVA). Притоа, за напојувањето на потрошувачот се разгледуваат следните две варијанти:

- 1) поставување на еден кабел на почетокот ($t = 0$), а после $m = 10$ години, поставување на уште еден ист таков кабел, паралелно со првиот;
- 2) поставување на два кабла во ист ров истовремено, веднаш на самиот почеток ($t = 0$) при што цената на таквиот двоен кабелски вод ќе изнесува $k_2 = 95.000$ п.е./km*.

Со помош на методот на вкупни актуализирани трошоци да се утврди која од двете разгледувани варијанти е економски поповолна.

Бројни вредносѝи: стапки на амортизација и одржување на каблите $\alpha_s = \alpha_a + \alpha_p = 3 + 2 = 5\%$; стапка на актуализација $p_a = 8\%$; цена на изгубената електрична енергија $c_{\Delta W} = 0,1$ п.е./kWh.

*) Треба да се напомене дека цената на еден кабелски вод се состои од два дела: константен дел, којшто не зависи од пресекот на кабелот (во него спаѓаат трошоците за полагање на кабелот со сите придружни градежни и организациони зафати) и дел којшто зависи од типот и пресекот на кабелот, а тоа се всушност трошоците за набавката и транспортот на самиот кабел.

Решение:

Ќе ги воведеме следните означувања:

$$K_1 = k_1 \cdot l = 60.000 \cdot 2 = 120.000 \text{ п.е.}; R_1 = r_1 \cdot l = 0,2 \cdot 2 = 0,4 \Omega; \Delta P_1(0) = R_1 \cdot \frac{P_M^2(0)}{U_n^2 \cdot \cos^2 \varphi} = 0,025 \text{ MW};$$

$$\Delta W_1(0) = \Delta P_1(0) \cdot \tau = 85,273 \text{ MWh}; \Delta_1(0) = c_{\Delta W} \cdot \Delta W_1(0) = 8527,3 \text{ п.е.}; \Delta_2(0) = \Delta_1(0) / 2 = 4263,75 \text{ п.е.}$$

$$q = 1 + p_a = 1,08; \Gamma(m) = 6,71008; \Gamma(n) = 9,81815; \Gamma(x, m) = 13,979; \Gamma(x, n) = 39,035.$$

Со $t = 0$ ќе го означиме почетокот на посматрање на работата на потрошувачот. Редоследот на остварување на трошоците сврзани со првата варијанта се следните:

реден број	момент или период	Т р о ш о к	О п и с
1	$t = 0$	K_1	Изградба на првиот кабел (инвестиција)
2	$0 < t \leq m$	$\alpha_s \cdot K_1 \cdot \Gamma(m) + \Delta_1(0) \cdot \Gamma(x, m)$	Погонски трошоци (амортизација и одржување на кабелот) и трошоци за изгубена ел. енергија во кабелот.
3	$t = m$	K_1/q^m	Изградба (поставување) на вториот кабел (инвестиција)
4	$m < t \leq n$	$2\alpha_s \cdot K_1 \cdot [\Gamma(n) - \Gamma(m)]$	Амортизација и одржување на обата кабла.
5	$m < t \leq n$	$\frac{1}{2} \cdot \Delta_1(0) \cdot [\Gamma(x, n) - \Gamma(x, m)]$	Трошоци за изгубена ел. енергија во обата кабла.

Според тоа, вкупните актуализирани трошоци сврзани со изградбата и работата на преносниот систем според првата варијанта ќе бидат:

$$\Sigma_1 = K_1 \cdot (1 + 1/q^m) + \alpha_s \cdot K_1 \cdot \Gamma(m) + \Delta_1(0) \cdot \Gamma(x, m) + \alpha_s \cdot K_1 \cdot [\Gamma(n) - \Gamma(m)] + 0,5 \cdot \Delta_1(0) \cdot [\Gamma(x, n) - \Gamma(x, m)], \text{ или}$$

$$\Sigma_1 = 120.000 \cdot (1 + 1/1,08^{10}) + 0,05 \cdot 120.000 \cdot 6,71008 + 8527,3 \cdot 13,979 + 2 \cdot 0,05 \cdot 120.000 \cdot (9,81815 - 6,71008) + 0,5 \cdot 8527,3 \cdot (39,035 - 13,979) = 479.174 \text{ п.е.}$$

Размислувајќи на сличен начин, за втората варијанта ќе ги добиеме следните вкупни актуализирани трошоци:

$$\Sigma_2 = K_2 \cdot [1 + \alpha_s \cdot \Gamma(n)] + \Delta_2(0) \cdot \Gamma(x, n)$$

$$\Sigma_2 = 95.000 \cdot (1 + 0,05 \cdot 9,81815) + 4263,65 \cdot 39,035 = 449.705 \text{ п.е.}$$

Бидејќи е $\Sigma_2 < \Sigma_1$ произлегува заклучокот дека втората варијанта е економски поповолна.

□ □ □

Задача 7.1. Еден индустриски погон за преработка на руда се наоѓа на растојание $l = 17 \text{ km}$ од најблиската распределителна точка и треба да се приклучи на електроенергетската мрежа. На почетокот од работата на потрошувачот неговата моќност ќе изнесува $P_0 = 6,5 \text{ MW}$ и во наредните $m = 10$ години перманентно ќе расте со константна стапка на пораст од 7% годишно (трендот на пораст изнесува $x = 1,075$). По овој период моќноста на потрошувачот ја достигнува вредноста $P_{m1} = 12,8 \text{ MW}$ и понатаму останува неизменета, слично на она што е графички прикажано на сликата 7.8.1 од претходниот пример. Останатите карактеристики на потрошувачот се следните: време на максимална моќност $T_M = 5000 \text{ h}$, време на загуби $\tau = 3411 \text{ h}$, фактор на моќност $\cos \varphi = 0,9$.

За напојување на потрошувачот се предвидуваат две можни варијанти:

- 1) напојување со 35 kV преносен систем;
- 2) напојување со 110 kV преносен систем.

Во варијантата 1 се предвидува изградба на двосистемски 35 kV далекувод со спроводници Al/Č 95/15 mm² ($r_1 = 0,166 \text{ } \Omega/\text{km}$; $x_1 = 0,30 \text{ } \Omega/\text{km}$; единечна цена $V_1 = 1,12 \cdot 10^6 \text{ п.е.}$) и изградба на трансформаторска станица ТС 35/6 kV/kV, чија цена изнесува $K_{T35} = 18 \cdot 10^6 \text{ п.е.}$

Во варијантата 2 се предвидува изградба на еден 110 kV едносистемски далекувод со спроводници Al/Č 150/25 mm² ($r_2 = 0,21 \text{ } \Omega/\text{km}$, $x_2 = 0,40 \text{ } \Omega/\text{km}$, $V_2 = 0,8 \cdot 10^6 \text{ п.е.}$) и изградба на трафостаница ТС 35/6 kV/kV. Далекуводот во првите $m = 10$ години е предвиден да работи со работен напон 35 kV, а по овој период се предвидува доградување на 110 kV дел од трафостаницата, и со што ќе се овозможи далекуводот да премине да работи со својот номинален напон 110 kV. Цената на доградениот 110 kV дел од трафостаницата изнесува $K_{T110} = 20 \cdot 10^6 \text{ п.е.}$

Со споредување на вкупните актуализирани трошоци за секоја од варијантите, за периодот од $n = 20$ години, да се утврди која од нив ќе биде економски поповолна.

