

## VI. ЗАДАЧИ ОД ОБЛАСТА НА КАБЕЛСКИТЕ ВОДОВИ

**Задача 1.** Кабел од типот IPO 13 3x95 6/10 kV е положен во земја. Познати се следните податоци: должина  $l = 5$  km; подолжна импеданција  $\underline{z} = (r+jx) = (0,19+j0,08) \Omega/\text{km}$ ; подолжна капацитивна спроводност  $b = 30 \mu\text{S}/\text{km}$ . Кабелот напојува дистрибутивен конзум кој претставува трифазен симетричен потрошувач со следните карактеристики:  $U_n = 10$  kV;  $P_p = 4$  MW;  $\cos \varphi_p = 0,95$ . Кабелот е положен во номинални услови, на длабочина  $h = 0,7$  m во земја со температура  $\theta = 20^\circ\text{C}$  и специфична топлинска отпорност  $\rho = 100 \text{ K}\cdot\text{cm}/\text{W} = 1 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$ . Потребно е:

- а) да се утврди дали кабелот ќе биде термички преоптоварен;  
 б) колкав ќе биде падот на напон  $\Delta U$  (V) и  $\Delta u\%$  како загубите на активна моќност во преносот  $\Delta P$  (kW) и  $\Delta p\%$ .

### Решение:

Од табела 5.8 на стр 34 ја отчитуваме табличната вредност на трајната дозволена струја на кабелот за номинални услови на полагање:  $I_{dT} = 255$  A. (земја, Cu 95 mm<sup>2</sup>). Според тоа трајно дозволената струја на кабелот за специфицираните (номинални) услови на полагање ќе биде:

$$I_d = f \cdot I_{dT} = 1 \cdot 255 = 255 \text{ A. } (f=1).$$

Понатаму, од табелата 5.1 отчитуваме дека трајно дозволената температура на изолацијата на кабелот изнесува:

$$\theta_{dT} = \theta_{\max} = 65^\circ\text{C}.$$

Значи дозволената надтемпература на кабелот во номинални услови ќе биде:  $\Delta\theta_{dT} = \theta_{dT} - 20 = 45^\circ\text{C}$ .

Под претпоставката дека напонот на потрошувачот  $U_p = U_n = 10$  kV (што во нормални услови на работа е, најчесто, сосема коректно) за струјата на потрошувачот  $I_p$  ќе добиеме:

$$S_p = \sqrt{3} \cdot U_p \cdot I_p = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_p \Rightarrow I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{P_p}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi_p}.$$

$$I_p = \frac{4000}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,95} = 243,1 \text{ A.}$$

Бидејќи трајно дозволената струја на кабелот  $I_d = 255$  A е поголема од струјата на потрошувачот со која што е оптоварен кабелот, т.е.:

$$I_p < I_d,$$

тоа ќе значи дека, од термички аспект, кабелот ќе ги задоволи барањата.

- б) Параметрите на заменската  $\pi$  – шема на кабелот ќе бидат:

$$R = r \cdot l = 0,19 \cdot 5 = 0,95 \Omega; \quad X = x \cdot l = 0,08 \cdot 5 = 0,4 \Omega;$$

$$B = b \cdot l = 30 \cdot 5 = 150 \mu\text{S}; \quad B/2 = 75 \mu\text{S}.$$

Вкупната реактивна (капацитивна) моќност  $Q_C$  што ќе ја генерира кабелот ќе биде:

$$Q_C = B \cdot U_n^2 = b \cdot l \cdot U_n^2 = 30 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10000^2 = 15.000 \text{ var},$$

или:

$$Q_C = 15 \text{ kvar}.$$

На оваа моќност одговара капацитивна струја  $I_C$ :

$$(I_C = \frac{Q_C}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{15}{\sqrt{3} \cdot 10} = 0,87 \text{ A}.$$

Моќноста  $Q_C$  и струјата  $I_C$  се, значи, во споредба со моќноста, односно струјата, на потрошувачот занемарливо мали, па затоа во пресметките тие натаму нема да се земаат предвид.

Бидејќи ни е позната активната моќност  $P_p = 4 \text{ MW}$  на потрошувачот и неговиот фактор на моќност  $\cos \varphi_p = 0,95$ , добиваме:

$$S_p = P_p / \cos \varphi_p = 4000 / 0,95 = 4210,53 \text{ MVA}. \quad \underline{S}_p = (P_p + jQ_p)$$

Реактивната моќност на потрошувачот  $Q_p$  ќе биде:

$$\cos \varphi_p = 0,95; \quad \sin \varphi_p = 0,31225; \quad \operatorname{tg} \varphi_p = 0,32868; \quad Q_p = S_p \cdot \sin \varphi_p = 1315 \text{ kvar}.$$

Падот на напон во кабелот ќе биде:

$$\Delta U = \frac{P_p \cdot R + Q_p \cdot X}{U} \approx \frac{P_p \cdot R + Q_p \cdot X}{U_n};$$

$$\Delta U = \frac{4000 \cdot 0,95 + 1315 \cdot 0,4}{10} = 433 \text{ V} = 0,433 \text{ kV}.$$

$$\Delta u \% = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100 = \frac{0,433}{10} \cdot 100 = 4,33\%.$$

Загубите на моќност во кабелот  $\Delta P$  ќе бидат:

$$\Delta P = 3 \cdot R \cdot I_p^2 = R \cdot \frac{P_p^2 + Q_p^2}{U_n^2};$$

$$\Delta P = R \cdot \frac{S_p^2}{U_n^2} = 0,95 \cdot \frac{4210,53^2}{10^2} = 168\,421 \text{ W} = 168,421 \text{ kW}.$$

или, изразено во %, загубите  $\Delta p\%$  во кабелот ќе бидат:

$$\Delta p \% = \frac{\Delta P}{P_p} \cdot 100 = \frac{168,421}{4 \cdot 10^3} \cdot 100 = 4,2\% \quad (\eta = 95,8\%).$$

**Задача 2.** Да се утврди дали истиот кабел ќе задоволи од термички аспект ако во кабелскиот ров, заедно со него, се постави уште еден таков кабел, на растојание  $\delta = 15 \text{ cm}$  од него.

### Решение:

Сега условите на полагање на кабелот се ненормални, што значи дека ќе треба да се изврши корекција на струјното оптоварување според формулата:

$$I_d = f \cdot I_T; \quad f = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3.$$

Факторите  $f_1$  и  $f_2$  ќе бидат 1 ( $\rho = \rho_n = 100 \text{ K}\cdot\text{cm}/\text{W}$  и  $\theta = 20^\circ\text{C}$ ). Но поради присуството на другиот кабел, факторот  $f_3$  ќе треба да го отчитаме од табелата 5.14 (стр. 37):

$$f_3 = 0,86; \quad f = 1 \cdot 1 \cdot 0,86 = 0,86.$$

$$I_d = f \cdot I_T = 0,86 \cdot 255 = 219 \text{ A}.$$

Бидејќи струјата со која што е оптоварен кабелот (т.е. струјата на потрошувачот) е:

$$I = I_p = 243,1 \text{ A} > I_d = 219 \text{ A},$$

произлегува дека кабелот ќе биде преотварен за околу 11% во однос на дозволената трајна струја  $I_d$ . Тоа ќе се одрази врз неговиот животен век. Еве зошто.

Надтемпературата на кабелот во нормални (номинални) услови треба да биде:

$$\Delta\theta_{дТ} = (\theta_{дТ} - \theta_a) = 65 - 20 = 45^\circ\text{C}.$$

Сега, кога е кабелот преоптоварен за 11%, тогаш неговата надтемпература ќе биде:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{дТ} \cdot (I / I_{дТ})^2 = 45 \cdot 1,11^2 = 55,4^\circ\text{C}.$$

Значи температурата на преоптоварениот кабел ќе биде:  $\theta = \theta_a + \Delta\theta = 20 + 55,4 = 75,4^\circ\text{C}$ . Таа е поголема од дозволената за  $75,4 - 65 = 10,4^\circ\text{C}$ . Значи кабелот забрзано ќе старее.

Подоцна ќе видиме дека во овој случај брзината на стареење ќе биде 3,34 пати поголема од нормалната, т.е. за секој поминат работен час со работната температура од  $75,4^\circ\text{C}$  кабелот ќе остарува за 3,34 часа. На тој начин неговиот животен век ќе се намали за 2÷3 пати.

**Задача 3.** Колкава е трајно дозволената струја  $I_d$  на кабелот разгледуван во претходната задача 2 во зимски услови, кога температурата на земјата изнесува  $\theta = 5^\circ\text{C}$ .

### Решение:

Сега е  $f_1 = 1$ ;  $f_2 = 1$  (табела 5.13 на стр. 37) и  $f_3 = 0,86$ . Значи повторно е  $f = 0,86$ , т.е.:

$$I_d = f I_{дТ} = 0,86 \cdot 255 = 219 \text{ A}.$$

**Задача 4.** Дали истиот кабел од задачата бр. 1, поставен во номинални услови на полагање ( $h = 0,7 \text{ m}$ ,  $\theta = 20^\circ\text{C}$ ,  $\rho = 100 \text{ K}\cdot\text{cm}/\text{W} = 1 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$ ), ќе задоволи од термички аспект ако се работи за напојување на индустриски потрошувач кој преку целиот ден ќе работи со константен товар  $P_p = 3 \text{ MW}$ ,  $\cos \varphi_p = 0,8$ ,  $U_p = U_n = 10 \text{ kV}$ .

### Решение:

Кога кабелот напојува индустриски конзум, тогаш дозволеното струјно оптоварување ќе биде за 25% помало од нормираната вредност  $I_{дТ}$ , отчитана од табелата 5.8 (стр. 34). Сега, значи, ќе имаме:

$$I_d = 0,75 \cdot I_{дТ} = 0,75 \cdot 255 = 191 \text{ A}.$$

Струјата  $I_p$  на потрошувачот во овој случај ќе биде:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{P_p}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi_p} = \frac{3000}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,8} = 216 \text{ A}.$$

Бидејќи  $I_p > I_d$  ( $216 \text{ A} > 191 \text{ A}$ ), значи кабелот ќе биде термички преотоварен.

**Задача 5.** Интересно е да се утврди која е максималната активна моќност на потрошувачот (при ист фактор на моќност  $\cos\varphi_p = 0,8$ ) за која кабелот ќе биде оптоварен точно со трајно дозволената струја за овој случај. [ *Решение:*  $P_p = 2,647 \text{ kW}$  ].

**Задача 6.** Од трансформаторска станица 110/10 kV кон трансформаторска станица 10/0.4 kV положен е кабел од типот IPO13 S 3x120 mm<sup>2</sup> 10 kV на следниов начин:

- 1) кабелот е положен слободно во земја, во постела од ситен песок и е покриен со бетонска плоча. Кабелот напојува индустриска трансформаторска станица 10/0.4 kV, индустриското претпријатие работи во три смени;
- 2) земјиштето во кое се полага кабелот има специфичен топлински отпор од 250 C·cm/W (250 K·cm/W) и температура од 25°C.

Да се определи дозволеното струјно оптоварување на кабелот.

