

**ПРИЛОГ**  
**ТЕХНИЧКЕ ПРЕПОРУКЕ бр.3:**

**МЕТОДЕ ПРОРАЧУНА ДОЗВОЉЕНОГ СТРУЈНОГ**  
**ОПТЕРЕЋЕЊА ЕНЕРГЕТСКИХ КАБЛОВА**

мај 2013.

**ОБРАДИЛИ:**

**др Миладин Танасковић**  
**Томислав Бојковић**

---

**ИЗДАВАЧ:** ЈП ЕПС ДИРЕКЦИЈА ЗА ДИСТРИБУЦИЈУ  
ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ СРБИЈЕ  
БЕОГРАД, Војводе Степе 412

**Техничко уређење:** М. Танасковић и Т. Бојковић

Напомене уз Прилог ТП-3/2012:

У ТП-3/2012 [9], поглавље 24, утврђена су дозвољена струјна оптерећења кабловских водова, при чему је за водове 110 kV извршен прорачун коришћењем IEC метода приказаним у [5] и [6], а контролно и прорачун VDE методом [7].

Зато се указала потреба да се преко посебног Прилога корисници техничких препорука ЕД Србије детаљније упознају са основним теоретским поставкама поменутих метода прорачуна. Како се у [9] препоручује да се у свим електро-дистрибутивним мрежама називног напона 10 kV до 110 kV користи један тип енергетског кабла: XHE 49-A, обрада материје у овом Прилогу усмерена је на ток прорачуна дозвољених струјних оптерећења за кабловске водове 110 kV изведене једножилним кабловима типа XHE 49-A, положене у земљи у "троугластом" снопу.  
мај 2013.

Аутори

## 1 УВОД

За потребе техничке препоруке бр.3/2012. изведен је **прорачун дозвољених струјних оптерећења кабловских водова 110 kV**, а коришћене су две методе:

- метода приказана у IEC 60287 [5] за трајно (100%) оптерећење и метода приказана у IEC 60853-2 [6] за променљиво оптерећење и, контролно,
- метода приказана у "ETZ Report 13", VDE [7] за трајно и променљиво оптерећење.

Обе методе су са дугом традицијом примене у рутинским инжењерским прорачунима, а обухватају случајеве са или без исушивања тла око кабла.

Иначе, **стално (100%) оптерећење** најближе одговара индустријском потрошачу који ради у три смене, док је **дистрибутивно оптерећење типично променљиво**.

Зато је **намена** овог **Прилога** да се изврши детаљније упознавање са основним теоријским поставкама поменутих метода прорачуна и олакша њихово коришћење. На карактеристичном примеру даје се прорачун дозвољених струјних оптерећења за кабловске водове 110 kV изведене једножилним кабловима типа XHE 49-A, положене у земљи у "троугластом" снопу, али је приказани ток прорачуна применљив и за СН каблове.

Теоријске основе за разраду проблема провођења топлоте код енергетских каблова положених у земљи дате су у [1], [2], [3]. **Методe за прорачун трајног и променљивог струјног оптерећења** високонапонских каблова могу да се сврстају у две групе:

- примена еквивалентне топлотне шеме кабла - **IEC и VDE методе**;
- нумеричко решавање расподеле температура око кабла - **метода коначних елемената**.

**Метода за прорачун трајног (100%) струјног оптерећења** применом еквивалентне топлотне шеме кабла разрађена је у [5] - IEC метода, поглавља 2.1.1 и 2.2.1 Прилога, а у поглављима 2.1.2 и 2.2.2 Прилога је према [3], [7], [8] приказана и одговарајућа VDE метода која се заснива на утврђивању фиктивних топлотних отпорности за губитке у проводницима и диелектричне губитке у изолацији. Физички модели за прорачун трајног (100%) оптерећења су у основи исти за обе методе и доводе до идентичних резултата, па је неважно да ли се за прорачун користи IEC или VDE метода.

**Методe за прорачун променљивог (цикличног, дистрибутивног) струјног оптерећења** применом еквивалентне топлотне шеме кабла реализују се на два начина:

- одређивањем транзијентног одзива температуре применом „степ“ функције струје - IEC метода [6], поглавље 3.1 Прилога, према утврђеном фактору циклочног оптерећења  $M$  за дневни дијаграм оптерећења са константном максималном струјом у трајању од шест часова, без обзира на облик осталог дела дневног дијаграма оптерећења, и
- методом фактора оптерећења - VDE метода [7], поглавље 3.2 Прилога, на основу утврђених фиктивних топлотних отпорности за губитке у проводницима и у изолацији, и прорачунатом карактеристичном пречнику  $d_y$  за три облика дневног дијаграма променљивог оптерећења - за просечно дистрибутивно оптерећења у ЕД Србије одабран је правоугаони облик.