Бројни вредносѝи:

- стапка на амортизација и одржување на далекуводите: $p_{sv} \% = 5,5\%$;
- стапка на амортизација и одржување на трансформаторските станици: $p_{st} \% = 10\%$,
- просечна цена на изгубениот киловатчас: $c_{\Delta W} = 1,2$ п.е./kWh ,
- стапка на актуализација: $p_a \% = 10\%$.

□ □ □

ИСПИТНИ ЗАДАЧИ ОД ОБЛАСТА НА ТЕХНИЧКО-ЕКОНОМСКИ АНАЛИЗИ

1. Задача (K20698/1). Индустриски потрошувач треба да се напојува со електрична енергија преку 10 kV кабелска мрежа. ($U_n = 10 \text{ kV}$). Врвната моќност на потрошувачот од година во година расте со константен тренд на пораст од 7 % годишно, по законот: $P_M(t) = P_M(0) \cdot x^t = 2 \cdot 1,07^t$ (MW). Времето на максимална моќност на потрошувачот изнесува $T_M = 5000 \text{ h/год.}$ и тоа не се менува, додека факторот на моќност на потрошувачот изнесува $\cos \varphi = 0,8 = \text{const.}$ Напојувањето ќе се изведува со кабли од типот IPO 13 A, 3x150, 10 kV, за кои е познато: единечна цена $k_1 = 60.000 \text{ п.е./km}$; $z = (r + jx) = (0,2 + j0,08) \Omega/\text{km}$. Притоа, за напојувањето на потрошувачот се разгледуваат следните две варијанти:

- 1) поставување на еден кабел на почетокот ($t = 0$) , а после $m = 10$ години, поставување на уште еден ист таков, паралелно со првиот;
- 2) поставување на два кабла во ист ров истовремено, веднаш на самиот почеток ($t = 0$) при што цената на таквиот двоен кабелски вод ќе изнесува $k_2 = 95.000 \text{ п.е./km}$.

Со помош на методот на вкупни актуализирани трошоци да се утврди која од двете разгледувани варијанти е економски поповолна.

Бројни вредности: стапки на амортизација и одржување на каблите $\alpha_a + \alpha_p = 3 + 2 = 5\%$; стапка на актуализација $p_a = 8\%$; цена на изгубената електрична енергија $c_{AW} = 0,1 \text{ п.е./kWh}$.

2. Задача (K20599/2). 10 kV потрошувач со познати карактеристики се напојува со електрична енергија преку еден 110 kV надземен вод со карактеристики $l = 50 \text{ km}$; $z = (r + jx) = (0,13 + j0,40) \Omega/\text{km}$ и еден трансформатор за снижување на напонот како од задачата бр. 1. Сите денови од годината имаат ист дневен дијаграм на оптоварување, а самиот дневен дијаграм на оптоварување на потрошувачот е даден во следната табела.

Перод од денот	MW	Mvar
1) $6^{00} \div 14^{00}$ ($\Delta t_1 = 8 \text{ h}$)	30	15
2) $14^{00} \div 22^{00}$ ($\Delta t_2 = 8 \text{ h}$)	20	10
3) $22^{00} \div 6^{00}$ ($\Delta t_3 = 8 \text{ h}$)	10	5

Со цел да се смалат загубите на моќност и енергија во преносниот вод и во трансформаторот, се предвидува инсталирање на една кондензаторска батерија на 10 kV собирници при самиот потрошувач. За таа цел се разгледуваат две варијанти: 1) батерија со моќност од 5 Mvar, со цена $K_1 = 10.000 \text{ п.е.}$ и 2) автоматска кондензаторска батерија која преку целиот ден ќе го одржува факторот на моќност на вредност $\cos \varphi = 1$, чија цена изнесува $K_2 = 20.000 \text{ п.е.}$ Со помош на методот на пресметковни годишни трошоци да се утврди која од двете наведени варијанти за компензација е економски поповолен.

Бројни вредности: цена на изгубената ел. енергија $c_{AW} = 0,05 \text{ п.е./kWh} = 50 \text{ п.е./MWh}$; збирна стапка за амортизација и одржување на батеријата $p_s = 10\%$; коефициент на ефективност на инвестициите $p_n = 10\%$.

3. Задача (K20600/2). Во една индустриска трансформаторска станица 110/6 kV/kV постојат два идентични, паралелно врзани трансформатори. Притоа постојат можности да работи само едниот, или пак обата трансформатора. Потрошувачите што се напојуваат од 6 kV собирници имаат променлив дневен дијаграм на оптоварување, прикажан во табелата 1.

Да се пресметаат дневните загуби на активна енергија во трансформацијата за следните два случаја:

- 1) кога обата трансформатора цело време работат во паралела;

2) кога едниот од трансформаторите се исклучува во минималниот режим кој трае од 22 часот навечер до 6 часот наутро.

Табела 1. Дневен дијаграм на активното и реактивното оптоварување на потрошувачите

Период од денот	6 – 14 ($\Delta t_1=8$ h)	14 – 22 ($\Delta t_2=8$ h)	22 - 6 наутро ($\Delta t_3=8$ h)
P (MW)	32	25	8
Q (Mvar)	16	12	6

Податоци за еден трансформатор: 20 MVA; 110/6,3 kV/kV; $i_o\%=1\%$; $\Delta P_{Fe}=20$ kW; $\Delta P_{Cun}=120$ kW

4. Задача (K20600/3). Се посматра случајот од задачата бр. 2. Обата трансформатора работат во паралела преку целата година, а сите денови од годината се со идентичен дневен дијаграм на оптоварување. Можна е замена на обата трансформатора со нови, кои имаат подобри технички карактеристики (помали активни загуби за 25%) за што е потребно да се доплати вкупно $K = 200.000$ парични единици (п.е.). Со помош на методот на пресметковни годишни трошоци да се утврди дали е економски оправдана таквата замена. Цената на изгубената ел. енергија изнесува $c_{\Delta W} = 0,1$ п.е./kWh, додека стапките на амортизација и одржување на трансформаторите изнесуваат $p_a = 6\%$ и $p_p = 3\%$ – респективно. Превреднувањето на дополнителните инвестиции K во тековни трошоци да се врши со стапка $p_n = 10\%$.

Податоци за секој нов $\bar{y}r$ -р: 20 MVA; 110/6,3 kV/kV; $i_o\%=0,4\%$; $\Delta P_{Fe}=15$ kW; $\Delta P_{Cun}=90$ kW

5. Задача (K20601/2). На сликата е прикажана 110 kV надземна мрежа, изведена со спроводници од типот Al/C 240/40 m². Сите водови имаат исти подолжни параметри $\underline{z}=(r+jx)=(0,13+j0,40)$ Ω /km. Должините на водовите се прикажани на самата слика, додека потрошувачите ги имаат следните моќности: $\underline{S}_1=(40+j20)$ MVA; $\underline{S}_2=(30+j15)$ MVA; $\underline{S}_3=(70+j35)$ MVA. Сите потрошувачи се од ист тип и имаат ист дневен, односно годишен, дијаграм на моќност, со употребно време $T_M = 4500$ h/год. и време на загуби $\tau = 2886$ h/год.

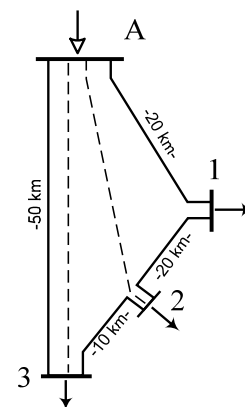
Заради намалување на загубите на моќност и енергија во мрежата се предвидува изградба на уште еден вод со исти карактеристики како и останатите. Се разгледуваат две варијанти:

а) изградба на вод што ќе ги сврзува директно собирниците А и 2 со должина 55 km;

б) изградба на вод помеѓу собирниците А и 3, паралелно со постојниот вод А–3, со должина 50 km.

