Електрични мрежи

Димензионирање на радијалните дистрибутивни мрежи

М. Тодоровски

Институт за преносни електроенергетски системи
Факултет за електротехника и информациски технологии
Универзитет Св. Кирил и Методиј

mirko@feit.ukim.edu.mk
pees.feit.ukim.edu.mk

Скопје, 2018

Општо

- Во досегашните пресметки беа познати оптоварувањата и сите параметри на мрежата, а со пресметките се определуваше загубата на напон и загубата на моќност.
- При проектирањето може да се јави потреба и од решавање на друг вид проблеми: определувањето на потребниот пресек на поедините водови во мрежата така што загубите на напонот да бидат најмногу еднакви на $\Delta U_{\text{дозв.}}$
- Бидејќи погонската индуктивна отпорност малку се менува со промената на пресекот вообичаено е пресметките да се вршат со просечните вредности x кои практично зависат само од номиналниот напон

	Просечна вредност за $x(\Omega/\mathrm{km})$	
U_n (kV)	надземни водови	кабелски водови
110	0,40	/
35	0,39	0,13
20	0,38	0,11
10	0,37	0,08
до 1	0,33	0,06

Општо

При познато оптоварување на водот $\underline{S} = P + jQ$, позната должина l и претпоставена индуктивна отпорност x за загубата на напонот се добива

$$\Delta U = \Delta U_{\mathrm{a}} + \Delta U_{\mathrm{r}} = \frac{P \cdot R}{U_{\mathrm{n}}} + \frac{Q \cdot X}{U_{\mathrm{n}}} \leq \Delta U_{\text{дозв.}}$$

од што следува

$$\frac{P \cdot R}{U_{\mathrm{n}}} \leq \Delta U_{\text{дозв.}} - \Delta U_{\mathrm{r}} = \Delta U_{\text{дозв.}} - \frac{Q \cdot X}{U_{\mathrm{n}}}$$

$$\Delta U_{\mathrm{a.}\text{дозв.}} = (\Delta U_{\text{дозв.}} - \Delta U_{\mathrm{r}}) = \left(\Delta U_{\text{дозв.}} - \frac{Q \cdot X}{U_{\mathrm{n}}}\right)$$

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{l}{\sigma \cdot A}$$

$$\frac{P \cdot R}{U_{\mathrm{n}}} = \frac{P \cdot l}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot A} \leq \Delta U_{\mathrm{a.}\text{дозв.}}$$

$$A \geq \frac{P \cdot l}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot \Delta U_{\mathrm{a.}\text{дозв.}}}$$

Општо

$$A \geq \frac{P \cdot l}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot \Delta U_{\mathrm{a.дозв.}}}$$

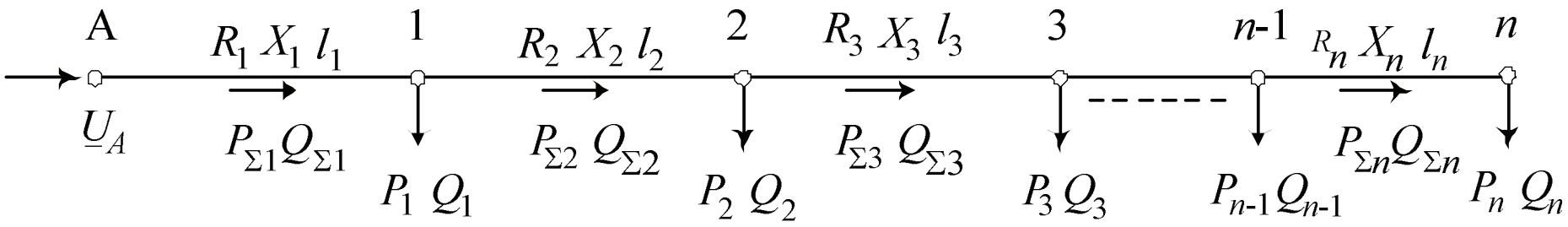
Бидејќи напречните пресеци се стандардизирани, го избираме првиот најблизок пресек до пресметаниот. За тој пресек се определуваат точните вредности на надолжните параметри r и x, а потоа и соодветната загуба на напонот

$$\Delta U = \frac{l}{U_{\mathrm{n}}} \cdot (P \cdot r + Q \cdot x) = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_{\mathrm{n}}}$$

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

Димензионирање според критериумот на константен пресек

- Критериумот $\Delta U \leq \Delta U_{\text{дозв.}}$ е доволен за случај на мрежа од само еден вод.
- Кога мрежата има поголем број водови за нејзиното димензионирање е неопходно да се воведат и дополнителни услови. Еден од почесто применуваните дополнителни услови е критериумот на константен пресек.



$$\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \ldots + \Delta U_{n-1} + \Delta U_n = \sum_{i=1}^{n} \Delta U_i$$

$$\Delta U = \frac{1}{U_{\mathrm{n}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} (P_{\Sigma i} \cdot R_i + Q_{\Sigma i} \cdot X_i)$$

$$\Delta U = \frac{1}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{P_{\Sigma i} \cdot l_i}{A_i} + \frac{1}{U_{\mathrm{n}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} Q_{\Sigma i} \cdot x_i \cdot l_i$$

Димензионирање според критериумот на константен пресек

$$\Delta U = \frac{1}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{P_{\Sigma i} \cdot l_i}{A_i} + \frac{1}{U_{\mathrm{n}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} Q_{\Sigma i} \cdot x_i \cdot l_i$$

Равенката може да се реши само ако се воведуваат некои дополнителни услови, како на пример $A_1 = A_2, = \ldots = A_n = A$.

$$\Delta U_{\text{а.дозв.}} = \frac{1}{\sigma \cdot A \cdot U_{\mathrm{n}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} P_{\Sigma i} \cdot l_i + \frac{1}{U_{\mathrm{n}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} Q_{\Sigma i} \cdot x_i \cdot l_i$$

$$\Delta U_{\text{а.дозв.}} = \Delta U_{\text{дозв.}} - \frac{1}{U_{\mathrm{n}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} Q_{\Sigma i} \cdot x_i \cdot l_i = \frac{1}{\sigma \cdot A \cdot U_{\mathrm{n}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} P_{\Sigma i} \cdot l_i$$

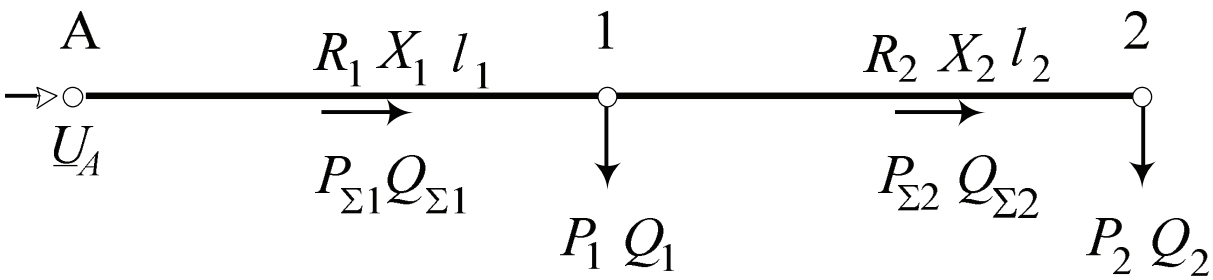
$$A \geq \frac{1}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot \Delta U_{\text{а.дозв.}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} P_{\Sigma i} \cdot l_i$$

Натаму за A го усвојуваме најблискиот стандарден пресек и потоа за него вршиме проверка на вистинската загуба на напон, а по потреба и негова корекција.