**Метода коначних елемената** је скоријег датума, сложена је и веома захтевна с обзиром на број улазних података и припрему модела за прорачун [4], па није погодна за рутинске инжењерске прорачуна и **није предмет разматрања овог Прилога**. Међутим, предност ове методе је изразита код решавања сложених проблема расподеле температура између више извора топлоте, на пример код прорачуна узајамног топлотног утицаја при паралелном вођењу кабловског вода 110 kV са магистралним топоводом.

## 2 ДОЗВОЉЕНО ТРАЈНО (100%) СТРУЈНО ОПТЕРЕЋЕЊЕ ЕНЕРГЕТСКОГ КАБЛА

### 2.1 Случај без исушивања тла око кабла

Режим трајног оптерећења подразумева континуално протицање струје истог интензитета довољне да се асимптотски достигне максимална радна трајно дозвољена температура проводника  $\theta_{mp}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) - за ХРЕ кабл:  $\theta_{mp} = 90$   $^{\circ}\text{C}$ , за непроменљиве услове околне средине.

#### 2.1.1 Случај без исушивања тла - ИЕС метода [5]

Дозвољено трајно (100%) струјно оптерећење енергетског кабла положеног у земљи без исушивања тла око кабла одређује се према [5] из:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\Theta - W_d \cdot [0,5 \cdot T_1 + n \cdot (T_2 + T_3 + T_4)]}{R \cdot T_1 + n \cdot R \cdot (1 + \lambda_1) \cdot T_2 + n \cdot R \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \cdot (T_3 + T_4)}}, \quad (1)$$

где је:

$I$  (А) - дозвољено трајно струјно оптерећење кабла;

$\Delta\Theta$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) - дозвољени прираштај температуре проводника изнад температуре тла  $\theta_t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), и одређује се из израза:  $\Delta\Theta = (\theta_{mp} - \theta_t)$ ;

$R$  ( $\Omega/\text{m}$ ) - електрична отпорност проводника по јединици дужине при наизменичној струји на максималној радној температури;

$W_d$  (W/m) - диелектрични губици у изолацији по јединици дужине;

$n$  - број проводника у каблу, односно број једножилних каблова у систему;

$T_1$  (K·m/W) - топлотна отпорност између проводника и ел. заштите по јединици дужине;

$T_2$  (K·m/W) - топлотна отпорност између ел. заштите и арматуре по јединици дужине;

$T_3$  (K·m/W) - топлотна отпорност спољне заштите (плашта) кабла по јединици дужине;

$T_4$  (K·m/W) - топлотна отпорност између површине кабла и средине која га окружује по јединици дужине;

$\lambda_1$  - количник (фактор) губитака у ел. заштити и губитака у проводнику;

$\lambda_2$  - количник (фактор) губитака у арматури и губитака у проводнику.

Код једножилних каблова са изолацијом од умреженог полиетилена (ХРЕ), на пример: кабл типа ХНЕ 49-А, је:  $T_2 = 0$  и  $\lambda_2 = 0$  јер кабл нема арматуру, па дозвољено трајно (100%) струјно оптерећење  $I$  (А), у [9] се користи ознака  $I_{doz}$  (А), три једножилна кабла ( $n = 3$ ) положена у „троугластом“ снопу, са електричним заштитима које су кратко спојене и уземљене на оба краја кабловског вода, без преплитања (транспозиција - cross bonding), без исушивања околног тла, на основу израза (1) одређује се из:

$$I = I_{doz} = \sqrt{\frac{\Delta\Theta - W_d \cdot (0,5 \cdot T_1 + 3 \cdot T_3 + T_4)}{R \cdot T_1 + R \cdot (1 + \lambda_1) \cdot (3 \cdot T_3 + T_4)}}. \quad (2)$$

Израз (2) се разликује од израза (1) из [5] по томе што је топлотна отпорност између површине кабла и средине која га окружује  $T_4$  одређена уз уважавање утицаја сва три кабла у „троугластом“ снопу на одвођење топлоте. Такође, усвајањем броја једножилних каблова у систему:  $n = 3$  у изразу (2), уважава се и утицај губитака у сва три кабла у снопу.