### **Решение:**

Кабелот од типот IPO13 S 3x120 mm<sup>2</sup> 6/10 kV во нормални услови на погон може да се оптоварува со струја  $I_{dT} = 290 \text{ A}$ . (табела 3.8). Бидејќи кабелот е покриен со бетонска плоча тој ќе има влошени услови на одведување на топлината, па струјното оптоварување на кабелот во нормални услови добиено од табела треба да се намали за 10% односно да се корегира со корекционен фактор 0.9;

Поради тоа што кабелот е во погон 24 часа/дневно со константен товар (напојува индустриското претпријатие што работи во три смени) добиеното дозволено струјно оптоварување треба да се намали за 25% односно да се корегира со корекционен фактор 0.75;

Вредноста на специфичниот топлински отпор на земјиштето  $\rho$  и амбиентната температура  $\theta_a$  на земјиштето се разликуваат од таа во нормални услови па поради тоа ќе биде потребно да се изврши дополнителна корекција на дозволеното струјно оптоварување. За таа цел ќе треба да се пресметаат уште и корекционите фактори  $f_1$  и  $f_2$ .

$$f_1 = A \cdot B = 0,69 \cdot 1,04 = 0,712 \text{ (табели 5.11 и 5.12);}$$

$$f_2 = 0,94 \text{ (табела 5.13).}$$

На тој начин за дозволеното струјно оптоварување на овој кабел ќе добиеме:

$$I_d = 0,9 \cdot 0,75 \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot I_{dT} = 0,9 \cdot 0,75 \cdot 0,712 \cdot 0,94 \cdot 290 = 131 \text{ A.}$$

Значи, дури и при оваа намалена струја на оптоварување од 131 A, во наведените влошени услови на трасата кабелот се загрева исто како и при струја  $I = 290 \text{ A}$  и при нормални услови.

**Задача 7.** Од трансформаторска станица 110/10 kV поаѓаат три кабли од типот IPO13 AS 3x240 mm<sup>2</sup> 6/10 kV. Познато е следното:

- 1) каблите се оптоварени со константен товар преку целиот ден (индустриски конзум);
- 2) каблите на еден дел од трасата се положени паралелно, слободно во земја, на меѓусебно растојание од 15 cm. Температурата на земјиштето изнесува 20°C, а специфичниот топлински отпор на земјиштето изнесува 100°C·cm/W;

- 3) на друг дел од трасата каблите се положени на тлото (воздух) со уште два други кабла, така што ги има вкупно 5. Тие меѓусебно се допираат. Температурата на воздухот изнесува  $35^{\circ}\text{C}$ .

Да се определи струјното оптоварување на секој од нив.

### Решение:

Во номинални услови на полагање кабелот од типот IPO13 AS  $3 \times 240 \text{ mm}^2$  10 kV може да се оптовари со струја  $I_{dT} = 325 \text{ A}$  (табела 5.8). Но поради паралелното полагање на каблите (ги има вкупно 3 кабла) ќе треба да се изврши редукација на оптоварувањето со помош на корекциониот фактор  $f_3 = 0,77$  (табела 5.14).

Бидејќи каблите се во погон 24 часа со константен товар, отчитаното струјно оптоварување  $I_{dT}$  треба да се корегира дополнително со корекционен фактор 0,75. На тој начин трајното дозволеното струјно оптоварување на секој кабел во дадениот случај ќе биде:

$$I_d = 0,75 \cdot f_3 \cdot I_{dT} = 0,75 \cdot 0,77 \cdot 325 = 187,7 \text{ A.}$$

Да го определиме сега дозволеното струјно оптоварување на каблите за вториот дел од трасата, каде што се тие положени на тлото (воздух).

За номинални услови на полагање, кабелот тип IPO13 AS  $3 \times 240 \text{ mm}^2$  6/10 kV положен на тлото може да се оптовари со струја  $I_{dT} = 320 \text{ A}$  (табела 5.9). Но поради зголемената температура на воздухот ( $\theta = 35^{\circ}\text{C} > 30^{\circ}\text{C}$ ) мора да се земе во предвид корекциониот фактор  $f_4 = 0,94$  (табела 5.15). Понатаму, поради тоа што се работи за 5 кабла, поставени на тло, и притоа тие меѓусебно се допираат, треба да се изврши дополнителна редукација на оптоварувањето, преку корекциониот фактор  $f_5 = 0,73$  (табела 5.16 а). На тој начин дозволеното струјно оптоварување на кабелот ќе биде:

$$I_d = 0,75 \cdot f_4 \cdot f_5 \cdot I_{dT} = 0,75 \cdot 0,94 \cdot 0,73 \cdot 320 = 165 \text{ A.}$$

При овие влошени услови на ладење секој кабел ќе се загрева исто како и при номинална струја во нормални услови на полагање.

Во дадениот случај положи работни услови на каблите ќе имаме во вториот дел од трасата, кога се тие положени на под. Затоа трајното дозволено струјно оптоварување (ТДСО) на каблите ќе биде дефинирано од условите што владеат на овој дел, т.е. секој кабел ќе има ТДСО:  $I_d = 165 \text{ A}$ .

**Задача 8.** Се посматра кабелот од примерот 5.1 (IPO 13  $3 \times 150$  6/10 kV;  $I_{dT} = 325 \text{ A}$ ;  $\theta_{dT} = 65^{\circ}\text{C}$ ), поставен во номинални услови. Кабелот е номинално оптоварен така што температурата на неговите спроводници е еднаква на максимално дозволената  $65^{\circ}\text{C}$ . Да се утврди:

а) дали кабелот ќе биде термички преоптоварен во режимот на куса врска ако струјата на куса врска што тече во него изнесува  $I_{KV} = 10 \text{ kA}$ , а притоа времето на исклучување на кусата врска изнесува  $t_{isk} = 0,5 \text{ s}$ .

б) колкаво е граничното време на исклучување на кусата врска  $t_{isk, gr} = ?$  за овој кабел, т.е. она времетраење на кусата врска за кое температурата на кабелот ќе ја достигне максимално дозволената  $\theta_{d, max} = 165^{\circ}\text{C}$  (табела 5.1).

б) колкаво ќе биде граничното време на исклучување на кусата врска  $t'_{isk, gr}$  за овој кабел, т.е. ако пред настанувањето на кусата врска кабелот бил неоптоварен и неговата температура изнесувала  $\theta_1 = \theta_a = 20^{\circ}\text{C}$ . (При решавањето на овој дел од задачата да се користат дијаграмите од сл. 5.8, прикажани на страна 47).

### Решение:

а) За номинално оптоварен кабел, за кој температурата на спроводниците пред настанувањето на кусата врска е еднаква на максимално дозволената  $\theta_{dT}$  (во овој случај  $\theta_{dT} = 65^\circ\text{C}$ ), дозволената едносекундна густина на струјата на куса врска ја отчитуваме од табелата 5.19 на страна 45:  $j_{1s} = 122 \text{ A/mm}^2$ . На тој начин, всушност, ја добиваме и вредноста дозволената едносекундна струја на кусата врска  $I_{1s}$ :

$$I_{1s} = j_{1s} \cdot S = 122 \cdot 150 = 18300 \text{ A} = 18,3 \text{ kA}.$$

Во општ случај, кога кусата врска трае  $t_{isk}$  секунди, дозволената густина на струјата на куса врска  $j_{KV}$  ќе биде за  $\sqrt{t_{isk}}$  пати помала во однос на нејзината едносекундна вредност  $j_{1s}$ , затоа што во тој случај топлинскиот импулс  $A = \int i^2 dt$  ќе остане ист на оној што одговара на дозволената едносекундна струја на кусата врска  $I_{1s}$ .

Во конкретниот случај кога времето на исклучување на кусата врска изнесува  $t_{isk} = 0,5 \text{ s}$ , дозволената густина на струјата на куса врска  $j_{0,5s}$  ќе биде:

$$j_{0,5s} = j_{1s} / \sqrt{0,5} = 122 / \sqrt{0,5} = 172 \text{ A/mm}^2,$$

колку што, впрочем, може и да се отчита од истата табела 5.19. Според тоа, вредноста  $I_{KV, doz}$  на струјата на куса врска која за време на кусата врска ќе ја подигне температурата на спроводниците од кабелот на максимално дозволената вредност од  $\theta_{d, max} = 165^\circ\text{C}$  (табела (5.1) ќе изнесува:

$$I_{KV, doz} = I_{0,5s} = j_{0,5s} \cdot S = 172 \cdot 150 = 25800 \text{ A} = 25,8 \text{ kA}.$$

Бидејќи струјата на куса врска што ќе тече низ кабелот во конкретниот случај изнесува  $I_{KV} = 10 \text{ kA} < 25,8 \text{ kA}$ , (значи  $I_{KV} < I_{KV, doz}$ ) кабелот нема термички да се преоптовари за време на кусата врска. Заклучуваме дека, во случајов, времетраењето на кусата врска може да биде и подолго од 0,5 s.

б) Граничното време на исклучување на кусата врска  $t_{isk, gr}$  ќе го добиеме повторно од условот топлинскиот импулс  $A = I_{KV}^2 \cdot t_{isk, gr}$  што ќе се оствари во тој случај да биде еднаков на оној што се остварува за време од 1 s, под дејство на едносекундта струја  $I_{1s}$ , т.е.:

$$I_{KV}^2 \cdot t_{isk, gr} = I_{1s}^2 \cdot 1. \Rightarrow t_{isk, gr} = (I_{1s} / I_{KV})^2 = (18,3/10)^2 = 3,35 \text{ s}.$$

в) Доколку кабелот не бил струјно оптоварен пред настанувањето на кусата врска така што неговата температура била еднаква на амбиентната  $\theta_i = \theta_a = 20^\circ\text{C}$ , дозволената едносекундна густина на струјата ќе биде поголема. Нејзината вредност можеме да ја отчитаме од дијаграмот прикажан на стр 47 (слика 5.8). Од овој дијаграм (за спроводници од бакар), го отчитуваме следното:

$$j_{1s} = 148 \text{ A/mm}^2 \text{ за случајот кога е } \theta_{d, max} = 160^\circ\text{C};$$

$$j_{1s} = 156 \text{ A/mm}^2 \text{ за случајот кога е } \theta_{d, max} = 170^\circ\text{C};$$

Значи, на вредноста  $\theta_{d, max} = 165^\circ\text{C}$  би и одговарала едносекундна густина на струјата:

$$j'_{1s} = 153 \text{ A/mm}^2.$$

Во тој случај едносекундната струја  $I_{1s}$  ќе биде:

$$I'_{1s} = 153 \cdot 150 = 22.950 \text{ A} = 22,95 \text{ kA}.$$

на оваа вредност на дозволената едносекундна струја на кусата врска ќе и одговара поголемо гранично време на исклучување на кусата врска:

$$t'_{isk, gr} = (I'_{1s} / I_{KV})^2 = (22,95/10)^2 = 5,27 \text{ s}.$$

**Задача 9.** Се посматра кабелот од претходниот пример (IPO 13 3x150 6/10 kV;  $I_{dT} = 325 \text{ A}$ ;  $\theta_{dT} = 65^\circ\text{C}$ ;  $\tau = 20 \text{ min}$ ), положен во земја, во номинални услови. Кабелот напојува голем асинхрон мотор кој придвижува голем потрошувач

што работи во интермитиран погон. Притоа што работниот циклус на моторот се состои од период на работа, во траење  $t_k = 5 \text{ min}$  после што следи пауза од најмалку 1 час. Може да се смета дека за време на паузата кабелот успеал целосно да се излади и да ја прими амбиентната температура  $\theta_a = 20^\circ\text{C}$ . Да се пресмета колкав е дозволеният фактор на преоптоварување на кабелот за дадените услови на работа  $c_k = ?$

### Решение:

Дозволеният фактор на преоптоварување на кабелот  $c_k$  претставува однос помеѓу струјата на оптоварување  $I$ , со која работејќи кратковремено, тој ќе ја достигне трајно дозволената температура  $\theta_{dT}$ , и неговата трајно дозволена струја  $I_d$ . Тој зависи само од односот  $t_k/\tau$  на времето на работа (оптоварување) на кабелот  $t_k$  и неговата временска константа на загревање/ладење  $\tau$ . Се пресметува со помош на релацијата (5.25):

$$c_k = \frac{I}{I_d} = \left(1 - e^{-t_k/\tau}\right)^{-1/2}.$$

Во конкретниот случај имаме:  $t_k = 5 \text{ min}$ ;  $\tau = 20 \text{ min}$ ;  $t_k/\tau = 5/20 = 0,25$ ;  $I_d = I_{dT} = 325 \text{ A}$ ;  $c_k = 2,126$ .