Со помош на методот на пресметковни годишни трошоци да се утврди која од двете разгледувани варијанти е економски поповолна. Цената на 1 km 110 kV надземен вод изнесува 150.000 п.е./km.

Останати економски показатели: цена на изгубената електрична енергија $c_{\Delta W} = 0.1$ п.е./kWh; годишни стапки на амортизација и одржување на надземните водови $\alpha_a = 3\%$ $\alpha_p = 1\%$; коефициент на ефективност на инвестициите $p_n = 0,1$ (10%).



Напомена: Прикажаната мрежа е хомогена и може да се решава со помош на методот на раздвојување. Фактот што сите потрошувачи имаат ист фактор на моќност $\cos \varphi$ исто така ја олеснува пресметката на тековите на моќности.

6. Задача (K20602/3). Во една индустриска трансформаторска станица 110/6 kV/kV постојат два идентични, паралелно врзани трансформатори од типот А, за кои се познати следните податоци.

Податоци за еден од трансформаторите од типот "А":

20 MVA; 110/6,3 kV/kV; $i_o\% = 1\%$; $\Delta P_{Fe} = 20 \text{ kW}$; $\Delta P_{Cun} = 120 \text{ kW}$

Притоа постојат можности да работи само едниот, или пак обата трансформатора. Потрошувачите што се напојуваат од 6 kV собирници имаат променлива моќност $\underline{S}$, така што е:

$$\underline{S} = \underline{S}_1 = (10+j6) \text{ MVA} \text{ за периодот од } 0^{00} \div 6^{00} \text{ и}$$

$$\underline{S} = \underline{S}_2 = (30+j20) \text{ MVA} \text{ за периодот од } 6^{00} \div 24^{00}.$$

Да се пресметаат дневните загуби на активна енергија во трансформацијата за следните два случаја:

- 1) кога обата трансформатора цело време работат во паралела;
- 2) кога едниот од трансформаторите се исклучува во минималниот режим од $0^{00} \div 6^{00}$.

7. Задача (K20602/4). Се посматра случајот од претходната задача бр. 6. Обата трансформатора работат во паралела преку целата година, а сите денови од годината се со идентичен дневен дијаграм на оптоварување. Можна е замена на обата трансформатора со нови, од тип В, кои имаат подобри технички карактеристики (помали активни загуби за 25%) за што е потребно да се доплати вкупно $K = 150.000$ парични единици (п.е.). Со помош на методот на пресметковни годишни трошоци да се утврди дали е економски оправдана таквата замена. Цената на изгубената ел. енергија изнесува $c_{\Delta W} = 0,1$ п.е./kWh, додека годишните стапки за амортизација и одржување на трансформаторите изнесуваат $p_a = 4\%$ и $p_p = 2\%$ – респективно. Превреднувањето на дополнителните инвестиции K во тековни трошоци да се врши со стапка $p_n = 10 \%$ /год.

Податоци за еден од трансформаторите од типот А:

20 MVA; 110/6,3 kV/kV; $i_o\% = 1\%$; $\Delta P_{Fe} = 20 \text{ kW}$; $\Delta P_{Cun} = 120 \text{ kW}$

Податоци за еден од трансформаторите од типот В:

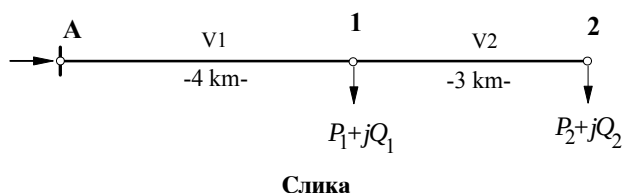
20 MVA; 110/6,3 kV/kV; $i_o\% = 0,4\%$; $\Delta P_{Fe} = 15 \text{ kW}$; $\Delta P_{Cun} = 90 \text{ kW}$

8. Задача (K20603/2): На сликата е прикажана 20 kV надземна мрежа составена од две секции со следните параметри:

V1: $l_1 = 4 \text{ km}$; спроводници Al/Fe 50/8; $\underline{z}_1 = (0,6 + j0,38) \Omega/\text{km}$;

V2: $l_2 = 3 \text{ km}$; спроводници Al/Fe 35/6; $\underline{z}_2 = (0,85 + j0,40) \Omega/\text{km}$.

Обата потрошувача работат со променливо оптоварување во текот на денот. Податоците за нивните дневни дијаграми се прикажани во табелата. Да се пресмета:

интервал (h)	P_1 (MW)	Q_1 (Mvar)	P_2 (MW)	Q_2 (Mvar)	 Слика
$0^{00} \div 6^{00}$	0.5	0.2	1.0	0.4	
$6^{00} \div 8^{00}$	2.0	0.6	1.0	0.4	
$8^{00} \div 4^{00}$	3.0	0.8	2.4	1.0	
$14^{00} \div 24^{00}$	0.5	0.2	1.0	0.4	

- а) загубата на напон ΔU и загубата на моќност во мрежата ΔP за режимот на максимално оптоварување;
- б) дневните загуби на активна енергија во мрежата ΔW_d ;
- в) загубата на напон $\Delta U'$ и загубата на моќност во мрежата $\Delta P'$ во режимот на максимално оптоварување ако во јазелот 1 се инсталира кондензаторска батерија која преку целиот ден ќе работи со моќност $Q_{KB} = 1,2 \text{ Mvar}$.
- г) дали е економски исплатливо инсталирањето на батеријата ако со нејзиното инсталирање дневните загуби на активна енергија се намалат за 6,5%. Цената на батеријата изнесува $K_{KB} = 50.000$ п.е. додека цената на изгубениот kWh изнесува $c_{\Delta W} = 0,15$ п.е. Стапките на амортизација и одржување на кондензаторската батерија KB изнесуваат 7,5% и 2,5% респективно, а коефициентот на ефективност на инвестициите изнесува $p_n = 10\%$.

Решение на задачата бр. 8:

Врз основа на податоците за дн. дијаграми на потрошувачите се добива дека режимот на максимално оптоварување настапува во периодот од 8 до 14 h. Во тој режим ќе имаме:

$$a) \Delta U = \frac{P_{A-1} \cdot R_1 + Q_{A-1} \cdot X_1}{U_n} + \frac{P_{1-2} \cdot R_2 + Q_{1-2} \cdot X_2}{U_n} = \frac{5,4 \cdot 2,4 + 1,8 \cdot 1,52}{20} + \frac{2,4 \cdot 2,55 + 1,0 \cdot 1,2}{20} = 1,151 \text{ kV (5,76\%)}$$

$$\Delta P = \Delta P_{A-1} + \Delta P_{1-2} = \frac{P_{A-1}^2 + Q_{A-1}^2}{U_n^2} \cdot R_1 + \frac{P_{1-2}^2 + Q_{1-2}^2}{U_n^2} \cdot R_2 = \frac{5,4^2 + 2,8^2}{20^2} \cdot 2,4 + \frac{2,4^2 + 1,0^2}{20^2} \cdot 2,55 = 237,5 \text{ kW.}$$

$$б) \Delta W_d = \sum \Delta P_i \cdot \Delta t_i = 23,1 \cdot 6 + 67,4 \cdot 2 + 237,5 \cdot 6 + 23,1 \cdot 10 = 1929,4 \text{ kWh/дневно.}$$