Насупрот томе, уколико би се уз услов:  $n = 1$  директно применио израз (1) из [5], добијена вредност дозвољеног струјног оптерећења била би већа јер се не узима у обзир да су и друга два кабла у снопу извори топлоте.

Топлотна отпорност  $T_1$  између проводника и електричне заштите одређује се из израза:

$$T_1 = \frac{\rho_i}{2\pi} \cdot \ln\left(1 + \frac{2 \cdot t_1}{d_1}\right), \quad (3)$$

где је:

$\rho_i$  ( $K \cdot m/W$ ) - специфична топлотна отпорност изолације;  
 $d_1$  ( $mm$ ) - пречник проводника;  
 $t_1$  ( $mm$ ) - дебљина изолације између проводника и електричне заштите.

**Топлотна отпорност  $T_3$**  спољног заштитног плашта кабла одређује се из израза:

$$T_3 = \frac{\rho_{sz}}{2\pi} \cdot \ln\left(1 + \frac{2 \cdot t_4}{d_6}\right), \quad (4)$$

где је:

$\rho_{sz}$  ( $K \cdot m/W$ ) - специфична топлотна отпорност спољног заштитног плашта;  
 $d_6$  ( $mm$ ) - унутрашњи пречник спољног заштитног плашта;  
 $t_4$  ( $mm$ ) - дебљина спољног заштитног плашта.

**Топлотна отпорност  $T_4$**  између површине кабла и околног тла одређује се из израза:

$$T_4 = \frac{\rho_z}{2\pi} \cdot \left[ \ln\left(\frac{4 \cdot h}{d}\right) + 2 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{d}\right) \right], \quad (5)$$

где је:

$\rho_z$  ( $K \cdot m/W$ ) - специфична топлотна отпорност околног тла;  
 $h$  ( $m$ ) - растојање од површине тла до осе кабловског снопа;  
 $d$  ( $m$ ) - спољни пречник једножилног кабла у снопу.

Вредности за електричну отпорност проводника  $R$  ( $\Omega/m$ ) и диелектричне губитке  $W_d$  ( $W/m$ ) у изразима (1) и (2), као и параметри:  $t_1$  ( $mm$ ),  $t_4$  ( $mm$ ),  $d$  ( $mm$ ),  $d_1$  ( $mm$ ),  $d_6$  ( $mm$ ),  $\rho_i$  ( $K \cdot m/W$ ) и  $\rho_{sz}$  ( $K \cdot m/W$ ) у изразима (3), (4) и (5) усвајају се из каталога произвођача кабла (Табеле 1 и 2 овог Прилога).

**Фактор губитака  $\lambda_1$**  се своди на фактор губитака због циркулационих струја  $\lambda_{ez}$  у редовном погону, и код три једножилна кабла типа ХНЕ 49-А у снопу, са кратко спојеним и уземљеним електричним зашитама на оба краја кабловског вода 110 kV, рачуна се из:

$$\lambda_1 \approx \lambda_{ez} = \frac{R_{ez}}{R} \cdot \frac{X_{ez}^2}{R_{ez}^2 + X_{ez}^2}, \quad (6)$$

где је:

$R_{ez}$  ( $\Omega/m$ ) - активна отпорност електричне заштите по јединици дужине на максималној температури  $\theta_{mez} = 80$  °C, и одређује се према познатом обрасцу (7) на основу података из каталога произвођача кабла, Табеле 1 и 2 Прилога;  
 $X_{ez}$  ( $\Omega/m$ ) - реактанса електричне заштите по јединици дужине и одређује се према [5].

**Активна отпорност  $R_{ez}$  и реактанса  $X_{ez}$  електричне заштите** одређују се из:

$$R_{ez} = \frac{\rho_{20}}{S_{ez}} \cdot [1 + \alpha_{20} \cdot (\theta_{mez} - 20)]; \quad X_{ez} = 4\pi \cdot f \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot s}{d_{sez}}\right), \quad (7)$$

где је (Табеле 1 и 2):

$S_{ez}$  ( $mm^2$ ) - површина попречног пресека електричне заштите;  
 $\rho_{20}$  ( $\Omega \cdot mm^2/m$ ) - специфична електрична отпорност електричне заштите на 20 °C;  
 $\alpha_{20}$  ( $1/K$ ) - температурни коефицијент промене отпорности електричне заштите;  
 $s$  ( $mm$ ) - растојање између оса проводника, за "троугласти" сноп је:  $s = d$ ;  
 $d_{sez}$  ( $mm$ ) - средњи пречник електричне заштите:  $d_{sez} = 0,5 \cdot (d_4 + d_5)$ .