Значи, дозволената кратковремена струја на кабелот во интермитирираниот погон изнесува:

$$I = 2,126 \cdot 325 = 542 \text{ A}.$$

**Задача 10.** Се посматра истиот кабел од претходниот пример (IPO 13 3x150 6/10 kV;  $I_{dT} = 325 \text{ A}$ ;  $\theta_{dT} = 65^\circ\text{C}$ ;  $\tau = 20 \text{ min}$ ), поставен во номинални услови. Кабелот напојува голем потрошувач ( $P_p = 7,5 \text{ MW}$ ,  $\cos\varphi_p = 0,8$ ;  $I_p = 542 \text{ A}$ ) којшто работи во интермитиран погон така што после времетраење на работниот циклус  $t_k = 5 \text{ min}$ , за кое време влече константна струја  $I_p = 542 \text{ A}$ , слично како и во претходната задача, прави пауза која што трае најмалку 1 час. За време на паузата кабелот практично целосно успева да се излади и да ја прими амбиентната температура  $\theta_a = 20^\circ\text{C}$ . Да се утврди временскиот тек на загревање и ладење на кабелот за првите 60 минути од работниот циклус, сметајќи го за  $t = 0$  моментот кога се вклучува потрошувачот и кога доаѓа до струјно оптоварување на кабелот. Дали кабелот ќе ја надмине дозволената температура  $\theta_{dT} = 65^\circ\text{C}$  ?

### Решение:

Зависноста на температурата на кабелот од времето, во периодот на загревање на кабелот ( $0 \leq t \leq 5 \text{ min}$ ) ќе ја пресметаме со помош на релацијата (5.13). Притоа почетната температура на кабелот изнесува  $\theta_0 = \theta_a = 20^\circ\text{C}$ , додека стационарната температура  $\theta_\infty$  што би се постигнала после доволно долго време под дејство на струјата на оптоварување на потрошувачот  $I_p = 542 \text{ A}$ , ќе биде:

$$\Delta\theta_\infty = (\theta_\infty - \theta_a) = \Delta\theta_{dT} \cdot (I_p / I_{dT})^2 = 45 \cdot (542/325)^2 = 203,3^\circ\text{C};$$

$$\theta_\infty = \theta_a + \Delta\theta_\infty = 20 + 203,3 = 223,3^\circ\text{C}.$$

Според тоа, изразот за пресметување на зависноста  $\theta(t)$  во интервалот ( $0 \leq t \leq t_k = 5 \text{ min}$ ) ќе гласи:

$$\theta(t) = \theta_a + (\theta_\infty - \theta_a) \cdot (1 - e^{-t/\tau}) + (\theta_0 - \theta_a) \cdot e^{-t/\tau}; \text{ или}$$

$$\theta(t) = 20 + 203,3 \cdot (1 - e^{-t/20}).$$

Во периодот по исклучувањето на потрошувачот ( $t_k < t \leq 60 \text{ min}$ ) ќе имаме ладење на кабелот бидејќи тогаш струјата на оптоварување е  $I_p = 0$ . Поради тоа, стационарната температура  $\theta_\infty$  што одговара на таа струја ќе

биде всушност амбиентната температура, т.е.  $\theta_{\infty} = \theta_a$ . Во тој случај повторно ќе го применуваме изразот (5.13) само што сега ќе отпадне средниот член, па на тој начин зависноста  $\theta(t)$  ќе биде опишана со следната релација:

$$\theta(t) = \theta_a + (\theta_a - \theta_0) \cdot (1 - e^{-(t-t_k)/\tau}) + (\theta_0 - \theta_a) \cdot e^{-(t-t_k)/\tau} = \theta_a + (\theta_0 - \theta_a) \cdot e^{-\frac{t-t_k}{\tau}}.$$

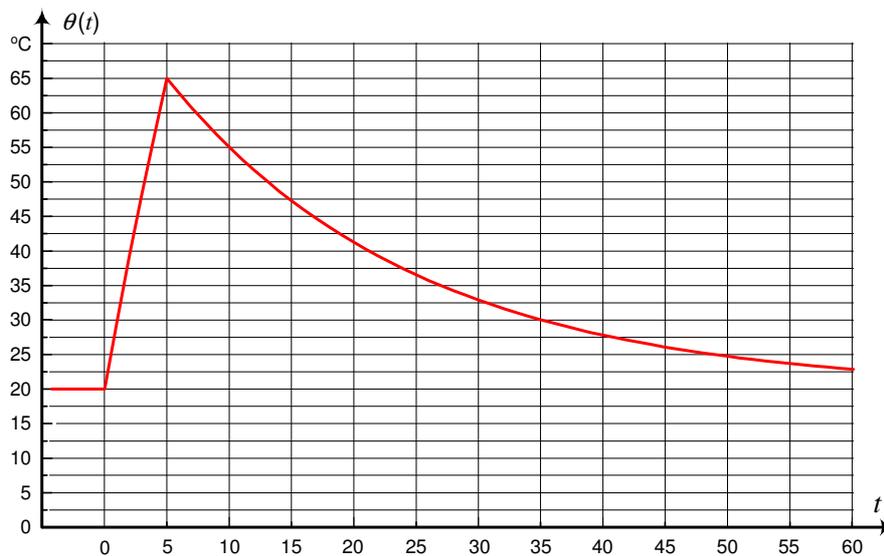
Во последниот израз се води сметка за "поместувањето" на времето, т.е. во изразот (5.13) времето  $t$  се заменува со "поместеното време"  $t' = t - t_k$ , бидејќи овој режим на работа на кабелот, кој претставува процес на ладење, започнува во моментот  $t' = 0$  (или во  $t = t_k$ ), т.е. во однос на почетокот на сметањето на времето ( $t = 0$ ) тој започнува со временско доцнење  $t_k$ .

**Табела 10.1. Табеларен приказ на зависноста  $\theta(t)$**

$t$ (min)	$\theta(t)$ °C										
0	20.0	10	55.0	20	41.3	30	32.9	40	27.8	50	24.5
1	29.9	11	53.3	21	40.2	31	32.3	41	27.4	51	24.3
2	39.4	12	51.7	22	39.2	32	31.7	42	27.1	52	24.1
3	48.3	13	50.2	23	38.3	33	31.1	43	26.7	53	23.9
4	56.9	14	48.7	24	37.4	34	30.6	44	26.4	54	23.7
5	65.0	15	47.3	25	36.6	35	30.0	45	26.1	55	23.5
6	62.8	16	46.0	26	35.7	36	29.6	46	25.8	56	23.3
7	60.7	17	44.7	27	35.0	37	29.1	47	25.5	57	23.2
8	58.7	18	43.5	28	34.2	38	28.6	48	25.2	58	23.0
9	56.8	19	42.3	29	33.6	39	28.2	49	25.0	59	22.9

Треба да се нагласи дека, во последниот израз, со  $\theta_0$  е означена температурата на кабелот на почетокот од новиот процес, во  $t' = 0$ , односно температурата на кабелот што се имала во  $t = t_k = 5$  min. Од табелата 10.1 се гледа дека таа изнесува  $\theta_0 = 65^\circ\text{C}$ .

На тој начин се добива и временскиот тек  $\theta(t)$  за периодот  $t > t_k$ . Резултатите од овие пресметки се прикажани во табелата 10.1, односно на дијаграмот од слика 10.1



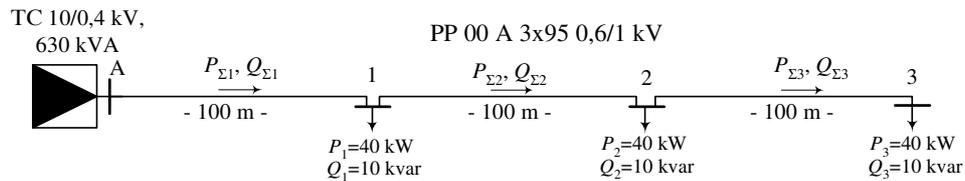
**Слика 10.1. Зависност  $\theta(t)$  на температурата на кабелот од времето**

**Задача 11.** Колкава ќе биде температурата  $\theta_5$  на кабелот во  $t = t_k = 5$  min, т.е. на крајот од работниот циклус, ако во периодите помеѓу работните циклуси кабелот напојува и други потрошувачи, пренесувајќи струја  $I_0 = 120$  A, така

што на почетокот од секој работен циклус температурата на кабелот изнесува  $\theta_0 = 30^\circ\text{C}$ .

**Решение:**  $\theta_5 = \theta(t=5 \text{ min}) = 75^\circ\text{C}$ .

**Задача 12.** Три станбени објекти треба да се напојуваат преку еден четирижилен нисконапонски (НН) кабелски извод од типот РР00 А 4×Х 0,6/1 kV (сл. 12.1). Кабелот ќе биде положен во кабелски ров, директно во земјата, на длабочина  $h = 0,7 \text{ m}$ . Специфичната топлинска отпорност на земјата изнесува  $\rho = 100 \text{ K}\cdot\text{cm}/\text{W}$ . Во зимски услови, кога настапува врвното оптоварување на конзумот, температурата на земјата (амбиентот) изнесува  $\theta_a = 10^\circ\text{C}$ .



Слика 12.1. НН кабелска мрежа (извод) што напојува три потрошувачи

Во режимот на максимално оптоварување (режим кога кабелот струјно е најмногу оптоварен) едновременото врвно оптоварување на секој потрошувач изнесува 40 kW,  $\cos\varphi = 0,97$  ( $\text{tg}\varphi = 0,25$ ), така што сумарното едновремено врвно оптоварување на кабелот изнесува 120 kW;  $\cos\varphi = 0,97$ . Потребно е:

а) да се изврши избор на пресекот на кабелот така што неговото струјно оптоварување ќе биде помало од дозволеното (избор според термичкиот критериум);

б) за така избраниот пресек на кабелот да се изврши проверка дали е задоволен напонскиот критериум  $\Delta U < \Delta U_{\text{доz}}$ , ако дозволената загуба (односно падот) на напонот во мрежата изнесува  $\Delta U_{\text{доz}} = 5\%$ ;

в) за избраниот пресек да се пресмета најголемата струја на трифазна куса врска  $I_{K3} = ?$  за која кабелот сè уште нема да биде термички преоптоварен во режимот на куса врска. Дали избраниот кабел ќе го задоволи овој критериум ако се знае дека струјата на трифазна куса врска што ќе се воспостави во режимот на куса врска изнесува  $I_{K3} = 15 \text{ kA}$ . Познато е дека кабелот се штити од куси врски со уред кој со сигурност ја исклучува кусата врска за време  $t_{\text{иск}} \leq 0,2 \text{ s}$ .