в) По инсталирањето на КБ со $Q_{KB}=1,2$ Mvar реактивната моќност Q_{A-1} во максималниот режим ќе се намали на 1,6 Mvar. Затоа загубите на напон и моќност ќе се намалат на вредностите:

$$\Delta P' = \text{kW}; \Delta U' = \text{kV (\%)}$$

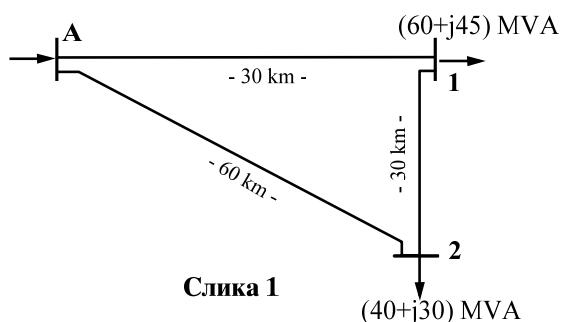
г) Годишните заштеди на енергија заради поставувањето на КБ ќе бидат $0,065 \cdot 1929,4 \cdot 365 = 41.902$ MWh/год., или 6.285 п.е./год. Во исто време пресметковните годишни трошоци ќе се зголемат за $(p_n + \alpha_a + \alpha_p) \cdot K_{KB} = 0,2 \cdot 50.000 = 10.000$, што значи дека инсталирањето на КБ е од економски аспект неоправдано.

9. Задача (K20504/1). На сл. 1 е прикажана 110 kV мрежа која се состои од три делници: А-1, со должина $l_{A-1}=30$ km, А-2, со должина $l_{A-2}=60$ km и делницата 1-2, со должина $l_{1-2}=30$ km. Сите водови од мрежата се со исти подолжни параметри $\underline{z} = (r + jx) = (0,13 + j0,40) \Omega/\text{km}$, а нивните должини се прикажани на самата слика. Оптоварувањата на потрошувачите, исто така, се прикажани на сликата. Напонот во напојната точка се држи на константна вредност $U_A = 118$ kV.

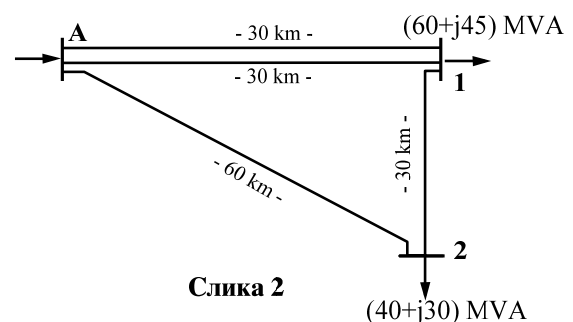
а) Да се определи точката на раздел за активна моќност и напонот во неа. Пресметките да се направат приближно, со занемарување на загубите на моќност во водовите и генерираните капацитивни моќности. Колкави се загубите на активна моќност во мрежата ΔP во тој случај.

б) Колкави ќе бидат загубите ΔP доколку во јазелот 1 се постави синхрон компензатор со кој ќе се изврши целосна компензација на реактивната моќност на потрошувачот, така што неговата моќност ќе изнесува $\underline{S}_1 = (60 + j0)$ MVA.

в) Дали изградбата на уште еден вод на релацијата А-1, паралелно со постојниот, и со исти карактеристики како него (слика 2), ќе претставува поефикасно средство за намалување на загубите на активна моќност ΔP во мрежата отколку компензацијата на реактивната моќност кај потрошувачот во јазелот 1. Колкав ќе биде напонот U_1 во тој случај?



Слика 1



Слика 2

10. Задача (K20504/2). Изградбата на новиот вод во мрежата од претходната задача, чија вредност изнесува $K = 2.000.000$ EUR, ќе доведе до намалување на годишните загуби на електрична енергија за 10.000 MWh/годишно, за ниво на оптоварување од 100 MW, како во состојбата од сликата 1. Вредноста на оваа изгубена енергија изнесува 300.000 EUR. Стапката на амортизација и одржување на водот изнесуваат 3% и 2% годишно. Да се пресмета:

а) Дали е оправдана изградбата на водот доколку врвното оптоварување на конзумент во мрежата со времето не се менува.

б) Дали е оправдана изградбата на водот доколку врвното оптоварување на конзумот во мрежата расте од година во година со стапка на пораст од 4% годишно ($x = 1,04$).

Пресметките да се направат за период на работа од $n = 25$ години, со стапка на актуализација $p_a = 10\%$.

Решение на задачата бр. 10

Ќе посматраме две варијанти: варијанта 1 – постојна состојба во мрежата (сценарио Do nothing; $K=0$) и варијанта 2 – состојба со изграден нов вод ($K=2 \cdot 10^6$ €). Ќе формираме разлика од сумите на вкупните актуелизирани трошоци за овие две варијанти $\Delta\Sigma = \Sigma_2 - \Sigma_1$. Ако оваа разлика е негативна тогаш трошоците за варијантата 2 се помали од оние за варијантата 1 и изградбата на водот ќе биде оправдана – и обратно. На тој начин добиваме: $K=2 \cdot 10^6$ €; $n=25$; $x=1,04$;

$$\Delta\Sigma = K/q^0 + p_s \cdot K \cdot \Gamma(n) - \Delta_0 \cdot \Gamma(x, n). \quad q = 1 + p_a\%/100 = 1,1; \quad p_s = \alpha_a + \alpha_p = 0,03 + 0,02 = 0,05;$$

$$\Gamma(n) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{q^i} = \frac{q^n - 1}{q^n(q-1)} = 9,077; \quad F(x, n) = \sum_{i=1}^n \frac{x^{2i}}{q^i} = \frac{(q/x^2)^n - 1}{(q/x^2)^n \cdot (q/x^2 - 1)} = 20,226.$$

а) $x=1$ (нема пораст на конзумот); $\Gamma(x, n) = \Gamma(n) = 9,077$; $\Delta\Sigma_a = 184.000$ €.

б) $x=1,04$; $\Delta\Sigma_b = 2.000.000 + 0,05 \cdot 2.000.000 \cdot 9,022 - 300.000 \cdot 20,226 = -3.165.600$ €.

11.Задача (K20605/1). Индустриски потрошувач треба да се напојува со електрична енергија преку 10 kV кабелска мрежа. ($U_n = 10$ kV). Врвната моќност на потрошувачот од година во година расте со константен тренд на пораст од 6 % годишно, по законот: $P_M(t) = P_M(0) \cdot x^t = 2 \cdot 1,06^t$ (MW). Времето на максимална моќност на потрошувачот изнесува $T_M = 5500$ h/год. и тоа не се менува, додека факторот на моќност на потрошувачот изнесува $\cos \varphi = 0,8 = \text{const}$. Напојувањето ќе се изведува со кабли од типот IPO 13 A, 3x150, 10 kV, за кои е познато: единечна цена $K = 50.000$ п.е./km; $z = (r + jx) = (0,2 + j0,08)$ Ω/km . Притоа, за напојувањето на потрошувачот се разгледуваат следните две варијанти:

- 1) поставување на еден кабел на почетокот ($t = 0$), а после $m = 10$ години, поставување на уште еден ист таков, паралелно со првиот;
- 2) поставување на два кабла во ист ров истовремено, веднаш на самиот почеток ($t = 0$) при што цената на таквиот двоен кабелски вод ќе изнесува $K_2 = 80.000$ п.е./km.

Со помош на методот на вкупни актуелизирани трошоци да се утврди која од двете разгледувани варијанти е економски поповолна.

Бројни вредности: стапки на амортизација и одржување на каблите $\alpha_a + \alpha_p = 3 + 2 = 5\%$; стапка на актуализација $p_a = 8\%$; цена на изгубената електрична енергија $c_{\Delta W} = 0,05$ п.е./kWh.