Димензионирање според критериумот на константна густина на струјата

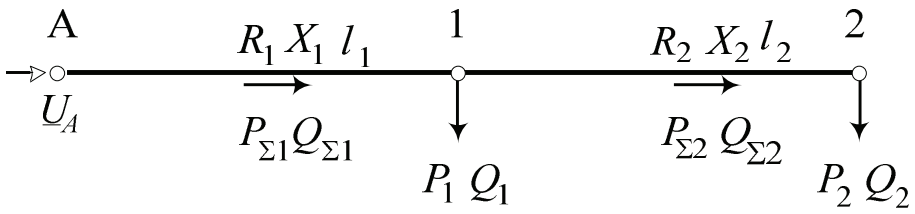
- Во почетните делници струјата е поголема од струјата во крајните делници. За да се искористи металот во спроводниците што е можно порационално, треба почетните делници да бидат со поголем пресек, додека крајните делници со помал пресек.
- Во низа случаи, како дополнителен услов при изборот на пресеците на спроводниците, се зема еднаквоста на густините на струите во сите секции од водот

$$J_1 = J_2 = \ldots = J_n.$$



$$\Delta U = \frac{1}{U_{\mathrm{n}}} \cdot \left[(P_{\Sigma 1} \cdot R_1 + Q_{\Sigma 1} \cdot X_1) + (P_{\Sigma 2} \cdot R_2 + Q_{\Sigma 2} \cdot X_2) \right].$$

Димензионирање според критериумот на константна густина на струјата



$$P_{\Sigma 1} = \sqrt{3} \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot I_{\Sigma 1} \cdot \cos\varphi_{\Sigma 1}, \qquad P_{\Sigma 2} = \sqrt{3} \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot I_{\Sigma 2} \cdot \cos\varphi_{\Sigma 2},$$

$$J_1 = \frac{I_{\Sigma 1}}{A_1}, \qquad J_2 = \frac{I_{\Sigma 2}}{A_2},$$

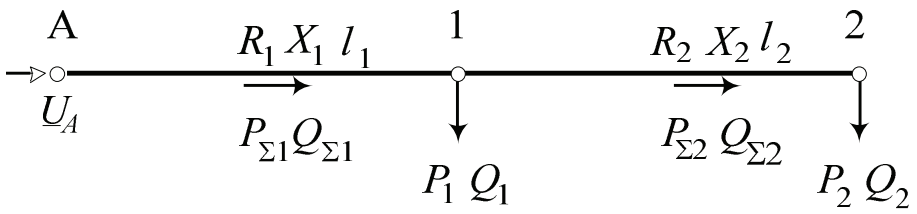
$$\frac{P_{\Sigma 1} \cdot R_1}{U_{\mathrm{n}}} = \sqrt{3} \cdot I_{\Sigma 1} \cdot \cos\varphi_{\Sigma 1} \cdot \frac{l_1}{\sigma_1 \cdot A_1},$$

$$\frac{P_{\Sigma 2} \cdot R_2}{U_{\mathrm{n}}} = \sqrt{3} \cdot I_{\Sigma 2} \cdot \cos\varphi_{\Sigma 2} \cdot \frac{l_2}{\sigma_2 \cdot A_2},$$

за $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$ имаме

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3}}{\sigma} \cdot (J_1 \cdot l_1 \cdot \cos\varphi_{\Sigma 1} + J_2 \cdot l_2 \cdot \cos\varphi_{\Sigma 2}) + \frac{1}{U_{\mathrm{n}}} \cdot \sum_{i=1}^{2} Q_{\Sigma i} \cdot X_i$$

Димензионирање според критериумот на константна густина на струјата



$$\Delta U = \frac{\sqrt{3}}{\sigma} \cdot (J_1 \cdot l_1 \cdot \cos\varphi_{\Sigma 1} + J_2 \cdot l_2 \cdot \cos\varphi_{\Sigma 2}) + \frac{1}{U_\mathrm{n}} \cdot \sum_{i=1}^{2} Q_{\Sigma i} \cdot X_i$$

При $J_1 = J_2 = J_\mathrm{const.}$ и $\Delta U = \Delta U_{\text{дозв.}}$ имаме

$$\frac{\sqrt{3}}{\sigma} \cdot J_\mathrm{const.} \cdot (l_1 \cdot \cos\varphi_{\Sigma 1} + l_2 \cdot \cos\varphi_{\Sigma 2}) =$$

$$= \Delta U_{\text{дозв.}} - \frac{1}{U_\mathrm{n}} \cdot \sum_{i=1}^{2} Q_{\Sigma i} \cdot X_i \equiv \Delta U_{\text{а.дозв.}}$$

$$J_\mathrm{const.} = \frac{\sigma \cdot \Delta U_{\text{а.дозв.}}}{\sqrt{3} \cdot (l_1 \cdot \cos\varphi_{\Sigma 1} + l_2 \cdot \cos\varphi_{\Sigma 2})}$$

Димензионирање според критериумот на константна густина на струјата

Во случај кога мрежата напојува n потрошувачи ќе биде

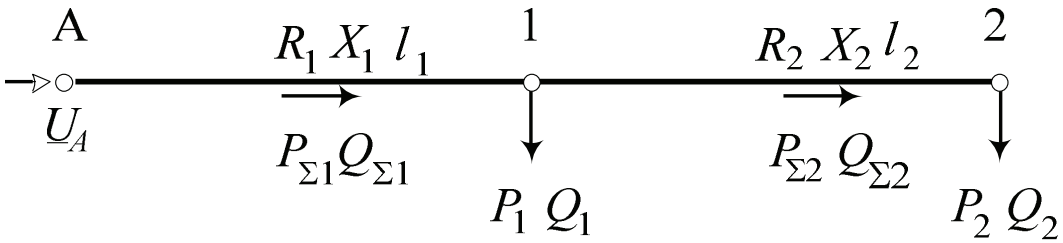
$$\Delta U_{\text{а.дозв.}} = \Delta U_{\text{дозв.}} - \frac{1}{U_{\mathrm{n}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} Q_{\Sigma i} \cdot X_i,$$

$$J_{\mathrm{const.}} = \frac{\sigma \cdot \Delta U_{\text{а.дозв.}}}{\sqrt{3} \cdot \sum\limits_{i=1}^{n} l_i \cdot \cos \varphi_{\Sigma i}}$$

$$A_i = \frac{I_{\Sigma i}}{J_{\mathrm{const.}}}, \quad (i = 1, 2, \ldots, n),$$

Пресеците се заокружуваат на најблиските стандардни пресеци. Потоа се пресметува вистинската загуба на напон во мрежата со точните вредности за R и X и се проверува условот $\Delta U \leq \Delta U_{\text{дозв.}}$. По потреба се врши корекција на пресеците.