### Решение:

а) Избор на пресек на кабелот според термичкиот критериум

Сумарното оптоварување  $S_{\Sigma 1} = (P_{\Sigma 1} + jQ_{\Sigma 1})$  со кое ќе биде оптоварен кабелот во првата делница (делница А-1) ќе изнесува (приближно со занемарување на загубите на моќност во мрежата):

$$P_{\Sigma 1} = P_1 + P_2 + P_3 = 40 + 40 + 40 = 120 \text{ kW}; \quad Q_{\Sigma 1} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 10 + 10 + 10 = 30 \text{ kvar}.$$

$$S_{\Sigma 1} = \sqrt{P_{\Sigma 1}^2 + Q_{\Sigma 1}^2} = \sqrt{120^2 + 30^2} = 123,7 \text{ kVA};$$

$$I_{\Sigma 1} = S_{\Sigma 1} / (\sqrt{3} \cdot U_n) = 123,7 / (1,732 \cdot 0,4) = 178,6 \text{ A}.$$

Бидејќи се работи за осамен кабел положен на номинална длабочина  $h = 0,7$  m, во земја со  $\rho = \rho_n = 100$  K·cm/Ω, со температура  $\theta_a = 10^\circ\text{C}$  која се разликува од номиналната ( $\theta_a \neq \theta_{aT} = 20^\circ\text{C}$ ), струјното оптоварување на кабелот ќе го добиеме со соодветна корекција. Од табелата 5.13 (прва редица) отчитуваме:  $k = k_2 = 1,1$ .

Сега, од табелата 5.2 на стр. 28 (PVC-кабли, положени во земја), за 4-жилни НН кабли со спроводници од алуминиум, отчитуваме:

$$S = 50 \text{ mm}^2; \quad I_{dT} = 145 \text{ A}; \quad I_d = 1,1 \cdot I_{dT} = 159,5 \text{ A},$$

$$S = 70 \text{ mm}^2; \quad I_{dT} = 175 \text{ A}; \quad I_d = 1,1 \cdot I_{dT} = 192,5 \text{ A},$$

$$S = 95 \text{ mm}^2; \quad I_{dT} = 215 \text{ A}; \quad I_d = 1,1 \cdot I_{dT} = 239,5 \text{ A}.$$

Најмалиот стандарден пресек кој ќе задоволи термички ( $I_p \leq I_d$ ) е пресекот  $70 \text{ mm}^2$ . За него важи:  $I_d = 192,5 \text{ A} > I_p = 178,6 \text{ A}$ . Затоа го усвојуваме овој пресек. Подолжните параметри на овој кабел  $r$  и  $x$  ќе бидат (за НН кабли подолжната реактанса е приближно  $x = 0,08 \text{ } \Omega/\text{km}$ ):

$$r = \frac{1000}{\kappa_{Al} \cdot S} = \frac{1000}{32 \cdot 70} = \frac{31,25}{70} = 0,45 \frac{\Omega}{\text{km}};$$

$$x = 0,08 \frac{\Omega}{\text{km}}; \quad \underline{z} = (r + jx) = (0,45 + j0,08) \frac{\Omega}{\text{km}}.$$

**б) Проверка на падот на напон во мрежата  
(проверка на напонскиот критериум)**

Понатаму, треба да се провери дали за избраниот пресек на кабелот ќе биде задоволен напонскиот критериум, т.е. да се провери дали падот на напон во мрежата  $\Delta U$  до "електрички" најоддалечениот потрошувач (а тоа е крајниот потрошувач бр. 3) не е поголем од дозволиениот пад на напон  $\Delta U_{\text{доz}}$ .

Со примена на I Кирховов закон за струи (моќности) се добиваат приближните вредности  $P_{\Sigma i}$  и  $Q_{\Sigma i}$  ( $i = 1, 2, 3$ ) на активната и реактивната моќност во  $i$ -тата гранка (делница) од мрежата во режимот на максимално оптоварување:

$$1 \text{ делница: } R_1 = r \cdot l_1 = 0,045 \text{ } \Omega; \quad X_1 = x \cdot l_1 = 0,008 \text{ } \Omega; \quad P_{\Sigma 1} = P_1 + P_2 + P_3 = 120 \text{ kW}; \\ Q_{\Sigma 1} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 30 \text{ kvar};$$

$$2 \text{ делница: } R_2 = r \cdot l_2 = 0,045 \text{ } \Omega; \quad X_2 = x \cdot l_2 = 0,008 \text{ } \Omega; \quad P_{\Sigma 2} = P_2 + P_3 = 80 \text{ kW}; \quad Q_{\Sigma 2} = \\ Q_2 + Q_3 = 20 \text{ kvar};$$

$$3 \text{ делница: } R_3 = r \cdot l_3 = 0,045 \text{ } \Omega; \quad X_3 = x \cdot l_3 = 0,008 \text{ } \Omega; \quad P_{\Sigma 3} = P_3 = 40 \text{ kW}; \quad Q_{\Sigma 3} = Q_3 = 10 \text{ kvar};$$

Во задачата бр. 1 видовме дека разликата  $\Delta U$  на модулите на напоните на почетокот и крајот од еден вод можат приближно (но доволно точно) да се пресмета со помош на равенката:

$$\Delta U \approx \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_n}.$$

На тој начин, за секоја од делниците на мрежата од слика 12.1 можеме да пишуваме:

$$\Delta U_1 = U_A - U_1 = \frac{P_{\Sigma 1} R_1 + Q_{\Sigma 1} X_1}{U_n} = \frac{120 \cdot 0,045 + 30 \cdot 0,008}{0,4} = 13,7 \text{ V}; \quad U_1 = U_A - \Delta U_1;$$

$$\Delta U_2 = U_1 - U_2 = \frac{P_{\Sigma 2} R_2 + Q_{\Sigma 2} X_2}{U_n} = 9,13 \text{ V}; \quad U_2 = U_1 - \Delta U_2 = U_A - \Delta U_1 - \Delta U_2;$$

$$\Delta U_3 = U_2 - U_3 = \frac{P_{\Sigma 3} R_3 + Q_{\Sigma 3} X_3}{U_n} = 4,57 \text{ V}; \quad U_3 = U_2 - \Delta U_3 = U_A - \Delta U_1 - \Delta U_2 - \Delta U_3.$$

Падот на напонот во мрежата  $\Delta U$  (кој што се нарекува уште и "загуба на напон") ќе биде:

$$\Delta U = U_A - U_3 = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 = 13,7 + 9,13 + 4,57 = 27,4 \text{ V},$$

или во проценти:

$$\Delta u \% = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100 = \frac{27,4}{400} \cdot 100 = 6,85\%.$$

Бидејќи условот  $\Delta U \leq \Delta U_{доz}$  не е исполнет, усвоениот пресек не задоволува па ќе треба да се усвои поголем пресек. Првиот стандарден поголем пресек е пресекот  $S = 95 \text{ mm}^2$ . За него важи:

$$I_{gr} = 215 \text{ A}; I_d = 239,5 \text{ A}; r = \frac{1000}{\kappa_{Al} \cdot S} = \frac{1000}{32 \cdot 95} = 0,33 \frac{\Omega}{\text{km}};$$

$$x \approx 0,08 \frac{\Omega}{\text{km}}; \underline{z} = (r + jx) = (0,33 + j0,08) \frac{\Omega}{\text{km}}.$$

Не е тешко да се покаже дека за овој пресек се добива:

$$\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 = 10,5 + 7,0 + 3,5 = 20 \text{ V}; (\Delta u \% = 5\%).$$

од каде што произлегува заклучокот дека за овој пресек е задоволен напонскиот критериум.

### *в) Проверка на загревањето на кабелот во режимот на куса врска*

Од табелата 5.19 (стр. 45) за PVC-кабли се отчитува доволената односекундна густина на струјата за режимот на куса врска:

$$j_{1s} = 74,5 \text{ A} \Rightarrow I_{1s} = j_{1s} \cdot S = 74,5 \cdot 95 = 7078 \text{ A} = 7,078 \text{ kA}.$$

Бидејќи струјата на куса врска се исклучува за време  $t_{isk} = 0,2 \text{ s}$ , дозволената  $0,2 \text{ s}$  струја на куса врска  $I_{0,2s}$  ќе ја добиеме тргнувајќи од условот за еднаквост на струјните импулси:

$$I_{1s}^2 \cdot 1 = I_{0,2s}^2 \cdot 0,2 \Rightarrow I_{0,2s} = I_{1s} / \sqrt{0,2} = 2,236 \cdot I_{1s} = 2,236 \cdot 7,078 = 15,83 \text{ kA}.$$

Бидејќи во случајов струјата на куса врска е  $I_{KV} = I_{K3} = 15 \text{ kA} < 15,83 \text{ kA}$ , произлегува дека избраниот пресек за кабелот ќе задоволи од термички аспект и во режимот на куса врска.

## ПРОЦЕНКА НА ТОПЛИНСКАТА ИСТРОШЕНОСТ НА ИЗОЛАЦИЈАТА НА ЕНЕРГЕТСКИТЕ КАБЛИ

За изолираните спроводници и кабли дозволените температури на спроводниците не претставуваат единствен критериум за определувањето на нивната пропусна способност (моќ). За таа цел ќе треба да се земе предвид уште и брзината на стареењето на самата изолација во погонот, која, пак, зависи од термичките напрегања на кои таа ќе биде изложена во текот на својата работа. Со други зборови кажано, треба да се земе предвид и топлинската истрошеност на изолацијата на кабелот.

Рокот на служба (траење) односно животниот век на изолацијата е неопределена величина. Затоа е позгодно да се користиме со поимот *релативна истрошеност* на изолацијата  $\lambda$ , споредувајќи ја нејзината фактичка истрошеност со нормалната истрошеност која што соодветствува на истрошеноста на истата таа изолација што би се остварила кога кабелот е поставен во номинални услови и е оптоварен со својата номинална трајно дозволена струја. Релативната истрошеност на изолацијата на еден кабел ја дефинира всушност брзината на неговото стареење.

Бидејќи при променливиот дијаграм на траење на оптоварување во часовите на малите оптоварувања температурата на спроводниците ќе биде помала од нормалната, тогаш релативната истрошеност во овие часови исто така ќе биде помала од нормалната. Затоа за да се постигне целосно или потполно искористување на изолацијата можно е во часовите на големите оптоварувања кабелот донекаде и да се преоптовари. Вкупната истрошеност при тоа може да остане иста со онаа што би се остварила во номинални услови на работа.

Релативната истрошеност  $\lambda$  на изолацијата е, значи, однос помеѓу вистинскиот животен век што таа ќе го помине со наметнатото темпо на работа во погонот и нејзиниот нормалниот животен век. Таа во најголема мера зависи од работната температура  $\theta$ , т.е. од температура на кабелот со која што тој работи. Поточно кажано, релативната истрошеност  $\lambda$  зависи од разликата помеѓу работната температура  $\theta$  и максималната дозволена температура  $\theta_{dT}$  на самата изолација. Може да се пресмета со помош на следниот израз:

$$\lambda = \exp[a \cdot (\theta - \theta_{dT})] = e^{a \cdot (\theta - \theta_{dT})}.$$

Во последната релација со  $\theta$  е означена работната температура на кабелот, со  $\theta_{dT}$  е означена максималната дозволена температура на самата изолација (табела 5.1) и  $a$  претставува коефициент којшто зависи од типот и класата на изолација.

За изолацијата од импрегнирана хартија може да се применува т.н. "шестостепено правило", кое вели: при зголемување на температурата за  $6^\circ\text{C}$  над дозволената температура на изолацијата, топлинската истрошеност на изолацијата (нејзиното стареење) се забрзува за два пати. Од таму произлегува дека вредноста на овој коефициент изнесува  $a = 0.115$ . За груби пресметки ова правило може да се примени за гумени и други видови изолација.