Решение на задачата бр. 11

$m=10$; $n=20$ год; $\tau=3980$ h; $p_a=8\%$; $q=1,06$; $x=1,06$; $p_s=\alpha_a+\alpha_p=0,05$; $\Gamma(m)=6,71$; $\Gamma(n)=9,818$; $\Gamma(n)-\Gamma(m) = 3,108$; $1+p_s \cdot \Gamma(m)=1,336$; $1+p_s \cdot \Gamma(n)=1,491$; $\Gamma(x, m)=12,512$; $\Gamma(x, n)=31,1$; $\Gamma(x, n)-\Gamma(x, m) = 18,588$

1 варијанта: $R_1=r_1 \cdot l = 0,2 \cdot 2 = 0,4$ Ω/km ; $\Delta P_1 = \Delta P_1(0) = (S/U_n/\cos\varphi)^2 \cdot R_1 = 25$ kW;

$\Delta W_1(0) = \Delta P_1(0) \cdot \tau = 25 \cdot 3980 = 99486$ kWh/god; $\Delta_1(0) = c_{\Delta W} \cdot \Delta W_1(0) = 0,05 \cdot 99486 = 4974$ п.е./god.

$\Sigma_1 = K_1 + K_1 p_s \cdot \Gamma(n) + \Delta_1(0) \cdot \Gamma(x, m) + K_1/q^m + K_1 p_s \cdot [\Gamma(n) - \Gamma(m)] + \Delta_1(0)/2 \cdot [\Gamma(x, n) - \Gamma(x, m)] = 319.630$ п.е.

2 варијанта: $R_2=R_1/2 = 0,2$ Ω/km ; $\Delta P_2 = \Delta P_2(0) = (S/U_n/\cos\varphi)^2 \cdot R_2 = 12,5$ kW;

$\Delta W_2(0) = \Delta P_2(0) \cdot \tau = 12,5 \cdot 3980 = 49743$ kWh/god; $\Delta_2(0) = \Delta_1(0)/2 = 2487$ п.е./год.

$\Sigma_2 = K_2 + K_2 p_s \cdot \Gamma(n) + \Delta_2(0) \cdot \Gamma(x, n) = 315.906$ п.е.

12.Задача (PI0996/1). Потрошувач со максимална моќност $P_M = 5$ MW и $\cos \varphi = 0,95$ треба да се напојува со електрична енергија преку 20 kV надземен вод со должина $l = 10$ km. Притоа се разгледуваат две варијанти:

а) напојување на потрошувачот со еден вод со спроводници Al/Č 50/8 mm²; $z = (0,6 + j0,35)$ Ω/km ;

б) напојување на потрошувачот со 2 идентични, паралелно врзани вода, секој со спроводници Al/Č 50/8 mm².

Со примена на методот на пресметковни годишни трошоци да се утврди за која вредност на времето на загуби τ на потрошувачот обете разгледувани варијанти ќе бидат економски рамноправни. Колкаво е во тој случај времето на максимална моќност T_M на потрошувачот?

Бројни вредносѝи: Цена на изгубениот киловат-час: $c_{\Delta W} = 1$ п.е./kWh ; единечна цена на 20 kV далекувод $k = 400.000$ п.е./km; годишна стапка на амортизација и одржување на далекуводите: $\alpha_a + \alpha_p = 4\% + 1\% = 5\%$; коефициент на ефективност на инвестициите $p_n = 0,1$. (п.е. = парична единица).

13. Задача (PI0996/2). На сликата 2 е прикажана 110 kV мрежа. Сите водови имаат исти карактеристики и исти подолжни параметри: $\underline{z} = (0,13 + j0,40) \Omega/\text{km}$. Нивните должини, изразени во km, се прикажани на самата слика.

Потрошувачите во мрежата имаат исти дијаграми на оптоварување и исто употребно време (т.е. време на максимална моќност) $T_M = 5000$ h. Во режимот на максимално оптоварување тие ги имаат следните моќности:

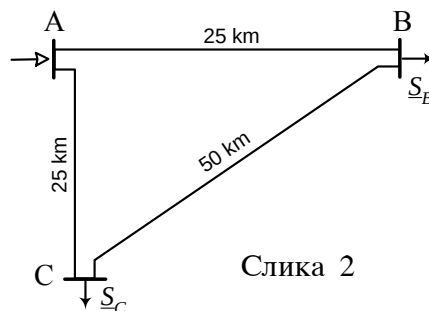
$$\underline{S}_B = (100 + j60) \text{ MVA} ; \underline{S}_C = (40 + j20) \text{ MVA}.$$

Делницата А–В е силно оптоварена, поради што се размислува за појачување на мрежата на тој начин што паралелно со постојниот вод V_{A-B} ќе се приклучи уште еден ист таков вод.

Со методот на пресметковни годишни трошоци да се утврди дали таквото појачување на мрежата е економски оправдано.

Бројни вредносѝи: Цена на изгубениот киловат-час: $c_{\Delta W} = 1$ п.е./kWh ; единечна цена на 110 kV далекувод $k = 10^6$ п.е./km ; годишна стапка на амортизација и одржување на далекуводите: $\alpha_a + \alpha_p = 3\% + 2\% = 5\%$; коефициент на ефективност на инвестициите $p_n = 0,1$.

Забелешка: Во пресметките и кај двете задачи да се изврши занемарување на генерираниите реактивни моќности на водовите.



14. Задача (K20697/1). Индустриски потрошувач треба да се напојува со електрична енергија преку 10 kV кабелска мрежа. ($U_n = 10$ kV). Врвната моќност на потрошувачот од година во година расте со константен тренд на пораст од 7 % годишно, по законот: $P_M(t) = P_M(0) \cdot x^t = 2 \cdot 1,07^t$ (MW). Времето на максимална моќност на потрошувачот изнесува $T_M = 5000$ h/год. и тоа не се менува, додека факторот на моќност на потрошувачот изнесува $\cos \varphi = 0,8 = \text{const}$. Напојувањето ќе се изведува со кабли од типот IPO 13 A, 3x150, 10 kV, за кои е познато: единечна цена $K = 60.000$ п.е./km; $\underline{z} = (r + jx) = (0,2 + j0,08) \Omega/\text{km}$. Притоа, за напојувањето на потрошувачот се разгледуваат следните две варијанти:

- 1) поставување на еден кабел веднаш на почетокот ($t = 0$) , а после $m = 10$ години, уште еден ист таков, паралелно со првиот;
- 2) поставување на два кабла во ист ров, уште на самиот почеток ($t = 0$) при што цената на таквиот двоен кабелски вод ќе изнесува $K_2 = 95.000$ п.е./km.

Со помош на методот на вкупни актуализирани трошоци да се утврди која од двете разгледувани варијанти е економски поповолна.

Бројни вредносѝи: стапки на амортизација и одржување на каблите $\alpha_a + \alpha_p = 3+2 = 5\%$; стапка на актуализација $p_a = 8\%$; цена на изгубената електрична енергија $c_{\Delta W} = 0,1$ п.е./kWh.

15. Задача (PI0997/3). Потрошувач со максимална моќност $P_M = 4.5$ MW и $\cos \varphi = 0,90$ треба да се напојува со ел. енергија преку 20 kV надземен вод со должина $l = 15$ km. Притоа се разгледуваат две варијанти:

- а) напојување со еден вод со спроводници Al/Č 50/8 mm² ($r = 0,6 \Omega/\text{km}$; $x = 0,35 \Omega/\text{km}$);
- б) напојување со 2 идентични, паралелно врзани вода, секој со спроводници Al/Č 50/8 mm².