Димензионирање според критериумот на минимална потрошувачка на материјал



$$\Delta U_{\mathrm{a1}} = \frac{P_{\Sigma 1} \cdot R_1}{U_{\mathrm{n}}} = \frac{P_{\Sigma 1} \cdot l_1}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot A_1}, \quad \Delta U_{\mathrm{a2}} = \frac{P_{\Sigma 2} \cdot R_2}{U_{\mathrm{n}}} = \frac{P_{\Sigma 2} \cdot l_2}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot A_2},$$

$$A_1 = \frac{P_{\Sigma 1} \cdot l_1}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot \Delta U_{\mathrm{a1}}}, \quad A_2 = \frac{P_{\Sigma 2} \cdot l_2}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot \Delta U_{a2}}.$$

$$\Delta U_{\text{а.дозв.}} \equiv \Delta U_{\mathrm{a1}} + \Delta U_{\mathrm{a2}} = \Delta U_{\text{дозв.}} - \frac{1}{U_{\mathrm{n}}} \cdot \sum_{i=1}^{2} Q_{\Sigma i} \cdot X_i$$

$$\Delta U_{a2} = \Delta U_{\text{а.дозв.}} - \Delta U_{a1},$$

$$A_2 = \frac{P_{\Sigma 2} \cdot l_2}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot (\Delta U_{\text{а.дозв.}} - \Delta U_{\mathrm{a1}})}$$

Димензионирање според критериумот на минимална потрошувачка на материјал

Волуменот на употребениот материјал (за една фаза)

$$V = A_1 \cdot l_1 + A_2 \cdot l_2 = \frac{P_{\Sigma 1} \cdot l_1^2}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot \Delta U_{\mathrm{a}1}} + \frac{P_{\Sigma 2} \cdot l_2^2}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot (\Delta U_{\text{а.дозв.}} - \Delta U_{\mathrm{a}1})}$$

Волуменот V е зависен само од променливата ΔU_{a1}

$$\frac{dV}{d(\Delta U_{a1})} = 0$$

$$-\frac{P_{\Sigma 1} \cdot l_1^2}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot \Delta U_{\mathrm{a}1}^2} + \frac{P_{\Sigma 2} \cdot l_2^2}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot (\Delta U_{\text{а.дозв.}} - \Delta U_{\mathrm{a}1})^2} = 0$$

$$\frac{P_{\Sigma 1} \cdot l_1^2}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot \Delta U_{\mathrm{a}1}^2} = \frac{P_{\Sigma 2} \cdot l_2^2}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot \Delta U_{\mathrm{a}2}^2}$$

$$\frac{A_1^2}{P_{\Sigma 1}} = \frac{A_2^2}{P_{\Sigma 2}}$$

$$A_2 = A_1 \cdot \sqrt{\frac{P_{\Sigma 2}}{P_{\Sigma 1}}}$$

Димензионирање според критериумот на минимална потрошувачка на материјал

Пресеците A_1 и A_2 ќе ги добиеме од условот

$$\frac{P_{\Sigma 1} \cdot l_1}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot A_1} + \frac{P_{\Sigma 2} \cdot l_2}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot A_2} = \Delta U_{\text{а.дозв.}}$$

$$\frac{1}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot A_1} \cdot \left(P_{\Sigma 1} \cdot l_1 + l_2 \cdot \sqrt{P_{\Sigma 1} \cdot P_{\Sigma 2}}\right) = \Delta U_{\text{а.дозв.}},$$

$$A_1 = \frac{\sqrt{P_{\Sigma 1}}}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot U_{\text{а.дозв.}}} \cdot \left(l_1 \cdot \sqrt{P_{\Sigma 1}} + l_2 \cdot \sqrt{P_{\Sigma 2}}\right),$$

$$A_2 = \frac{\sqrt{P_{\Sigma 2}}}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot U_{\text{а.дозв.}}} \cdot \left(l_1 \cdot \sqrt{P_{\Sigma 1}} + l_2 \cdot \sqrt{P_{\Sigma 2}}\right).$$

Димензионирање според критериумот на минимална потрошувачка на материјал

За мрежата од n делници имаме

$$\frac{A_1^2}{P_{\Sigma 1}} = \frac{A_2^2}{P_{\Sigma 2}} = \cdots = \frac{A_n^2}{P_{\Sigma n}} = \mathrm{const.}$$

$$A_k = \frac{\sqrt{P_{\Sigma k}}}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot \Delta U_{\text{а.дозв.}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} l_i \cdot \sqrt{P_{\Sigma i}}, \quad k = 1, 2, \cdots, n,$$

$$A_k = k_P \cdot \sqrt{P_{\Sigma k}}, \quad k = 1, 2, \cdots, n,$$

каде што е

$$k_P = \frac{1}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot \Delta U_{\text{а.дозв.}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} l_i \cdot \sqrt{P_{\Sigma i}}.$$

Пресеците се заокружуваат на најблиските стандардни пресеци. Потоа се пресметува вистинската загуба на напон во мрежата со точните вредности за R и X и се проверува условот $\Delta U \leq \Delta U_{\text{дозв.}}$. По потреба се врши корекција на пресеците.

Економска густина на струјата

- Од пресекот на поедините делници од мрежата зависат вкупните трошоци за изградбата и експлоатацијата на самата мрежа.
- Зголемувањето на пресеците 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.
- 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}, а густината на струјата што му соодветствува на економскиот пресек се нарекува економска густина на струјата J_{ek}.
- A_{ek} и J_{ek} зависат на сложен начин од цените на материјалите, цената на електричната енергија, од големината на употребното време T_{M} и др. Детали може да се видат во 9 глава од учебникот.