Позгодно е ако "шестостепеното" правило да се изразува на следниот начин:

$$\lambda = 2^{\frac{\theta - \theta_{dT}}{6}}.$$

На пример за кабел за кој е  $\theta_{dT} = 80^\circ\text{C}$ , кога тој работи со температура  $\theta = 83^\circ\text{C}$ , релативната истрошеност на неговата изолација изнесува:

$$\lambda = 2^{\frac{83-80}{6}} = 2^{0.5} = 1,41.$$

Значи, во периодот кога кабелот ќе работи со оваа температура брзината на неговото стареење ќе биде поголема од нормалната за 41%. Или кажано со други зборови, за секој поминат работен саат со температура  $\theta = 83^\circ\text{C}$  кабелот остарува за 1,41 часови.

$$\lambda_0 = 2^{\frac{(83-80)}{6}} = 2^{1/2} = 1.41$$

Обратно, кога кабелот е подоптоварен, така што неговата работна температура  $\theta$  е помала од трајно дозволената  $\theta_{dT}$ , тогаш брзината на стареење на неговата изолација ќе биде под нормалната и таквиот кабел би требало да има подолг животен век од ист таков кабел кој ќе биде струјно пооптоварен. Така, на пример, за време на периодот од  $\Delta t$  часови кога кабелот работи со температура  $\theta = 77^\circ\text{C}$ , релативната истрошеност  $\lambda$  во тој период ќе биде:

$$\lambda = 2^{\frac{77-80}{6}} = 2^{-0.5} = 0,71.$$

што значи дека за тие  $\Delta t$  часови кабелот ќе остари само  $0,71 \cdot \Delta t$  часови.

Кога кабелот работи со променлив дијаграм на оптоварување кој што може да се подели на определен број  $n$  временски подинтервали:  $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_j, \dots, \Delta t_n$ , тогаш релативната истрошеност на изолацијата што ќе се оствари за време на посматраниот период  $T = \sum \Delta t_i$ , ќе биде:

$$\lambda_{ek} = \frac{\lambda_1 \cdot \Delta t_1 + \lambda_2 \cdot \Delta t_2 + \dots + \lambda_n \cdot \Delta t_n}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \dots + \Delta t_n} = \frac{\sum_j \lambda_j \cdot \Delta t_j}{\sum_j \Delta t_j}. \quad (3)$$

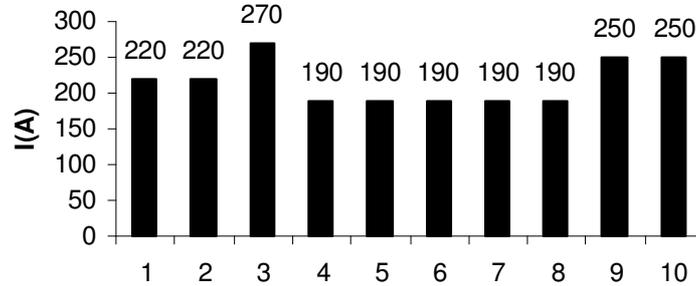
Во последната равенка со  $\lambda_j$  ( $j = 1, n$ ), се означени вредностите на релативните истрошености на изолацијата во одделните временски интервали  $\Delta t_j$ .

Релативната истрошеност  $\lambda_j$  во  $j$ -тиот интервал се добива со помош на релацијата (1) во која фигурира работната температура  $\theta_j$  на тој интервал. Оваа температура се пресметува врз основа на: познатата амбиентна температура  $\theta_a$ , познатата дозволена температура на изолацијата  $\theta_{dT} = \theta_a + \Delta\theta_{dT}$  (табела 5.1), познатата струја  $I_j$  во тој интервал и номиналната трајна дозволена струја на кабелот  $I_{dT}$  (релација 5.9), со помош на следната релација:

$$\theta_j = \theta_a + \Delta\theta_j = \theta_a + \Delta\theta_{dT} \cdot (I_j / I_{dT})^2. \quad (4)$$

Во практиката, при димензионирањето на кабелските мрежи, плоштините на напречните пресеци на спроводниците од каблите обично се избираат само според продолжителното (получасовно) оптоварување, не земајќи ги предвид изразите за топлинска истрошеност на изолацијата. Од тука произлегува дека со таквиот избор на плоштината на напречниот пресек на спроводниците, сумарната топлинска истрошеност на изолацијата на каблите ќе биде  $\lambda_{ek} < 1$ , т.е. стареењето на изолацијата се забавува и каблите најчесто остануваат недоискористени.

**Задача 13.** Да се процени вкупната топлинска истрошеност на изолацијата на кабелот IPO 13 3×95 6/10 kV, во првите 10 часови од денот. Трајната дозволена струја на кабелот изнесува  $I_{dT} = 255$  A (табела 5.8), додека дозволена температура  $\theta_{dT} = 65^\circ\text{C}$ . Кабелот е положен во земја и притоа нејзината температура изнесува  $\theta_a = 15^\circ\text{C}$ . Дијаграмот на траење на оптоварувањето за првите 10 часа е даден на следната слика.



### Решение:

Дозволена надтемпература  $\Delta\theta_{dT}$  на кабелот во номинални услови на работа изнесува:

$$\Delta\theta_{dT} = \theta_{dT} - \theta_a = 65 - 20 = 45^\circ\text{C}.$$

Работните температури  $\theta_j$  ( $j=1, 10$ ) во одделните временски интервали ќе ги пресметаме со помош на релацијата (4). На тој начин добиваме:

$$\theta_1 = \theta_a + \Delta\theta_1 = \theta_a + \Delta\theta_{dT} \cdot (I_1 / I_{dT})^2 = 15 + 45 \cdot (220 / 255)^2 = 48,5^\circ\text{C}; \quad \theta_2 = \theta_1 = 48,5^\circ\text{C}.$$

Понатаму, за третиот час ( $j=3$ ) се добива:

$$\theta_3 = \theta_a + \Delta\theta_3 = \theta_a + \Delta\theta_{dT} \cdot (I_3 / I_{dT})^2 = 15 + 45 \cdot (270 / 255)^2 = 65,5^\circ\text{C}.$$

Слично, за останатите делови од денот добиваме:

$$\theta_4 = \theta_5 = \dots = \theta_8 = \theta_a + \Delta\theta_4 = \theta_a + \Delta\theta_{dT} \cdot (I_4 / I_{dT})^2 = 15 + 45 \cdot (190 / 255)^2 = 40,0^\circ\text{C}.$$

$$\theta_9 = \theta_{10} = \theta_a + \Delta\theta_9 = \theta_a + \Delta\theta_{dT} \cdot (I_9 / I_{dT})^2 = 15 + 45 \cdot (250 / 255)^2 = 58,3^\circ\text{C}.$$

Топлинската истрошеност  $\lambda_j$  во  $j$ -тиот час ( $j = 1, 10$ ) сега ќе ја пресметаме со помош на изразот (2). На тој начин се добива:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = 2^{\frac{48,5-65}{6}} = 0,149; \quad \lambda_3 = 2^{\frac{65,5-65}{6}} = 1,059;$$

$$\lambda_4 = \dots = \lambda_8 = 2^{\frac{40-65}{6}} = 0,056; \quad \lambda_9 = \lambda_{10} = 2^{\frac{58,3-65}{6}} = 0,461.$$

И конечно, со помош на изразот (3) ќе ја добиеме сумарната (еквивалентната) релативна истрошеност на кабелот  $\lambda_{ek,10}$  за првите 10 часови од денот:

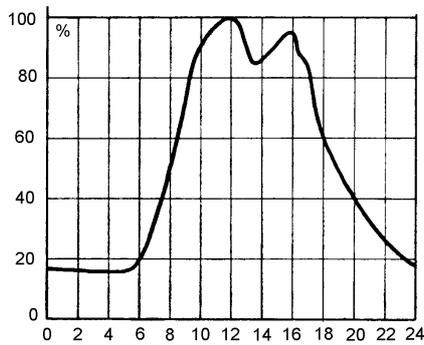
$$\lambda_{ek,10} = \frac{2 \cdot \lambda_1 + \lambda_3 + 5 \cdot \lambda_8 + 2 \cdot \lambda_9}{10} = \frac{2 \cdot 0,149 + 1,059 + 5 \cdot 0,056 + 2 \cdot 0,461}{10} = 0,256.$$

Од овде може да се заклучи дека при ваков дијаграм на траење на оптоварувањето топлинската истрошеност на изолацијата ќе биде значително пониска од нормалната и покрај тоа што во третиот час од денот кабелот бил струјно преоптоварен со струја 270 A, која е за 8,63% поголема од неговата трајна дозволена струја.

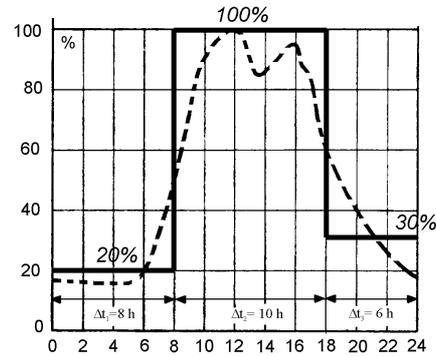
**Задача 14.** Колкава ќе биде релативната истрошеност на кабелот за првите 10 часа од денот  $\lambda'_{ek} = ?$  во летни услови кога температурата на амбиентот изнесува  $\theta_a = 25^\circ\text{C}$  ?

**(Решение:**  $\lambda'_{ek,10} = 0,813$ . Значи брзината на стареење на кабелот во летните месеци ќе биде за 3,175 пати поголема од брзината на стареење зиме).

**Задача 15.** Да се направи проценка на релативната истрошеност на кабелот од задачата 12 во текот на еден ден. Дневниот дијаграм на оптоварувањето на овој кабел по својот облик се совпаѓа со обликот на типичниот дијаграм на оптоварување за градските подрачја, прикажан на сликата 15.1. Тој може да се апроксимира со кривата од слика 15.2, прикажана со искршена полна линија.



Слика 15.1.



Слика 15.2.

### Решение:

За предметниот кабел (PP00 A 4x95 0,6/1 kV) ќе имаме (види задача 12):

$$I_{dT} = 215 \text{ A}; I_d = 1,1 \cdot I_{dT} = 239,5 \text{ A}; \theta_{dT} = 70^\circ\text{C}; \theta_{aT} = 20^\circ\text{C};$$

$$\theta_a = 10^\circ\text{C}; I_p = I_{\Sigma 1} = 178,6 \text{ A}.$$

Според изложеното, дневниот дијаграм на оптоварување можеме да го поделиме на три временски интервали:

- 1) од 0<sup>01</sup> до 8<sup>00</sup> h; 2) од 8<sup>01</sup> до 18<sup>00</sup> h и 3) од 18<sup>01</sup> до 24<sup>00</sup> h.

Значи имаме:

$$1) \Delta t_1 = 8 \text{ h}; I_1 = 0,2 \cdot I_p = 35,7 \text{ A};$$

$$\theta_1 = \theta_a + \Delta\theta_1 = \theta_a + (\theta_{dT} - \theta_{aT}) \cdot (I_1 / I_{dT})^2 = 10 + 1,4 = 11,4^\circ\text{C};$$

$$2) \Delta t_2 = 10 \text{ h}; I_2 = 1,0 \cdot I_p = 178,6 \text{ A};$$

$$\theta_2 = \theta_a + \Delta\theta_2 = \theta_a + (\theta_{dT} - \theta_{aT}) \cdot (I_2 / I_{dT})^2 = 10 + 34,5 = 44,5^\circ\text{C};$$

$$3) \Delta t_3 = 6 \text{ h}; I_3 = 0,3 \cdot I_p = 53,6 \text{ A};$$

$$\theta_3 = \theta_a + \Delta\theta_3 = \theta_a + (\theta_{dT} - \theta_{aT}) \cdot (I_3 / I_{dT})^2 = 10 + 3,1 = 13,1^\circ\text{C}.$$

Понатаму, за брзината на стареење на кабелот во одделните временски интервали ќе добиеме:

$$\lambda_1 = 2^{\frac{\theta_1 - \theta_{dT}}{6}} = 2^{\frac{11,4 - 70}{6}} = 0,004; \lambda_2 = 2^{\frac{\theta_2 - \theta_{dT}}{6}} = 2^{\frac{44,5 - 70}{6}} = 0,0526; \quad \text{и}$$

$$\lambda_3 = 2^{\frac{\theta_3 - \theta_{dT}}{6}} = 2^{\frac{13,1 - 70}{6}} = 0,0014.$$

$$\lambda_{ek} = \frac{\lambda_1 \cdot \Delta t_1 + \lambda_2 \cdot \Delta t_2 + \lambda_3 \cdot \Delta t_3}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3} = \frac{0,004 \cdot 8 + 0,0526 \cdot 10 + 0,0014 \cdot 6}{8 + 10 + 6} = 0,0236.$$

Бидејќи е  $\lambda_{ek} \ll 1$ , следува дека кабелот нема воопшто да биде термички искористен.