Со примена на методот на пресметковни годишни трошоци да се утврди за која вредност на времето на загуби τ на потрошувачот обете разгледувани варијанти ќе бидат економски рамноправни. Колкаво е во тој случај времето на максимална моќност T_M на потрошувачот?

Бројни вредности: Цена на изгубениот киловат-час: $c_{\Delta W} = 1$ п.е./kWh ; единечна цена на 20 kV далекувод $k = 400.000$ п.е./km ; годишна стапка на амортизација и одржување на далекуводите: $\alpha_a + \alpha_p = 4\% + 1\% = 5\%$; коефициент на ефективност на инвестициите $p_n = 0,1$.

16. Задача (PI197/2). Индустриски потрошувач со константен дијаграм на оптоварување преку целиот ден треба да се напојува со електрична енергија на ниво 0,4 kV. Потрошувачот ќе работи 250 дена од годината со оптоварување 400 kVA, додека во останатите 115 дена ќе работи со оптоварување 100 kVA. Се разгледуваат две варијанти на трансформацијата на електрична енергија СН/НН:

- а) трансформација 10/0,4kV/kV со трансформатор со номинална моќност изнесува $S_n = 400$ kVA;
- б) трансформација 10/0,4kV/kV со трансформатор со номинална моќност изнесува $S_n = 630$ kVA;

Со методот на пресметковни годишни трошоци да се утврди која од двете споменати варијанти е економски поповолна.

Бројни вредности:

- Коефициент на ефективност на инвестициите: $p_n = 10\%$;
- Стапки на амортизација и одржување на трансформаторите: $\alpha_a = 5\%$; $\alpha_p = 3\%$.
- Цена на електричната енергија: $c_{\Delta W} = 0,1$ п.е./kWh.

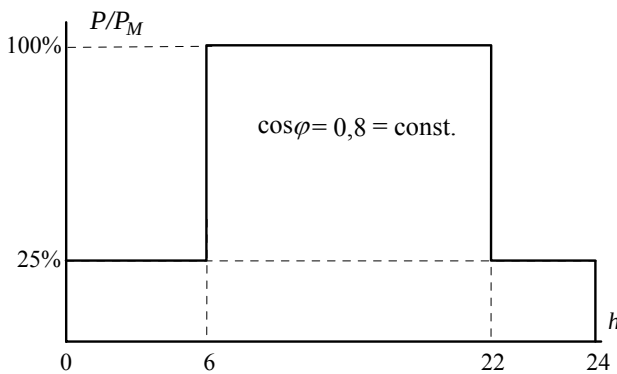
Податоци за трансформаторите:

- а) 10/0,4 400 kVA $u_k = 4\%$ $\Delta P_{Cun} = 4600$ W; $\Delta P_{Fe} = 930$ W; цена: $K_a = 14.000$ п.е.
- б) 10/0,4 630 kVA $u_k = 4\%$ $\Delta P_{Cun} = 6500$ W; $\Delta P_{Fe} = 1300$ W; цена: $K_b = 20.000$ п.е.

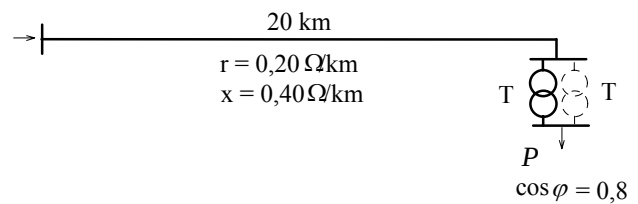
17. Задача (PI0698/2). На сликата 1 е прикажан дневниот дијаграм на еден индустриски потрошувач, напојуван преку преносниот систем од сликата 2. Сите денови од годината имаат ист облик на дневниот дијаграм и преку целиот ден потрошувачот работи со константен фактор на моќност $\cos \varphi = 0,8 = \text{const}$. Врвното оптоварување на потрошувачот на почетокот на разгледуваниот период изнесува $P_{M0} = 12$ MW и од година во година расте со константен тренд на пораст од 5%/годишно ($X = 1,05$), според законот $P_M(t) = P_{M0} \cdot X^t$ ($t = 1, 2, 3 \dots$). Преносниот систем се состои од 110 kV вод со должина $l = 20$ km и со подолжни параметри $\underline{z} = (0,2 + j0,4)$ Ω/km и трансформатор Т за кој се познати следните податоци: 110/6,3 kV/kV; 25 MVA; $u_k = 11\%$; $i_0 = 0,8\%$; $\Delta P_{Cun} = 250$ kW; $\Delta P_{Fe} = 55$ kW. Да се пресмета:

- а) После колку години $m = ?$ привидната моќност на потрошувачот ќе ја надмине номиналната моќност на трансформаторот Т така што ќе биде потребно да се постави уште еден таков трансформатор, паралелно со првиот, за да не дојде до негово преоптоварување ?
- б) Дали е економски поповолно вториот трансформатор да се инсталира веднаш, уште на почетокот, во годината $t = 0$, или пак е поповолно да се чека тоа да се направи кога ќе биде неопходно, на крајот на m -тата година, за да не дојде до преоптоварување на првиот трансформатор.

Бројни податоци: Цена на трансформаторот Т $K_T = 5 \cdot 10^6$ п.е; цена на загубената ел. енергија $c_{\Delta W} = 1$ п.е./kWh; стапка на амортизација и одржување на трансформаторот Т $\alpha_a = 6\%$ и $\alpha_p = 3\%$, стапка на актуализација $p_a = 10\%$ (п.е. = парична единица).



Слика 2



Слика 3

18. Задача (PI0199/1). Индустриски потрошувач со годишна потрошувачка од $3,75 \cdot 10^6$ kWh/god, употребно време $T_M = 5000$ h/god и фактор на моќност $\cos \varphi = 0,8$ треба да се напојува од една трансформаторска станица 10/0,4 kV/kV. Притоа се можни две варијанти: 1) TS 10/0,4 2x630 kVA (со два трансформатора од по 630 kVA), чија цена изнесува $K_1 = 110.000$ DEM и 2) TS 10/0,4 1x1000 kVA, (со еден трансформатор од 1000 kVA) чија цена изнесува $K_2 = 90.000$ DEM. Со методот на пресметковни годишни трошоци да се утврди која од двете варијанти е економски поповолна.

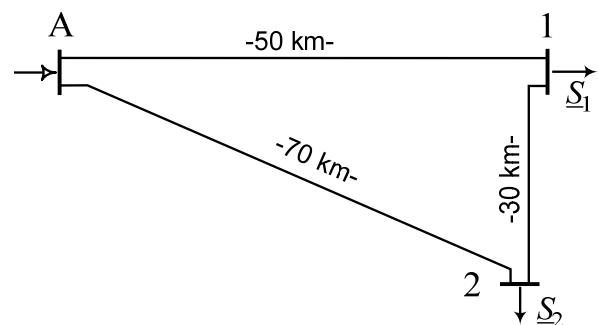
Бројни податоци: Коеф. на ефективност на инвестициите: $p_n = 11\%$; стапка на амортизација $\alpha_a = 6\%$; стапка на одржување $\alpha_p = 3\%$; цена на загубената енергија $c_{\Delta W} = 0,2$ DEM/kWh.

Трансформатор 10/0,4 630 kVA: $u_k\% = 4\%$ $i_0\% = 1,8\%$ $\Delta P_{Fe} = 1,3$ kW $\Delta P_{Cun} = 6,5$ kW.

Трансформатор 10/0,4 1000 kVA: $u_k\% = 6\%$ $i_0\% = 1,6\%$ $\Delta P_{Fe} = 1,75$ kW $\Delta P_{Cun} = 13,5$ kW.