Економска густина на струјата

Економска густина на струјата J_{ek} (A/mm^2)			
Спроводник или кабел	$1000 < T_{\mathrm{M}} \leq 3000$	$3000 < T_{\mathrm{M}} \leq 5000$	$T_{\mathrm{M}} > 5000$
Голи спроводници и собирници			
од бакар	2,5	2,1	1,8
од алуминиум или Al/Fe-јажиња	1,3	1,1	1,0
Кабли со изолација од PVC и од импрегнирана хартија (IP, NP)			
од бакар	3,0	2,5	2,0
од алуминиум	1,6	1,4	1,2
Кабли со изолација од гума (G), полиетилен (PE) или вмрежен полиетилен (XLPE)			
од бакар	3,5	3,1	2,7
од алуминиум	1,9	1,7	1,6

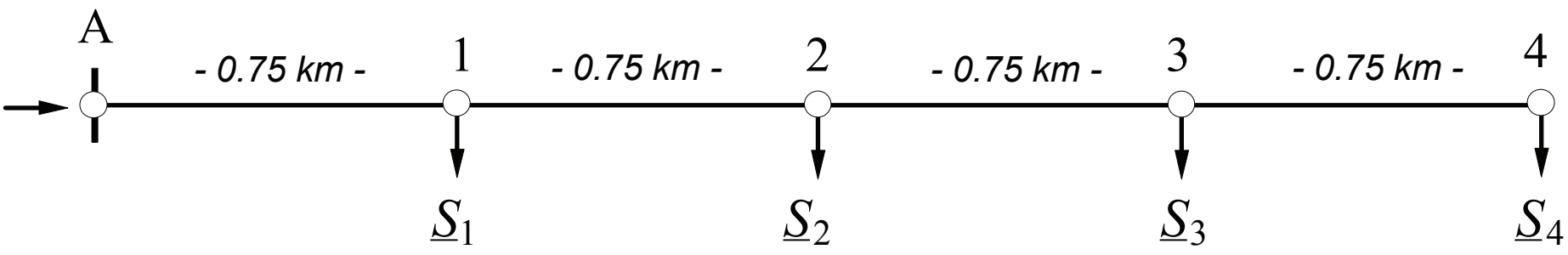
Пример 1

На сликата е прикажан 10 kV кабелски извод кој треба да биде изведен со кабли од типот XHP 48 A, 10 kV со спроводници од алуминиум (σ = 32 S·mm^2/m). 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. Да се изврши димензионирање на изводот според критериумите на:

а) константен пресек,

б) константна густина на струјата и

в) минимална потрошувачка на материјал.



$$\underline{S}_1 = \underline{S}_2 = \underline{S}_3 = \underline{S}_4 = \underline{S} = (600 + j250)\ \mathrm{kVA}.$$

Пример 1

Податоци за подолжните параметри на предвидените кабелски водови

$A\ (\mathrm{mm}^2)$	16	25	35	50	70	95	120	150
$r\ (\Omega/\mathrm{km})$	2,003	1,282	0,866	0,641	0,443	0,320	0,253	0,206
$x\ (\Omega/\mathrm{km})$	0,136	0,131	0,126	0,121	0,116	0,112	0,108	0,105
$I_d\ (\mathrm{A})$	85	130	155	180	225	270	305	340

Пример 1

$$\underline{S}_{\Sigma 1} = 4 \cdot \underline{S} = (2,4 + j1,0)\mathrm{MVA} = 2,6\angle 22,62^\circ\ \mathrm{MVA},$$
$$I_{\Sigma 1} = S_{\Sigma 1}/(\sqrt{3} \cdot U_\mathrm{n}) = 150\ \mathrm{A}.$$
$$\underline{S}_{\Sigma 2} = 3 \cdot \underline{S} = (1,8 + j0,75)\ \mathrm{MVA} = 1,95\angle 22,62^\circ\ \mathrm{MVA},$$
$$I_{\Sigma 2} = S_{\Sigma 2}/(\sqrt{3} \cdot U_\mathrm{n}) = 112,5\ \mathrm{A}.$$
$$\underline{S}_{\Sigma 3} = 2 \cdot \underline{S} = (1,2 + j0,5)\ \mathrm{MVA} = 1,3\angle 22,62^\circ\ \mathrm{MVA},$$
$$I_{\Sigma 3} = S_{\Sigma 3}/(\sqrt{3} \cdot U_\mathrm{n}) = 75\ \mathrm{A}.$$
$$\underline{S}_{\Sigma 4} = \underline{S} = (0,6 + j0,25)\ \mathrm{MVA} = 0,65\angle 22,62^\circ\ \mathrm{MVA},$$
$$I_{\Sigma 4} = S_{\Sigma 4}/(\sqrt{3} \cdot U_\mathrm{n}) = 37,5\ \mathrm{A}.$$

$$\Delta U_{\text{дозв.}} = 0,03 \cdot U_n = 0,3\ \mathrm{kV}.$$

Од табелата гледаме важи $0,105 \leq x \leq 0,136\ \Omega/\mathrm{km}$ и усвојуваме $x = 0,12\ \Omega/\mathrm{km}$.

Пример 1

$$\Delta U_{\mathrm{r}} = \frac{x}{U_{\mathrm{n}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} Q_{\Sigma i} \cdot l_i =$$

$$= \frac{0,12}{10} \cdot (1,0 \cdot 0,75 + 0,75 \cdot 0,75 + 0,5 \cdot 0,75 + 0,25 \cdot 0,75) = 0,0225\,\mathrm{kV}.$$

$$\Delta U_{\text{а.дозв.}} = U_{\text{дозв.}} - \Delta U_{\mathrm{r}} = 0,3 - 0,0225 = 0,2775\,\mathrm{kV}.$$

Пример 1 – константен пресек

$$A \geq \frac{\sum_{i=1}^{4} P_{\Sigma i} \cdot l_i}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot \Delta U_{\text{а.дозв.}}} = \frac{(2,4 + 1,8 + 1,2 + 0,6) \cdot 0,75 \cdot 10^9}{32 \cdot 10 \cdot 0,2775 \cdot 10^6} = 50,7\ \mathrm{mm}^2.$$

Усвојуваме $A = 50\ \mathrm{mm}^2$, $\underline{z} = r + jx = (0,641 + j0,121)\ \Omega/\mathrm{km}$.

$$\Delta U = r \cdot \frac{\sum_{i=1}^{4} P_{\Sigma i} \cdot l_i}{U_{\mathrm{n}}} + x \cdot \frac{\sum_{i=1}^{4} Q_{\Sigma i} \cdot l_i}{U_{\mathrm{n}}} =$$

$$= 0,641 \cdot \frac{4,5}{10} + 0,121 \cdot \frac{1,875}{10} = 0,311\ \mathrm{kV}.$$

Бидејќи е $\Delta U > \Delta U_{\text{дозв.}}$, го усвојуваме следниот поголем пресек $A = 70\ \mathrm{mm}^2$, $\underline{z} = (0,443 + j0,116)\ \Omega/\mathrm{km}$.
Новата проверка дава $\Delta U = 0,221\ \mathrm{kV} < \Delta U_{\text{дозв.}}$.