**Задача 16.** Со кое струјно оптоварување  $I_{\max}$  смееме во режимот на максималното оптоварување да го оптовариме кабелот од задачата 15 ако сакаме да постигнеме неговата целосна топлинска искористеност, т.е. неговата еквивалентна топлинска истрошеност во текот на еден ден да биде  $\lambda_{ek} = 1$ .

**Решение:**

Од претходниот пример може да се види дека старењето на каблите главно се одвива во периодот на големите оптоварувања. Во конкретниот случај тоа е периодот од 8 до 18 часот кој трае 10 часови и на тој период отпаѓа околу 93% од дневната истрошеност на кабелот, додека во преостанатите 14 часа од денот старењето на кабелот изнесува само 7% од вкупното дневно старење. Тоа ни овозможува задачата да ја решиме упростоено на тој начин што ќе сметаме дека практично целото дневно старење на кабелот се остварува во периодот на големите оптоварувања, т.е.:

$$\lambda_{ek} = \frac{\lambda_1 \cdot \Delta t_1 + \lambda_2 \cdot \Delta t_2 + \lambda_3 \cdot \Delta t_3}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3} \approx \frac{\lambda_2 \cdot \Delta t_2}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3} = \frac{\lambda_2 \cdot 10}{24}.$$

Понатаму, тргнувајќи од условот  $\lambda_{ek} = 1$ , се добива:

$$\lambda_2 = 2,4 \cdot \lambda_{ek} = 2,4.$$

Од друга страна имаме:

$$\lambda_2 = 2^{\frac{\theta_2 - \theta_{dT}}{6}} \approx 2,4; \quad \Rightarrow \quad \frac{\theta_2 - \theta_{dT}}{6} \cdot \ln 2 = \ln 2,4,$$

од каде што најнапред се пресметува температурата  $\theta_2$  што ќе се има во текот на вториот интервал, т.е. во режимот на максималното оптоварување:

$$\theta_2 = \theta_{dT} + 6 \cdot \frac{\ln 2,4}{\ln 2} = 70 + 6 \cdot \frac{\ln 2,4}{\ln 2} = 77,6^\circ\text{C}.$$

а потоа се пресметува и бараната струја  $I_{\max}$  што ќе ја развие оваа температура на кабелот:

$$\theta_2 = \theta_a + (\theta_{dT} - \theta_{aT}) \cdot \left( \frac{I_{\max}}{I_{dT}} \right)^2 \Rightarrow \left( \frac{I_{\max}}{I_{dT}} \right)^2 = \frac{\theta_2 - \theta_a}{\theta_{dT} - \theta_{aT}} = \frac{77,6 - 10}{70 - 20} = 1,352;$$

$$I_{\max} = I_{dT} \cdot \sqrt{1,352} = 215 \cdot 1,163 = 250 \text{ A}.$$

**Задача 17.** После колку години  $n = ?$  работа на мрежата од сликата 12.1, оптоварувањето на кабелот ќе ја достигне вредноста  $I_{\max} = 250 \text{ A}$ , кога тој ќе биде целосно термички искористен, ако се претпостави дека почнувајќи од моќноста  $P_\Sigma = 120 \text{ kW}$ ,  $\cos \varphi = 0,97$ , оптоварувањето на кабелскиот извод расте од година во година по експоненцијален закон со константна стапка на пораст од  $p\% = 3\%$  годишно (колу што е типично за наши услови).

**Решение:** После  $n = 11,38$  години, или приближно после  $n \approx 11$  год.

**Задача 18.** Кабелот од задачата бр. 1 (IPO 13 3x95 6/10 kV;  $I_{dT} = 255$  A;  $\theta_{dT} = 65^\circ\text{C}$ ) е положен во земја, во номинални услови ( $\theta_a = 20^\circ\text{C}$ ;  $I_d = I_{dT} = 255$  A). Тој напојува индустриски потрошувач којшто работи во интермитентен цикличен режим, така што во периодот на работење, кој што трае  $t_r = 15$  min, презема моќност  $P_p = 4,16$  MW;  $\cos\varphi_p = 0,8$ , после кое следува пауза во времетраење  $t_p = 30$  min.

Да се пресмета интервалот ( $\theta_{\min}$ ,  $\theta_{\max}$ ) во кој ќе варира температурата на кабелот во текот на неговата работа.

**Решение:**

Струјното оптоварување на кабелот во периодот на работа  $t_r$  ќе биде:

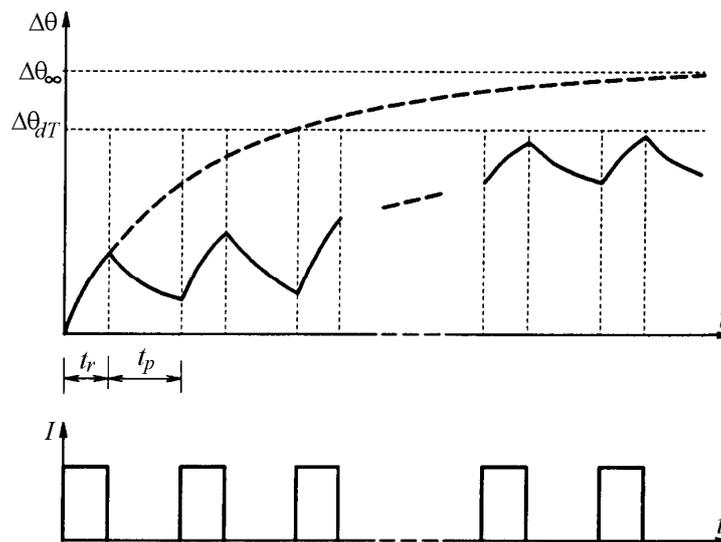
$$I_p = \frac{P_p}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos\varphi_p} = \frac{4,16 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,8} = 0,3 \text{ kA} = 300 \text{ A}.$$

Бидејќи е  $I = I_p > I_{dT}$ , на прв поглед се чини дека кабелот ќе биде преоптоварен. Но пресметките ќе покажат дека иако кабелот е во извесен период од работниот циклус "струјно преоптоварен" тој сепак нема воопшто да ја ја достигне својата максимална дозволена температура  $\theta_{dT} = 65^\circ\text{C}$ , што значи дека тој нема термички да биде термички преоптоварен.

Ако со  $\theta_\infty$  ја означиме стационарната температура, а со  $\Delta\theta_\infty$  ја означиме трајната надтемпература на кабелот што ќе би се постигнала во стационарен режим при струјно оптоварување на кабелот  $I = I_p = 300$  A, тогаш ќе имаме:

$$\Delta\theta_\infty = (\theta_{dT} - \theta_a) \cdot \left(\frac{I_p}{I_{dT}}\right)^2 = (65 - 20) \cdot \left(\frac{300}{255}\right)^2 = 62,3^\circ\text{C};$$

$$\theta_\infty = \theta_a + \Delta\theta_\infty = 20 + 62,3 = 82,3^\circ\text{C}.$$



**Слика 18.1. Временски тек на температурата на кабелот кај интермитентен цикличен режим**

Но бидејќи кабелот ќе работи во интермитентен режим, тој нема да ја достигне таа температура, туку негоја друга, помала од неа, која ќе ја означиме со  $\theta_{\max}$  (слика 18.1).

Слично на тоа, на крајот од периодот со пауза, температурата на кабелот ќе биде најмала и ќе достигне некоја вредност што ќе ја означиме со  $\theta_{\min}$ . Ако со  $\Delta\theta_{\max} = \theta_{\max} - \theta_a$  и  $\Delta\theta_{\min} = \theta_{\min} - \theta_a$  ги означиме соодветните надтемператури на кабелот, тогаш за нив ќе важи:

$$\Delta\theta_{\max} = \Delta\theta_{\infty} \cdot (1 - e^{-t_r/\tau}) + \Delta\theta_{\min} \cdot e^{-t_r/\tau} \text{ и}$$

$$\Delta\theta_{\min} = \Delta\theta_{\max} \cdot e^{-t_p/\tau}.$$

Со елиминација на непознатата  $\Delta\theta_{\min}$ , се добива:

$$\Delta\theta_{\max} = \Delta\theta_{\infty} \cdot \frac{1 - e^{-t_r/\tau}}{1 - e^{-(t_r+t_p)/\tau}}.$$

Со замена на конкретните вредности се добива:

$$t_r = 15 \text{ min}; t_p = 30 \text{ min}; \tau = 20 \text{ min}; \theta_a = 20^\circ\text{C};$$

$$\Delta\theta_{\max} = 62,3 \cdot \frac{1 - e^{-15/20}}{1 - e^{-45/20}} = 62,3 \cdot 0,59 = 36,8^\circ\text{C}; \theta_{\max} = \theta_a + \Delta\theta_{\max} = 56,8^\circ\text{C}.$$

$$\Delta\theta_{\min} = 36,8 \cdot e^{-30/20} = 8,2^\circ\text{C}; \theta_{\min} = \theta_a + \Delta\theta_{\min} = 28,2^\circ\text{C}.$$

Значи температурата на кабелот ќе варира во границите:  $28,2^\circ\text{C} \leq \theta \leq 56,8^\circ\text{C}$ .

Може да се заклучи дека иако оптоварувањето на кабелот  $I_p$  е поголемо од неговото ТДСО  $I_{dT}$  ( $300 \text{ A} > 255 \text{ A}$ ), поради интермитентниот карактер на погонот нема да дојде до прегревање на кабелот ниту, пак, до негово забрзано стареење.

**Задача 19.** Колкава треба да биде струјата на оптоварување на кабелот  $I = I_p = ?$  за време на работниот дел од циклусот за да биде максималната температура на кабелот еднаква на дозволената:  $\theta_{\max} = \theta_{dT} = 65^\circ\text{C} ?$

### Решение:

Од примерот разгледуван во претходната задача се заклучува дека во интермитентните режими на работа е можно кабелот да остане недооптоварен дури и тогаш кога неговото оптоварување е поголемо од ТДСО  $I_d$ , бидејќи заради интерминентниот карактер на струјата не се постигнува трајната дозволена температура на кабелот  $\theta_{dT}$ . За да се постигне добро термичко искористување на каблите пожелно е максималната температура на кабелот  $\theta_{\max}$  да биде еднаква на неговата трајно дозволена температура  $\theta_{dT}$ , т.е. да биде исполнет условот:

$$\Delta\theta_{\max} = \Delta\theta_{dT}.$$

Лесно може да се докаже дека горниот услов ќе биде исполнет ако односот  $c_i = (I/I_{dT})$ , кој што се нарекува *коэффициент на преоптоварување во интермитентен режим*, е еднаков на:

$$c_i = \frac{I}{I_{dT}} = \frac{\Delta\theta_{\infty}}{\Delta\theta_{dT}} = \sqrt{\frac{1 - e^{-(t_r+t_p)/\tau}}{1 - e^{-t_r/\tau}}} = \sqrt{\frac{1 - e^{-t_c/\tau}}{1 - e^{-\varepsilon t_c/\tau}}}.$$

Во последната релација со  $t_c$  е означена должината на циклусот на интермитентниот режим на работа, т.е.:

$$t_c = t_r + t_p,$$

додека со  $\varepsilon$  е означен односот на времињата  $t_r$  и  $t_c$ , т.е.:

$$\varepsilon = \frac{t_r}{t_c} = \frac{t_r}{t_r + t_p},$$

кој се нарекува *релативно траење на оптоварувањето*.