19. Задача (PI0999/2). 110 kV преносна мрежа се состои од три вода: V_{A-1} , долг $l_1 = 50$ km; V_{A-2} , долг $l_2 = 70$ km и вод V_{1-2} , долг $l_3 = 30$ km. Мрежата напојува два потрошувача $\underline{S}_1 = (80+j60)$ MVA и $\underline{S}_2 = (60+j40)$ MVA. Употребното време (времето на максимална моќност на потрошувачите изнесува $T_M = 5000$ h/год. Сите водови се изведени со спроводници Al/C 240/40 mm² и имаат исти подолжни параметри $\underline{z} = (0,13+j0,40)$ Ω/km.

Мрежата е силно оптоварена и поради тоа како и поради големите должини на водовите, во неа се остваруваат значителни загуби. За намалување на загубите ΔP во неа се предвидува изградба на нов вод, кој ќе биде поставен паралелно со постојниот вод V_{A-1} . Новиот вод ќе има исти карактеристики како постојниот и неговата цена изнесува $K = 3.000.000$ п.е. (парични единици). Со методот на пресметковни годишни трошоци да се утврди дали изградбата на предвидениот вод е економски оправдана.



Бројни вредносѝи: стапка на амортизација и одржување на водовите $\alpha_a = 3,3\%$, $\alpha_p = 2,2\%$; коефициент на ефективност на инвестициите $p_n = 0,1$; цена на изгубената електрична енергија $c_{\Delta W} = 0,06$ п.е.

20. Задача (PI0600/2). Во една индустриска трансформаторска станица 110/6 kV/kV постојат два идентични, паралелно врзани трансформатори. Притоа постојат можности да работи само едниот, или пак обата трансформатора. Потрошувачите што се напојуваат од 6 kV собирници имаат променлив дневен дијаграм на оптоварување, прикажан во табелата 1.

Да се пресметаат дневните загуби на активна енергија во трансформацијата за следните два случаја:

- 1) кога обата трансформатора цело време работат во паралела;
- 2) кога едниот од трансформаторите се исклучува во минималниот режим кој трае од 22 часот навечер до 6 часот наутро.

Табела 1. Дневен дијаграм на активното и реактивното оптоварување на потрошувачите

Период од денот	0-6	6 - 14	14 - 22	22 - 24
P (MW)	10	30	22	10
Q (Mvar)	8	14	12	8

Податоци за еден трансформатор: 20 MVA; 110/6,3 kV/kV; $i_o\% = 1\%$; $\Delta P_{Fe} = 30$ kW; $\Delta P_{Cun} = 160$ kW

21. Задача (PI0600/3). Се посматра случајот од задачата бр. 2. Обата трансформатора работат во паралела преку целата година, а сите денови од годината се со идентичен дневен дијаграм на оптоварување. Можна е замена на обата трансформатора со нови, кои имаат подобри технички карактеристики (помали активни загуби за 25%) за што е потребно да се доплати вкупно $K = 200.000$ парични единици (п.е.). Со помош на методот на пресметковни годишни трошоци да се утврди дали е економски оправдана таквата замена. Цената на изгубената ел. енергија изнесува $c_{\Delta W} = 0,1$ п.е./kWh, додека стапките на амортизација и одржување на трансформаторите изнесуваат $p_a = 6\%$ и $p_p = 3\%$ - респективно. Превреднувањето на дополнителните инвестиции K во тековни трошоци да се врши со стапка $p_n = 10\%$.

Податоци за секој нов тпр-р: 20 MVA; 110/6,3 kV/kV; $i_o\% = 0,4\%$; $\Delta P_{Fe} = 22,5$ kW; $\Delta P_{Cun} = 120$ kW.

22. Задача (P20900/2). На сликата 2 е прикажана 110 kV мрежа. Сите водови имаат исти карактеристики и исти подолжни параметри: $\underline{z} = (0,12 + j0,40)$ Ω/km . Нивните должини, изразени во km, се прикажани на самата слика.

Потрошувачите во мрежата имаат исти дијаграми на оптоварување и исто употребно време (т.е. време на максимална моќност) $T_M = 5500$ h. Во режимот на максимално оптоварување тие ги имаат следните моќности:

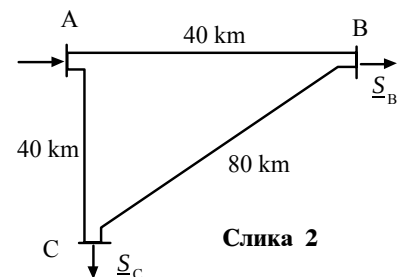
$$\underline{S}_B = (80 + j40) \text{ MVA}; \quad \underline{S}_C = (40 + j20) \text{ MVA}$$

Делницата А-В е силно оптоварена, поради што се размислува за појачување на мрежата на тој начин што паралелно со постојниот вод V_{A-B} ќе се приклучи уште еден ист таков вод.

Со методот на пресметковни годишни трошоци да се утврди дали таквото појачување на мрежата е економски оправдано.

Бројни вредносѝ: Цена на изгубениот киловат-час: $c_{\Delta W} = 1,5$ п.е./kWh; единечна цена на 110 kV далекувод $k = 1,2 \cdot 10^6$ п.е./km; годишна стапка на амортизација и одржување на далекуводите: $\alpha_a + \alpha_p = 3\% + 2\% = 5\%$; коефициент на ефективност на инвестициите $p_n = 0,1$. (п.е. = парична единица).

Забелешка: Во пресметките и кај двете задачи да се изврши занемарување на генерираниите реактивни моќносѝ на водовите.



23. Задача (PI1000/1). Потрошувач со максимална моќност $P_M = 6$ MW и $\cos \varphi = 0,95$ треба да се напојува со електрична енергија преку 20 kV надземен вод со должина $l = 10$ km. Притоа се разгледуваат две варијанти:

а) напојување на потрошувачот со еден вод со спроводници Al/Č 50/8 mm² ($r = 0,6 \Omega/\text{km}$; $x = 0,35 \Omega/\text{km}$);

б) напојување на потрошувачот со 2 идентични, паралелно врзани вода, секој со спроводници Al/Č 50/8 mm².

Со примена на методот на пресметковни годишни трошоци да се утврди за која вредност на времето на загуби τ на потрошувачот обете разгледувани варијанти ќе бидат економски рамноправни. Колкаво е во тој случај времето на максимална моќност T_M на потрошувачот?

Бројни вредносѝи: Цена на изгубениот киловат-час: $c_{\Delta W} = 1$ п.е./kWh ; единечна цена на 20 kV далекувод $k = 350.000$ п.е./km ; годишна стапка на амортизација и одржување на далекуводите: $\alpha_a + \alpha_p = 4\% + 2\% = 6\%$; коефициент на ефективност на инвестициите $p_n = 0,1$. (п.е. = парична единица).

24. Задача (P10201/1). Потрошувач со максимална моќност $P_M = 4,5$ MW и $\cos \varphi = 0,90$ треба да се напојува со електрична енергија преку 20 kV надземен вод со должина $l = 10$ km. Притоа се разгледуваат две варијанти:

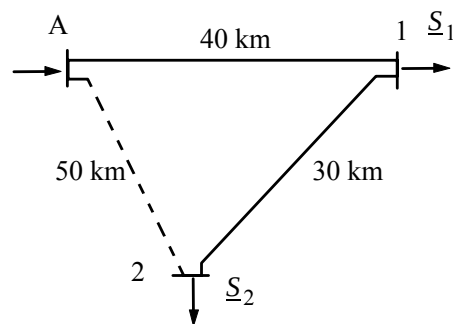
а) напојување на потрошувачот со еден вод со спроводници Al/Č 50/8 mm²; $z = (0,6 + j0,35) \Omega/\text{km}$;

б) напојување на потрошувачот со 2 идентични, паралелно врзани вода, секој со спроводници Al/Č 50/8 mm².