Пример 1 – константна густина на струјата

$$J_{\text{const.}} = \frac{\sigma \cdot \Delta U_{\text{а.дозв.}}}{\sqrt{3} \cdot \sum\limits_{i=1}^{4} l_i \cdot \cos\varphi_{\Sigma i}} = \frac{32 \cdot 0,2775}{\sqrt{3} \cdot 2,769} = 1,85\ \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}.$$

$$\cos\varphi_{\Sigma i} = \cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{600}{\sqrt{600^2 + 250^2}} = 0,923;$$

$$\sum_{i=1}^{4} l_i \cdot \cos\varphi_{\Sigma i} = 0,923 \cdot 3 = 2,769\ \text{km}.$$

$$A_1 = \frac{I_{\Sigma 1}}{J_{\text{const.}}} = \frac{150}{1,85} = 81\ \text{mm}^2,$$

$$A_2 = \frac{I_{\Sigma 2}}{J_{\text{const.}}} = \frac{112,5}{1,85} = 69\ \text{mm}^2,$$

$$A_3 = \frac{I_{\Sigma 3}}{J_{\text{const.}}} = \frac{75}{1,85} = 40,5\ \text{mm}^2,$$

$$A_4 = \frac{I_{\Sigma 4}}{J_{\text{const.}}} = \frac{37,5}{1,85} = 20\ \text{mm}^2.$$

Пример 1 – константна густина на струјата

- Прва делница: $A_1 = 95\,\mathrm{mm}^2$; $r_1 = 0,320\,\Omega/\mathrm{km}$; $x_1 = 0,112\,\Omega/\mathrm{km}$.
- Втора делница: $A_2 = 50\,\mathrm{mm}^2$; $r_2 = 0,641\,\Omega/\mathrm{km}$; $x_2 = 0,121\,\Omega/\mathrm{km}$.
- Трета делница: $A_3 = 35\,\mathrm{mm}^2$; $r_3 = 0,866\,\Omega/\mathrm{km}$; $x_3 = 0,126\,\Omega/\mathrm{km}$.
- Четврта делница: $A_4 = 25\,\mathrm{mm}^2$; $r_4 = 1,282\,\Omega/\mathrm{km}$; $x_4 = 0,131\,\Omega/\mathrm{km}$.

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.

Пример 1 – константна густина на струјата

$$\Delta U = \frac{\sum_{i=1}^{4} (P_{\Sigma i} r_i + Q_{\Sigma i} x_i) \cdot l_i}{U_{\mathrm{n}}} = 66 + 92 + 82 + 60 = 300\ \mathrm{V}; \quad (\Delta U\% = 3\%).$$

Значи усвоените пресеци задоволуваат. Но доколку не беше исполнет условот $\Delta U\% \leq 3\%$, тогаш вториот пресек, којшто беше заокружен надолу, ќе го зголемевме на 70 mm^2.

Пример 1 – минимум материјал

$$\frac{A_1^2}{P_{\Sigma 1}} = \frac{A_2^2}{P_{\Sigma 2}} = \cdots = \frac{A_n^2}{P_{\Sigma n}} = k_P = \text{const.}$$

$$A_k = \frac{1000 \cdot \sqrt{P_{\Sigma k}}}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot \Delta U_{\text{а.дозв.}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} l_i \cdot \sqrt{P_{\Sigma i}}; \quad k = 1, 2, \ldots, n.$$

$$\Delta U_{\text{а.дозв.}} = \Delta U_{\text{дозв.}} - \Delta U_{\mathrm{r}} = 0,3 - 0,0225 = 0,2775\,\mathrm{kV},$$

$$\sum_{i=1}^{4n} l_i \cdot \sqrt{P_{\Sigma i}} = 0,75 \cdot \sqrt{2,4} + 0,75 \cdot \sqrt{1,8} + 0.75 \cdot \sqrt{1,2} + 0,75 \cdot \sqrt{0,6} =$$

$$= 4,5\,\mathrm{km} \cdot (\mathrm{MW})^{1/2}.$$

$$k_P = \frac{1000}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot \Delta U_{\text{а.дозв.}}} \sum_{i=1}^{n} l_i \sqrt{P_{\Sigma i}} = \frac{1000}{32 \cdot 10 \cdot 0,2775} \cdot 4,5 = 40,2\,\frac{\mathrm{mm}^2}{\mathrm{MW}^{1/2}}.$$

Пример 1 – минимум материјал

$$A_1 = k_P \cdot \sqrt{P_{\Sigma 1}} = 40,2 \cdot \sqrt{2,4} = 62,3\,\mathrm{mm}^2,$$
$$A_2 = k_P \cdot \sqrt{P_{\Sigma 2}} = 40,2 \cdot \sqrt{1,8} = 53,9\,\mathrm{mm}^2,$$
$$A_3 = k_P \cdot \sqrt{P_{\Sigma 3}} = 40,2 \cdot \sqrt{1,2} = 44,0\,\mathrm{mm}^2,$$
$$A_4 = k_P \cdot \sqrt{P_{\Sigma 4}} = 40,2 \cdot \sqrt{0,6} = 31,1\,\mathrm{mm}^2.$$

– Прва делница: $A_1 = 70\,\mathrm{mm}^2$; $r_1 = 0,443\,\Omega/\mathrm{km}$; $x_1 = 0,116\,\Omega/\mathrm{km}$.

– Втора делница: $A_2 = 50\,\mathrm{mm}^2$; $r_2 = 0,641\,\Omega/\mathrm{km}$; $x_2 = 0,121\,\Omega/\mathrm{km}$.

– Трета делница: $A_3 = 50\,\mathrm{mm}^2$; $r_3 = 0,641\,\Omega/\mathrm{km}$; $x_3 = 0,121\,\Omega/\mathrm{km}$.