Во случаите кога се работи за мали времиња на работа  $t_r$ , релативното траење на оптоварувањето  $\varepsilon \rightarrow 0$ , па во тој случај коефициентот на преоптоварување  $c_i$  може приближно да се пресмета со помош на изразот:

$$c_i \approx \sqrt{\frac{t_c}{t_r}} \approx \sqrt{\frac{1}{\varepsilon}}.$$

Во конкретниот случај ќе имаме:

$$I_{dT} = 255 \text{ A}; \quad \tau = 20 \text{ min}; \quad t_r = 15 \text{ min}; \quad t_p = 30 \text{ min}; \quad t_c = 45 \text{ min};$$

$$\varepsilon = 15/45 = 0,333;$$

$$c_i = \sqrt{\frac{1 - e^{-t_c/\tau}}{1 - e^{-\varepsilon t_c/\tau}}} = \sqrt{\frac{1 - e^{-45/20}}{1 - e^{-15/20}}} = 1,302;$$

$$\Rightarrow I_{\max} = c_i \cdot I_{dT} = 1,302 \cdot 255 = 332 \text{ A}.$$

Значи дури при струја на оптоварување од 332 А, која што е за 30% поголема од трајно дозволената струја на кабелот, ќе се постигне неговото целосно термичко искористување.

## ИСПИТНИ ЗАДАЧИ ОД ОБЛАСТА НА КАБЕЛСКИ ВОДОВИ

**Задача П1:** (II Колоквиум 1992). Трижилен појасен кабел тип IPO 13 A 3x150 6/10 kV треба да напојува трифазен потрошувач со моќност  $P=2,5$  MW и  $\cos\varphi=0,8$  при напон  $U=10$  kV. Кабелот е положен на сид, заедно со уште два трижилни кабла, при што каблите се допираат меѓусебно, а го допираат и самиот сид, како што е тоа прикажано на сликата.

Да се утврди колкаво е дозволеното трајно струјно оптоварување на кабелот и дали потрошувачот ќе предизвика негово термичко преоптоварување. Температурата на амбиентот (воздухот) во кој се наоѓаат каблите изнесува  $\theta=25^\circ\text{C}$ .

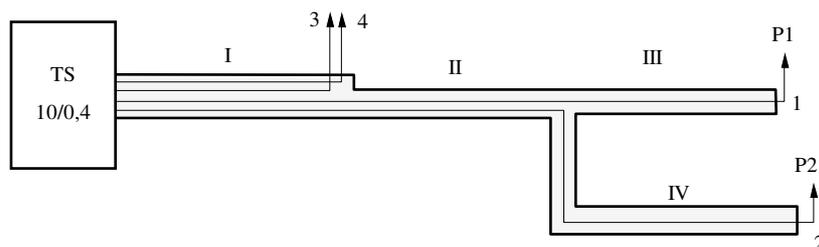
**Задача П2:** (II Колоквиум 1993). Трижилен појасен кабел тип IPO 13 A 3x150 6/10 kV треба да напојува трифазен потрошувач со моќност  $P = 2,5$  MW и  $\cos\varphi = 0,8$  при напон  $U = U_n = 10$  kV. Кабелот е положен на сид, заедно со уште други два трижилни кабла, при што каблите се допираат меѓусебно, а го допираат и самиот сид, како што е тоа прикажано на сликата.

Да се утврди колкаво е дозволеното трајно струјно оптоварување на кабелот и дали потрошувачот ќе предизвика негово термичко преоптоварување. Температурата на амбиентот (воздухот) во кој се наоѓаат каблите изнесува  $\theta = 25^\circ\text{C}$ .



**Задача П3.** (II Колоквиум, 1999-решена). Од една трафостаница 10/0,4 kV/kV излегуваат 4 НН кабла од типот PP00 A 4x95 0,6/1 kV. (сл. 1). Каблите се нумерирани со броевите 1, 2, 3 и 4, како на сликата. Во делницата I сите 4 кабла се положени во заеднички ров така што се допираат. Во делницата II каблите бр. 1 и 2 продолжуваат во заеднички ров, но сега тие се поставени на меѓусебно растојание  $d_m = 7$  cm. Во делницата III кабелот бр. 1 се води осамено во еден кабелски канал, положен на дното на доволна оддалеченост од неговите сидови. Кабелот бр. 2, пак, продолжува кон потрошувачот P2 и се води на вертикален сид, заедно со уште 5 други кабла, така што каблите го допираат сидот, но се допираат и меѓусебе. Останатите податоци за трасите на каблите се дадени во долната табела. Да се пресмета дозволеното струјно оптоварување на каблите бр. 1 и 2.

Делница I	Делница II	Делница III	Делница IV
во земја	во земја	во кабелски канал	на сид, со други кабла
кабли бр. 1, 2, 3 и 4	кабли бр. 1 и 2	кабел бр. 1	кабел бр. 2 + 5 други
$\rho=100$ K-cm/W	$\rho=300$ K-cm/W	темп. на возд. $\theta = 20^\circ\text{C}$	темп. на возд. $\theta = 30^\circ\text{C}$
$\theta = 10^\circ\text{C}$	$\theta = 10^\circ\text{C}$	/	/



Слика 1

**Решение:** PP00 A 4x95 0,6/1 kV:  $I_d = 215$  A

I делница:  $f = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3$ ;  $f_1 = A \cdot B = 1 \cdot 1 = 1$ ;  $f_2 = 1,1$  ( $\theta = 10^\circ\text{C}$ );  $f_3 = 0,63$  (4 кабли, допир);  $f_1 = 1 \cdot 1,1 \cdot 0,63 = 0,693$ ;  $I_{d,I} = 0,693 \cdot 215 = 149$  A.

II делница:  $f = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3$ ;  $f_1 = A \cdot B = 0,64 \cdot 1 = 0,64$ ;  $f_2 = 1,1$  ( $\theta = 10^\circ\text{C}$ );  $f_3 = 0,85$  (2 кабли,  $d_m = 7$  cm);  
 $f_{II} = 0,64 \cdot 1,1 \cdot 0,85 = 0,5984$ ;  $I_{d,II} = 0,5984 \cdot 215 = 129$  A.

III делница:  $f = f_4 \cdot f_5$ ;  $f_4 = 1,12$  ( $\theta = 20^\circ\text{C}$ );  $f_5 = 0,95$ ;  $f_{III} = 1,12 \cdot 0,95 = 1,064$ ;  $I_{d,III} = 1,064 \cdot 215 = 229$  A.

IV делница:  $f = f_4 \cdot f_5$ ;  $f_4 = 1$  ( $\theta = 30^\circ\text{C}$ );  $f_5 = 0,68$  (6 кабли на сид);  $f_{IV} = 1 \cdot 0,68 = 0,68$ ;  $I_{d,IV} = 0,68 \cdot 215 = 164$  A.

Според тоа и двата кабла, бр. 1 и бр. 2, ќе имаат исто дозволено струјно оптоварување, еднакво на најмалото  $I_{d,II}$ :  $I_{d1} = I_{d2} = I_{d,II} = 129$  A.

**Задача I4. (II Колоквиум, 1999-решена).** Четирижилен нисконапонски кабел тип PP00 A 4x95 0,6/1 kV, чија временска константа на загревање изнесува  $\tau = 15$  min. е закопан во земја на длабочина 70 cm. Температурата на тлото (амбиентот) изнесува  $\theta_a = 10^\circ\text{C}$  а кабелот е долго време оптоварен со струја  $I = 120$  A така што може да се смета дека неговата температура е стационарирана. Потребно е да се пресмета:

а) колкава е таа температура  $\theta = ?$

б) Кабелот долго време не бил воопшто оптоварен и неговата почетна температура е еднаква на амбиентната,  $\theta_0 = \theta_a = 10^\circ\text{C}$ . За колку време температурата на кабелот ќе ја достигне својата максимално дозволена вредност ако кабелот наеднаш го оптовариме со струја  $I = 400$  A.

### Решение:

PP00 A 4x95 0,6/1 kV:  $I_{dT} = 215$  A  $\theta_{dT} = 70^\circ\text{C}$ ;  $\tau = 15$  min.  $\theta_a = 10^\circ\text{C}$   $\theta_0 = 10^\circ\text{C}$ .

а)  $\Delta\theta_{dT} = \theta_{dT} - 20 = 70 - 20 = 50^\circ\text{C}$ ;

$$I = 120 \text{ A}; \Delta\theta_{\infty} = \Delta\theta_{dT} \cdot (I / I_{dT})^2 = 50 \cdot (120 / 215)^2 = 15,6^\circ\text{C};$$

$$\theta_{\infty} = \theta_a + \Delta\theta_{\infty} = 10 + 15,6 = 25,6^\circ\text{C}.$$

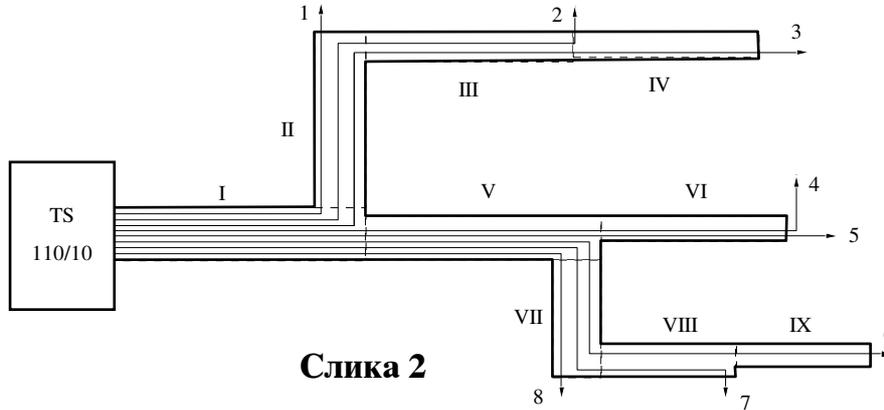
б)  $I = 400 \text{ A} \Rightarrow \Delta\theta_{\infty} = 50 \cdot (400 / 215)^2 = 173,1^\circ\text{C}$ ;  $\theta_{\infty} = \theta_a + \Delta\theta_{\infty} = 183,1^\circ\text{C}$

$$\theta(t) = \theta_a + (\theta_{\infty} - \theta_a) \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \equiv 70^\circ\text{C};$$

$$\Rightarrow e^{-t/\tau} = 1 - \frac{\theta - \theta_a}{\theta_{\infty} - \theta_a} = 0,65334 \Rightarrow t = 6,38 \text{ min}.$$

**Задача I5. (II Колоквиум 2000).** Осум трижилни појасни кабли за номинален напон 10 kV излегуваат од една трансформаторска станица TS 110/10 kV/kV положени во земјата, во заснички ров, а потоа се разведуваат на начинот којшто е прикажан на сликата 2. Каблите бр 1, 2, 3 и 4 се од типот PP 41 A 3x150 6/10 kV, додека каблите бр 5, 6, 7 и 8 се од типот IPO 13 3x95 6/10 kV. Каблите бр. 7 и 8 се пасивни, т.е. се исклучени од употреба, и може да се смета дека тие не влијаат врз условите на загревање/ладење на останатите кабли. Податоците за условите на полагање во одделните делници се дадени во следната табела. Да се определи дозволеното трајно струјно оптоварување за секој кабел.