Со примена на методот на пресметковни годишни трошоци да се утврди за која вредност на времето на загуби τ на потрошувачот обете разгледувани варијанти ќе бидат економски рамноправни. Колкаво е во тој случај времето на максимална моќност T_M на потрошувачот?

Бројни вредносѝи: Цена на изгубениот киловат-час: $c_{\Delta W} = 1$ п.е./kWh ; единечна цена на 20 kV далекувод $K = 500.000$ п.е./km; годишна стапка на амортизација и одржување на далекуводите: $\alpha_a + \alpha_p = 4\% + 1\% = 5\%$; коефициент на ефективност на инвестициите $p_n = 0,1$. (п.е. = пар. единица).

25. Задача (P10901/1). На сликата е прикажана радијална 110 kV мрежа составена од два вода преку која се напојуваат два потрошувача со моќности $\underline{S}_1 = (35 + j20)$ MVA и $\underline{S}_2 = (25 + j15)$ MVA. Сите водови во мрежата се од ист тип и имаат исти подолжни параметри $z = (0,13 + j0,40) \Omega/\text{km}$; $b_0 = 2,75 \cdot 10^{-6}$ S/km. Познати се нивните должини: $l_{A1} = 40$ km; $l_{12} = 30$ km. Во прикажаниот режим напонот во точката 2 изнесува $U_2 = 106$ kV. Притоа може да се смета дека напонот во напојната точка "А" се држи на константна вредност $U_A = \text{const}$.



Со цел да се подобрат напонските прилики и намалат загубите на моќност и енергија во мрежата се предвидува изградба на нов вод на потегот А–2 со должина $l_{A2} = 50$ km и со исти карактеристики како и другите. Да се пресмета колкав ќе биде напонот U_2 по неговата изградба. При пресметките да се земе предвид капацитивноста на водовите.

26. Задача (P10901/2). Во примерот од претходната задача со помош на методот на вкупни актуализирани трошоци да се утврди дали е економски оправдана изградбата на водот А–2 од аспект на смалување на загубите на енергија во мрежата. Во пресметките да се земе период на посматрање од $n = 20$ години.

Осѝананѝи поданѝици: Цена на новиот вод А–2; $K = 3 \cdot 10^6$ п.е.; цена на изгубената ел. енергија $c_{\Delta W} = 0,05$ п.е./kWh; стапка на амортизација и одржување на далекуводите $\alpha_a = 3\%$ $\alpha_p = 2\%$; време на максимална моќност на потрошувачите $T_M = 5000$ h/год. ; стапка на годишен пораст на потрошувачката на електрична енергија $3,5$ %/годишно.

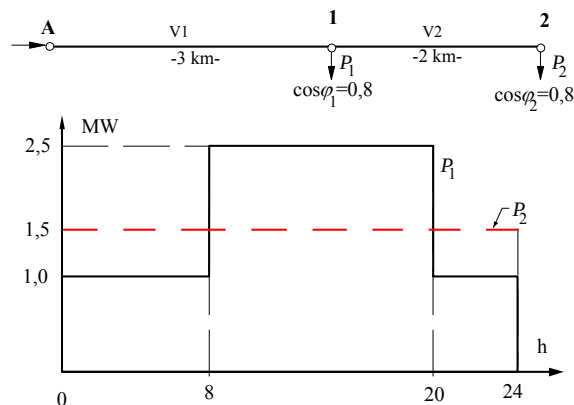
27. Задача (PI0902/3). На сликата е прикажана 10 kV кабелска мрежа составена од две секции со следните параметри:

V1: $l_1 = 3 \text{ km}$; кабел тип ХНР 48 А 3x1x150/25 6/10 kV $z = (0,2 + j0,06) \Omega/\text{km}$;

V2: $l_2 = 2 \text{ km}$; кабел тип ХНР 48 А 3x1x150/25 6/10 kV $z = (0,2 + j0,06) \Omega/\text{km}$;

Дневните дијаграми на потрошувачите $P_1(t)$ и $P_2(t)$, кои преку целиот ден работат со фактор на моќност $\cos \varphi = 0,8 = \text{const.}$ се исто така прикажани на сликата 2. Да се пресмета:

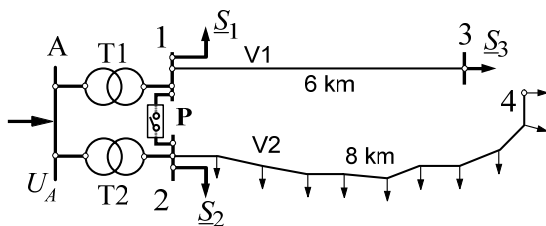
- загубата на напон во мрежата, во %, за режимот на максимално оптоварување;
- дневните загуби на активна енергија во мрежата ΔW_d ;
- дневните загуби на активна енергија во мрежата $\Delta W'_d$ ако во точката 2 се инсталира кондензаторска батерија која преку целиот ден ќе работи со моќност $Q_{KB} = 1,5 \text{ Mvar}$.
- дали е економски исплатливо инсталирањето на батеријата ако цената на батеријата изнесува $K_{KB} = 60.000 \text{ п.е.}$ додека цената на изгубениот kWh изнесува $c_{\Delta W} = 0,1 \text{ п.е.}$



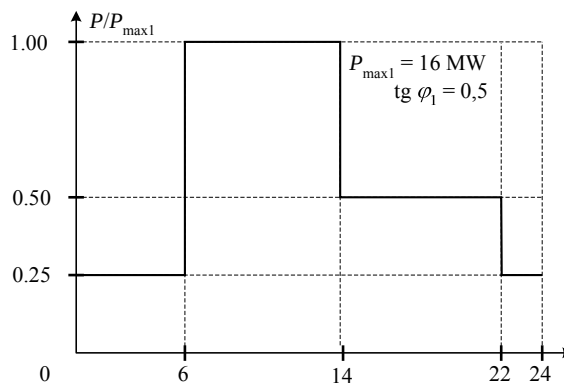
Стапките на амортизација и одржување на кондензаторската батерија КБ изнесуваат 7,5% и 2,5% респективно, а коефициентот на ефективност $p_n = 10\%$.

28. Задача (P20904/3). Дневниот дијаграм на оптоварување на трансформаторот Т1 од сликата 1 е прикажан на сликата 2. Притоа максималното оптоварување е $P_{M1} = 16 \text{ MW}$, а факторот на моќност е $\cos \varphi_1 = 0,89443$ ($\text{tg} \varphi_1 = 0,5$) и е константен преку целиот ден. Сите денови во годината (365 дена) имаат ист дневен дијаграм.

Со примена на методот на пресметковни годишни трошоци да се утврди дали е економски оправдано инсталирањето на кондензаторска батерија КБ со моќност $Q_{KB} = 2 \text{ Mvar}$ на секундарот од тр. Т1 (собирица бр. 1). Батеријата ќе работи преку целиот ден со моќност 2 Mvar, а нејзината цена изнесува $K_{KB} = 5000 \text{ €}$. Цената на загубената ел. енергија изнесува $c_{\Delta W} = 0,04 \text{ €/kWh}$. Останати бројни вредности: стапка на амортизација + одржување на батеријата $\alpha_{KB} = \alpha_a + \alpha_p = 13\%$; нормативен коефициент на ефективност на инвестициите $p_n = 12\%$.



Слика 1



Слика 2