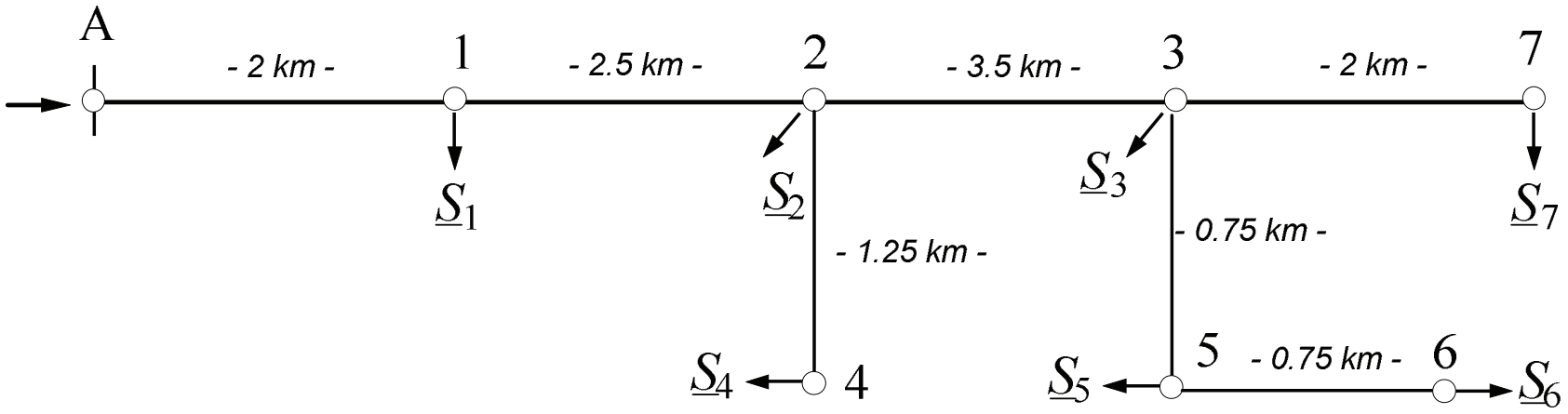
– Четврта делница: $A_4 = 35\,\mathrm{mm}^2$; $r_4 = 0,866\,\Omega/\mathrm{km}$; $x_4 = 0,126\,\Omega/\mathrm{km}$.

$$\Delta U = \frac{\sum_{i=1}^{4} \left(P_{\Sigma i} \cdot r_i + Q_{\Sigma i} \cdot x_i\right) \cdot l_i}{U_\mathrm{n}} = 88 + 93 + 62 + 41 = 284\,\mathrm{V},$$

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_\mathrm{n}} \cdot 100 = 2,84\% < \Delta U_{\text{дозв.}}$$

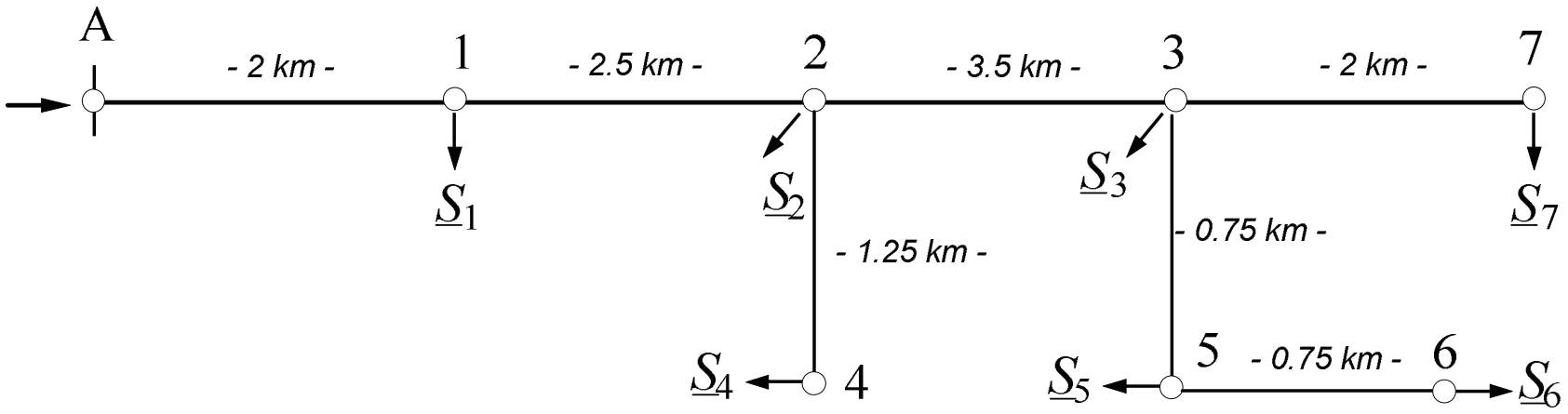
Димензионирање на разгранети дистрибутивни мрежи

Претходните модели за димензионирање на радијалните дистрибутивни мрежи се однесуваа на т.н. „магистрални“ мрежи кај кои потрошувачите се приклучени директно на магистралниот вод, нарекуван уште и *„фидер“*. Но во практиката се среќаваме и со разгранети дистрибутивни мрежи кај кои покрај фидерот постојат и т.н. *„отцепи“*, како што е тоа, на пример, случајот со мрежата прикажана на сликата. Во таквите случаи релациите изложени во точките 7.1, 7.2 и 7.3 не ќе може директно да се применуваат и тогаш се постапува на начин како што е тоа објаснето во следниот пример.



Пример 2

На сликата 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 ($\sigma = 32\ \mathrm{Smm^2/km}$). 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. Да се изврши димензионирање на мрежата според критериумот на константен пресек. Да се користат само пресеците што се дадени во табелата. Дозволената загуба на напон изнесува $\Delta U_{\text{дозв.}} = 5\%$.



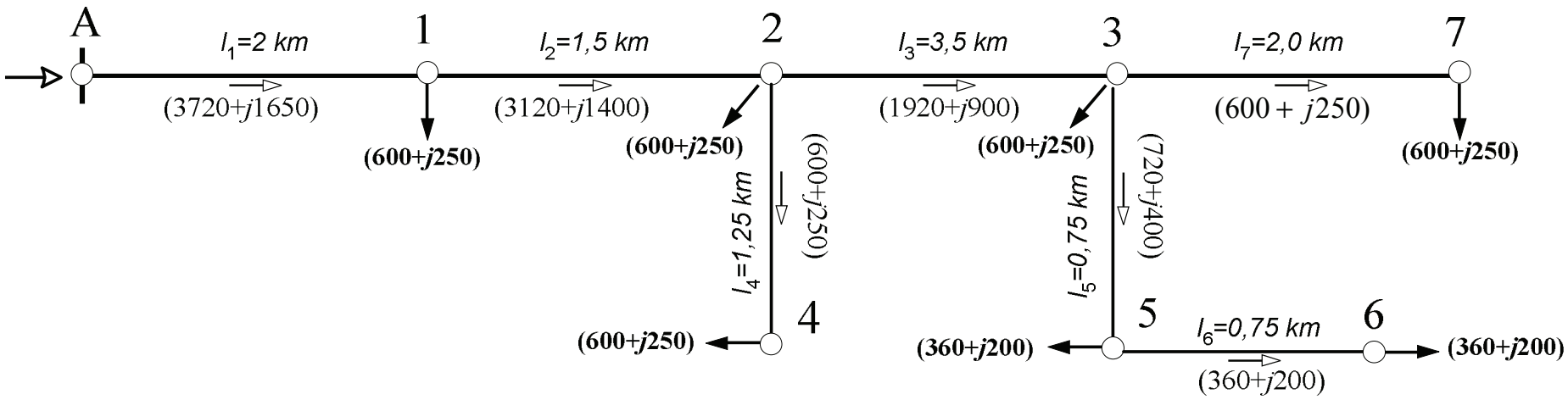
Должините на поедините секции од мрежата, изрзени во (km) се прикажани на самата слика. Моќностите на потрошувачите, изразени во (kVA), се како што следува:

Пример 2

Податоци за параметрите на предвидените кабелски водови тип IPO 13 A

$A\ (\mathrm{mm}^2)$	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
$r\ (\Omega/\mathrm{km})$	2,003	1,282	0,866	0,641	0,443	0,320	0,253	0,206	0,169	0,130
$x\ (\Omega/\mathrm{km})$	0,109	0,103	0,098	0,093	0,088	0,085	0,082	0,080	0,078	0,076
$I_d\ (\mathrm{A})$	69	89	110	130	165	195	225	255	285	325
$S_d\ (\mathrm{kVA})$	1195	1542	1905	2252	2858	3377	3897	4417	4936	5629

Пример 2



Магистралата е низа од гранки што се наоѓа на патеката од А до точката којашто е „електрички“ најоддалечена од „А“. Такви периферни точки во мрежата се 4, 6 и 7. Ако со ω_k го означиме множеството на гранки на патеката помеѓу напојната точка „А“ и крајната точка k, тогаш трите можни магистрали на мрежата се дефинирани со следните низи од гранки

$$\omega_4 = \{1, 2, 4\}; \quad \omega_6 = \{1, 2, 3, 5, 6\}; \quad \omega_7 = \{1, 2, 3, 7\}.$$

Пример 2

Нека сите делници имаат исти параметри $\underline{z} = r + jx$.

$$\Delta U_{\mathrm{A}-k} \approx \mathrm{Re}\left\{\sum_{i\in\omega_k} \frac{\underline{Z}_i \cdot \underline{S}^*_{\Sigma i}}{\underline{U}^*_i}\right\} \approx \mathrm{Re}\left\{\underline{z} \cdot \sum_{i\in\omega_k} \frac{l_i \cdot \underline{S}^*_{\Sigma i}}{\underline{U}^*_i}\right\} \approx \mathrm{Re}\left\{\frac{\underline{z}}{U_{\mathrm{n}}^2} \cdot \sum_{i\in\omega_k} l_i \cdot \underline{S}^*_{\Sigma i}\right\}.$$

каде со ω_k е означено множеството гранки на патеката помеѓу А и k, $\underline{S}_{\Sigma_i}$ е привидната моќност во i-тата гранка.

Јасно е дека напонот ќе биде најмал во онаа точка за која $\mathrm{Re}\left\{\sum_{i\in\omega_k} l_i \cdot \underline{S}^*_{\Sigma i}\right\}$ е најголемо. Кога потрошувачите имаат ист (или приближно ист) $\cos\varphi$ наместо со производите $l_i \cdot \underline{S}^*_{\Sigma i}$ може да се оперира и со производите $l_i \cdot P_{\Sigma i}$.

$$\Sigma_{\omega 4} = P_{\Sigma 1} \cdot l_1 + P_{\Sigma 2} \cdot l_2 + P_{\Sigma 4} \cdot l_4 = 12870\,\mathrm{kW} \cdot \mathrm{km};$$
$$\Sigma_{\omega 6} = P_{\Sigma 1} \cdot l_1 + P_{\Sigma 2} \cdot l_2 + P_{\Sigma 3} \cdot l_3 + P_{\Sigma 5} \cdot l_5 + P_{\Sigma 6} \cdot l_6 = 19650\,\mathrm{kW} \cdot \mathrm{km};$$
$$\Sigma_{\omega 7} = P_{\Sigma 1} \cdot l_1 + P_{\Sigma 2} \cdot l_2 + P_{\Sigma 3} \cdot l_3 + P_{\Sigma 7} \cdot l_7 = 20040\,\mathrm{kW} \cdot \mathrm{km}.$$

Значи магистралата е дефинирана со множеството гранки $\omega_7 = \{1, 2, 3, 7\}$.

Пример 2 – димензионирање на магистралата

Врз основа на податоците од табелата заклучуваме просечно е $x = 0,09\ \Omega/\mathrm{km}$.

$$\Delta U_{\mathrm{r}} = \sum_{i\in\omega_7} \frac{Q_{\Sigma i}\cdot X_i}{U_{\mathrm{n}}} \approx \frac{x}{U_{\mathrm{n}}}\cdot \sum_{i\in\omega_7} Q_{\Sigma i}\cdot l_i =$$

$$= \frac{0,09}{10}\cdot(1650\cdot 2 + 1400\cdot 1,5 + 900\cdot 3,5 + 250\cdot 2,0) =$$

$$= \frac{0,09}{10}\cdot 9050 = 81,5\ \mathrm{V}.$$

$$\Delta U_{\text{дозв.}} = \frac{\Delta U_{\text{дозв.}}\%}{100}\cdot U_{\mathrm{n}} = \frac{5}{100}\cdot 10 = 0,5\ \mathrm{kV} = 500\ \mathrm{V}.$$

$$\Delta U_{\text{а.дозв.}} = \Delta U_{\text{дозв.}} - \Delta U_{\mathrm{r}} = 500 - 81,5 = 418,5\ \mathrm{V} = 0,4185\ \mathrm{kV}.$$

$$A \geq \frac{1000\cdot \sum\limits_{i\in\omega_7} P_{\Sigma i}\cdot l_i}{\sigma\cdot U_{\mathrm{n}}\cdot \Delta U_{\text{а.дозв.}}} = \frac{1000\cdot 20040}{32\cdot 10\cdot 418,5} = 149,6\ \mathrm{mm}^2.$$

Усвојуваме е $A = 150\ \mathrm{mm}^2$, $r = 0,206\ \Omega/\mathrm{km}$, $x = 0,08\ \Omega/\mathrm{km}$.