Секција	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
1. должина, m	50	100	50	60	200	45	25	50	20
2. полагање во	земја	земја	земја	воздух	земја	земја	воздух	воздух	воздух
3. положени кабли бр.	1 ÷ 8	1,2,3	2,3	3	4,5,6,7,8	4,5	6,7,8	6,7	6
4. начин на полагање	$D = 7 \text{ cm}$	$D = 15 \text{ cm}$	$D = 15 \text{ cm}$	сид, $d_s = 0$	$D = 7 \text{ cm}$	$D = 15 \text{ cm}$	регал <sup>1</sup>	регал <sup>2</sup>	тло <sup>3</sup>
5. амбиентна темп. °C	25	25	20	35	20	30	25	25	30
6. спец. отпор на тлото	100	200	300	/	300	300	/	/	/



Слика 2

**Забелешка:**

- 1) каблите се положени на релс. Циркулацијата е спречена.  $d_s = 2 \text{ cm}$   $d_m = d$ .
- 2) каблите се положени на релс. Циркулацијата е овозможена.  $d_s = 5 \text{ cm}$   $d_m = 2d$ .
- 3) кабелот е положен на тло, т.е. на дното од кабелски канал, на доволно растојание од сидовите ( $d_s = 2 \text{ cm}$ ).

**2. Задача I6. (II Кол. 2001).** Четирижилен нисконапонски кабел тип PR00 A 4x150 0,6/1 kV, чија временска константа на загревање изнесува  $\tau = 30 \text{ min}$ . е закопан во земја на длабочина 70 cm. Температурата на тлото (амбиентот) изнесува  $\theta_a = 15^\circ\text{C}$  а кабелот е долго време оптоварен со струја  $I = 200 \text{ A}$  така што може да се смета дека неговата температура е стационарна. Потребно е да се пресмета:

- а) колкава е таа температура  $\theta = ?$
- б) Кабелот долго време не бил воопшто оптоварен и неговата почетна температура е еднаква на амбиентната,  $\theta_0 = \theta_a = 15^\circ\text{C}$ . За колку време температурата на кабелот ќе ја достигне својата максимално дозволена вредност ако кабелот наеднаш го оптовариме со струја  $I = 400 \text{ A}$ .

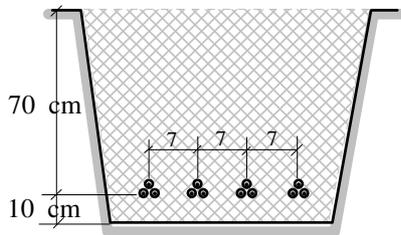
**Задача I7. (II Кол. 2002).** Трифазен потрошувач со карактеристики:  $U_n = 20 \text{ kV}$ ,  $P = 7 \text{ MW}$ ;  $\cos \varphi = 0,9$  треба да се напојува кабелски. Предвидено е за таа цел да биде поставен трифазен кабелски вод составен од три едножилни кабли од типот XHP 48 A 1x150/25 12/20 kV, чиј пречник изнесува  $d_k = 7 \text{ cm}$ . Кабелскиот вод ќе минува низ три различни делници со различни услови на полагање:

**1. Делница.** Кабелскиот вод е положен во земја, на длабочина  $h = 0,7 \text{ m}$ , заедно со уште три други кабелски водови, според сликата 2а. Специфичниот термички отпор на тлото изнесува  $\rho = 150^\circ\text{C} \cdot \text{cm}/\text{W}$ , а неговата температура изнесува  $\theta = 20^\circ\text{C}$ .

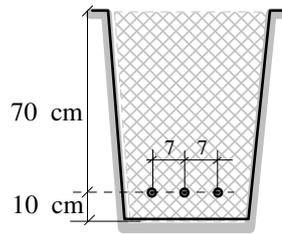
**2. Делница.** Кабелскиот вод е положен сам во земја, според сликата 2б. Специфичниот термички отпор на тлото изнесува  $\rho = 300 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$ , а неговата температура изнесува  $\theta = 30^\circ\text{C}$ .

**3. Делница.** Кабелскиот вод е положен сам на сид, без меѓусебни растојанија, според сликата 2в. Температурата на амбиентот изнесува  $\theta = 40^\circ\text{C}$ .

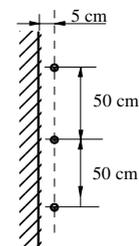
Да се утврди дали предвидениот кабел ќе одговори на барањата во поглед на дозволеното струјно оптоварување.



Слика 2а



Слика 2б



Слика 2в

**Задача 18.** (II Колоквиум 2003). Три едножилни кабели од типот ХНР 48 А 1x150/25 12/20 kV формираат трифазен кабелски вод. Жилите се положени во триаголен распоред на длабочина  $h = 70 \text{ cm}$  во земја со специфичен топлински отпор  $\rho = 100 \text{ }^\circ\text{C cm}/\text{W}$  и амбиентна температура  $\theta_a = 20^\circ\text{C}$ .

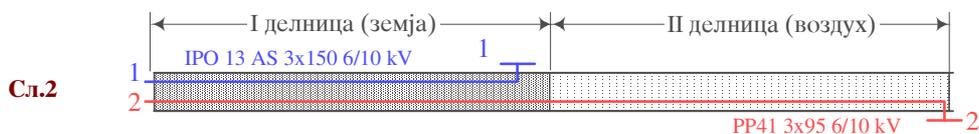
Кабелот треба да напојува дистрибутивен конзум чија врвна моќност изнесува  $P_M = 8 \text{ MW}$  при  $U = U_n = 20 \text{ kV}$  и  $\cos\phi = 0,9$ . Да се утврди:

- дали ќе биде кабелот термички преоптоварен;
- дали би бил кабелот термички преоптоварен доколку на дел од кабелската траса земјиптето има специфичен топлински отпор  $\rho = 300 \text{ }^\circ\text{C cm}/\text{W}$ ;
- дали би бил кабелот термички преоптоварен за случајот опишан под б) но во зимски услови, кога амбиентната температура е  $\theta_a = 10^\circ\text{C}$ ;
- Кабелот е поставен осамен во кабелски ров, во номинални услови ( $\rho = 100 \text{ }^\circ\text{C cm}/\text{W}$   $\theta_a = 20^\circ\text{C}$ ). Потрошувачот работи во интермитиран погон така што времето на работа изнесува  $t_k = 10 \text{ min.}$ , додека времето на пауза е доволно долго, така што на крајот од циклусот температурата на кабелот ја достигнува амбиентната температура  $\theta_a = 20^\circ\text{C}$ . Колкаво смее да биде струјното оптоварување на потрошувачот во такви услови на работа. Временската константа на загревање на кабелот изнесува  $\tau = 15 \text{ min.}$

**Задача 19.** (II Колоквиум 2004). На сликата 2 е прикажана трасата на една кабелска мрежа составена од два 10 kV појасни трижилни кабла со следните карактеристики:

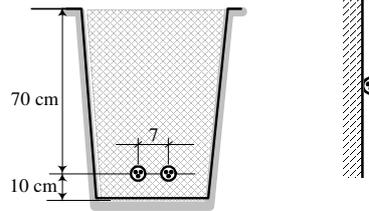
кабел бр. 1: тип IPO 13 AS 3x150 6/10 kV, напојува индустриски конзум со константно оптоварување;

кабел бр. 2: тип PP 41 3x95 6/10 kV, напојува дистрибутивен конзум.



Кабелската траса се состои од две делници со различни услови на полагање:

**1. Делница.** Обата кабла се положени во земја, на длабочина  $h = 0,7$  m и на меѓусебно растојание  $d = 7$  cm, според сликата 3а. Специфичниот топлински отпор на тлото изнесува  $\rho = 70^\circ\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$ , а неговата температура изнесува  $\theta_1 = 20^\circ\text{C}$ .



Слика 3а

**2. Делница.** Кабелскиот вод бр. 2 е положен сам на сид, според сл. 3б. Температурата на амбиентот изнесува  $\theta_2 = 20^\circ\text{C}$ .

Да се пресметаат дозволените струјни оптоварувања  $I_{d1}$  и  $I_{d2}$  на обата кабла.

Слика 3б

**Задача П10. (II Колоквиум 2005-решена).** Кабел од типот PP 41 A 3x240 6/10 kV е положен на длабочина  $h = 70$  cm во земја со специфичен топлински отпор  $\rho = 100^\circ\text{C cm}/\text{W}$  и амбиентна температура  $\theta_a = 20^\circ\text{C}$ .

Кабелот треба да напојува дистрибутивен конзум чија врвна моќност изнесува  $P_M = 4,5$  MW при  $U = U_n = 10$  kV и  $\cos\varphi = 0,95$ . Да се утврди:

- дали ќе биде кабелот термички преоптоварен;
- дали би бил кабелот термички преоптоварен доколку на дел од кабелската траса земјиштето има спец. топлински отпор  $\rho = 300^\circ\text{C cm}/\text{W}$ ;
- дали би бил кабелот термички преоптоварен за случајот опишан под б) но во зимски услови, кога амбиентната температура е  $\theta_a = 10^\circ\text{C}$ ;
- Кабелот е поставен осамен во кабелски ров, во номинални услови ( $\rho = 100^\circ\text{C cm}/\text{W}$   $\theta_a = 20^\circ\text{C}$ ). Потрошувачот работи во интермитиран погон така што времето на работа изнесува  $t_k = 10$  min., додека времето на пауза е доволно долго, така што на крајот од циклусот температурата на кабелот ја достигнува амбиентната температура  $\theta_a = 20^\circ\text{C}$ . Колкаво смее да биде струјното оптоварување на потрошувачот во такви услови на работа. Врем. константа на загревање на кабелот изнесува  $\tau = 15$  min.

### Решение:

Струјата  $I_p$  на потрошувачот изнесува:

$$I_p = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos\varphi} = \frac{4,5}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,95} = 273,5 \text{ A.}$$

Од табелата 5.2 (стр.28) отчитуваме дека дозволеното струјно оптоварување за овој тип кабел, положен во номинални услови, изнесува  $I_d = 315$  A.

**2а.** Кабелот е поставен во номинални услови. Значи неговото дозв. струјно оптоварување изнесува  $I_d = 315$  A и тоа е поголемо од струјата на потрошувачот  $I_p$  ( $I_d > I_p$ ) и нема преоптоварување.

**2б.** Во овој случај дозв. струјно оптоварување на кабелот ќе биде  $I'_d = f I_d = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot I_d$ ;  $f_2=1$ ;  $f_3=1$ ;  $f_1 = A \cdot B = 0,63 \cdot 1,03 = 0,649 \Rightarrow I'_d = 0,649 \cdot 315 = 204 \text{ A} < I_p$ . Значи кабелот ќе биде преоптоварен.

**2в.** Во зимски услови, кога е  $\theta_a = 10^\circ\text{C}$ , коеф.  $f_2 = 1,1$  (табела 5.13). Значи сега сумарниот корекционен фактор ќе биде  $f = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 = 0,649 \cdot 1,1 \cdot 1 = 0,714 \Rightarrow I'_d = f \cdot I_d = 225 \text{ A} < I_p$  (има преоптоварување).

**2г.** Кабелот е положен во номинални услови што значи дека неговото дозволено струјно оптоварување изнесува  $I_d = I_{\max} = 315$  A. Факторот на преоптоварување  $c_k$  во опишаниот интермитентен режим на работа изнесува:

$c_k = 1/\sqrt{1 - e^{-t_k/\tau}} = 1/\sqrt{1 - e^{-10/15}} = 1,43$ . Значи струјата на потрошувачот може да биде за 1,434 пати поголема од  $I_d$  на кабелот, т.е.  $I'_p = c_k \cdot I_d = 1,43 \cdot 315 = 451,6 \text{ A}$ .