Пример 2 – димензионирање на магистралата

$$\Delta U = \Delta U_{\mathrm{A}-7} = \frac{r}{U_{\mathrm{n}}} \cdot \sum_{i \in \omega_7} P_{\Sigma i} \cdot l_i + \frac{x}{U_{\mathrm{n}}} \cdot \sum_{i \in \omega_7} Q_{\Sigma i} \cdot l_i =$$

$$= \frac{0,206}{10} \cdot 20040 + \frac{0,08}{10} \cdot 9050 = 485\ \mathrm{V} < 500\ \mathrm{V}.$$

Пример 2 – димензионирање на отцепите

Прво ги пресметуваме загубите на напон ΔU_{A-2} и ΔU_{A-3} до точките 2 и 3 коишто се напојни точки за отцепите (2-4) и (3-5-6).

$$\Delta U_{\mathrm{A}-1} = \Delta U_1 = \frac{P_{\Sigma 1} \cdot r + Q_{\Sigma 1} \cdot x}{U_{\mathrm{n}}} \cdot l_1 = \frac{3720 \cdot 0,206 + 1650 \cdot 0,08}{10} \cdot 2 = 180\ \mathrm{V},$$

$$\Delta U_{1-2} = \Delta U_2 = \frac{P_{\Sigma 2} \cdot r + Q_{\Sigma 2} \cdot x}{U_{\mathrm{n}}} \cdot l_2 = \frac{3120 \cdot 0,206 + 1400 \cdot 0,08}{10} \cdot 1,5 = 113\ \mathrm{V}$$

$$\Delta U_{2-3} = \Delta U_3 = \frac{P_{\Sigma 3} \cdot r + Q_{\Sigma 3} \cdot x}{U_{\mathrm{n}}} \cdot l_3 = \frac{1920 \cdot 0,206 + 900 \cdot 0,08}{10} \cdot 3,5 = 164\ \mathrm{V},$$

$$\Delta U_{\mathrm{A}-2} = \Delta U_{\mathrm{A}-1} + \Delta U_{1-2} = 180 + 113 = 293\ \mathrm{V},$$

$$\Delta U_{\mathrm{A}-3} = \Delta U_{\mathrm{A}-1} + \Delta U_{1-2} + \Delta U_{2-3} = 180 + 113 + 164 = 457\ \mathrm{V}.$$

$$\Delta U_{1.\text{ост.}} = \Delta U_{\text{дозв.}} - \Delta U_{\mathrm{A}-2} = 500 - 293 = 207\ \mathrm{V},$$

$$\Delta U_{2.\text{ост.}} = \Delta U_{\text{дозв.}} - \Delta U_{\mathrm{A}-3} = 500 - 457 = 43\ \mathrm{V}.$$

Пример 2 – отцеп 1

$$\Delta U_{\mathrm{r.1}} = \frac{l_4}{U_{\mathrm{n}}} \cdot Q_{\Sigma 4} \cdot x = \frac{1,25}{10} \cdot 250 \cdot 0,09 = 2,8\ \mathrm{V},$$

$$\Delta U_{\text{1а.дозв.}} = \Delta U_{\text{1.ост}} - \Delta U_{1.\mathrm{r}} = 207 - 2,8 = 204,2\ \mathrm{V},$$

$$A_4 \geq \frac{1000 \cdot P_{\Sigma 4} \cdot l_4}{\sigma \cdot U_{\mathrm{n}} \cdot \Delta U_{\text{1а.дозв.}}} = \frac{1000 \cdot 600 \cdot 1,25}{32 \cdot 10 \cdot 204,2} = 11,5\ \mathrm{mm}^2.$$

Усвојуваме стандарден пресек $A_4 = 16\ \mathrm{mm}^2$ (иако кај 10 kV мрежи не се усвојуваат толку мали пресеци). За овој пресек важи $\underline{z}_4 = (2,003 + j0,109)\ \Omega/\mathrm{km}$.

$$\Delta U_4 = \Delta U_{2-4} = \frac{P_{\Sigma 4} \cdot r_4 + Q_{\Sigma 4} \cdot x_4}{U_{\mathrm{n}}} \cdot l_4 = \frac{600 \cdot 2,003 + 250 \cdot 0,109}{10} \cdot 1,25 =$$

$$= 192\ \mathrm{V} < 204,2\ \mathrm{V}.$$

Пример 2– отцеп 2

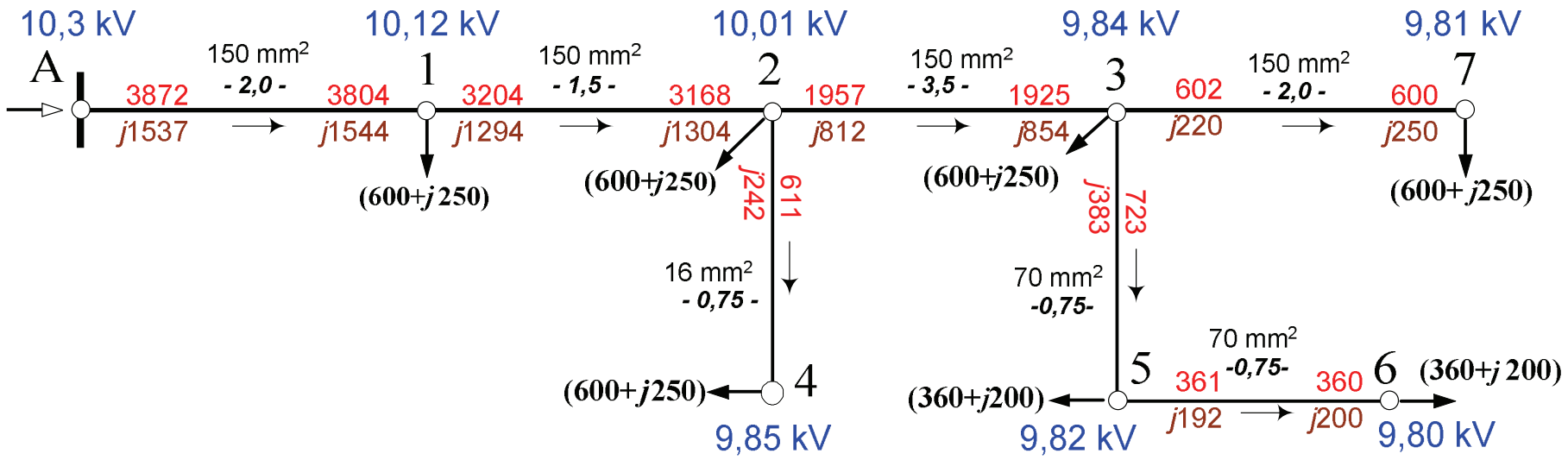
$$\Delta U_{2a.\text{дозв.}} = \Delta U_{2.\text{ост.}} - \Delta U_{2.\mathrm{r}} = 43 - 3,6 = 39,4\ \mathrm{V}$$

$$A_5 = A_6 = 70\ \mathrm{mm}^2; \quad \underline{z}_5 = (0,443 + j0,088)\ \Omega/\mathrm{km}.$$

$$\Delta U_{3-5} = \Delta U_5 = 26,6\ \mathrm{V};$$

$$\Delta U_{5-6} = \Delta U_6 = 13,3\ \mathrm{V};$$

$$\Delta U_{3-6} = \Delta U_{3-5} + \Delta U_{5-6} = 26,6 + 13,3 = 39,9\ \mathrm{V}.$$

Пример 2

Со точни пресметки се гледа дека усвоените пресеци задоволуваат како во поглед на загубата на напон (таа е точно 5%), така и во поглед на дозволените струјни оптоварувања на кабли̇те (исполнет е и термички критериум бидејќи струите/моќностите низ гранките од мрежата се помали од дозволените).