Иначе, прорачун дозвољеног струјног оптерећење  $I_{doz}$  у ТП-3/2012 [9] је изведен уз уважавање утицаја циркулационих струја у електричним зашитама које се јављају у редовном погону, изрази (2) и (6), односно под претпоставком да није изведено преплитање електричних заштита дуж кабловског вода. Прорачуни су показали да за одабране типске пресеке проводника проценат смањења  $I_{doz}$  због присуства циркулационих струја је реда 5% до 8%. Како се једножилни каблови 64/110 kV обавезно полажу у “троугластом” снопу, а на кабловском воду 110 kV веће дужине ( $\geq 2,5$  km) се препоручује преплитање електричних заштита, и тада је утицај циркулационих струја миноран, прорачунате вредности за  $I_{doz}$  су одређене на страни сигурности.

### 2.1.2 Случај без исушивања тла - VDE метода [7]

Дозвољено трајно (100%) струјно оптерећење  $I(A)$  кабловског вода положеног у земљи без исушивања околног тла може да се искаже и у функцији фиктивне топлотне отпорности за губитке изазване струјом и од фиктивне топлотне отпорности за диелектричне губитке, према [3], [7], [8] изразом:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\Theta - n \cdot W_d \cdot (T_{kd} + T_4)}{n \cdot R_{ef} \cdot (T_{ki} + T_4)}} \quad (8)$$

Дозвољено трајно (100%) струјно оптерећење  $I(A)$ , у [9] се користи ознака  $I_{doz}(A)$ , три једножилна кабла ( $n = 3$ ) типа ХНЕ 49-А положена у „троугластом“ снопу, за услове без исушивања околног тла одређује се на основу израза (8) из:

$$I = I_{doz} = \sqrt{\frac{\Delta\Theta - W_d \cdot (3 \cdot T_{kd} + T_4)}{R_{ef} \cdot (3 \cdot T_{ki} + T_4)}} \quad (9)$$

где је:

$R_{ef}$  ( $\Omega/m$ ) - ефективна електрична отпорност проводника по јединици дужине на максималној радној температури 90 °C;

$T_{ki}$  ( $K \cdot m/W$ ) - фиктивна топлотна отпорност за губитке изазване струјом, по јединици дужине;

$T_{kd}$  ( $K \cdot m/W$ ) - фиктивна топлотна отпорност за диелектричне губитке, по јединици дужине.

Израз (9) разликује се од израза (8) из [3], [7], [8] из истих разлога који су наведени у случају израза (2).

За ХРЕ једножилне каблове без арматуре, типа ХНЕ 49-А у “троугластом” снопу, је:

$n = 3$ ,  $T_2 = 0$  и  $\lambda_2 = 0$ , па се параметри  $R_{ef}$ ,  $T_{ki}$  и  $T_{kd}$  у изразу (9) рачунају помоћу израза:

$$R_{ef} = R \cdot (1 + \lambda_1); \quad T_{ki} = \frac{T_1}{3 \cdot (1 + \lambda_1)} + T_3; \quad T_{kd} = \frac{T_1}{2 \cdot 3} + T_3 \quad (10)$$

## 2.2 Случај са исушивањем тла око кабла

**Исушивање** одређеног слоја **тла око кабла** настаје због повишене температуре и миграције влаге, што доводи до пораста специфичне топлотне отпорности зоне тла око кабла, до смањења дозвољене струје кабловског вода и може да угрози кабловски вод.

### 2.2.1 Случај са исушивањем тла - ИЕС метода [5]

**Дозвољено трајно (100%) струјно оптерећење кабловског вода положеног у земљи, са исушивањем тла око кабла**, одређује се према [5] из:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\Theta - W_d \cdot [0,5 \cdot T_1 + n \cdot (T_2 + T_3 + v \cdot T_4)] + (v-1) \cdot \Delta\Theta_x}{R \cdot T_1 + n \cdot R \cdot (1+\lambda_1) \cdot T_2 + n \cdot R \cdot (1+\lambda_1 + \lambda_2) \cdot (T_3 + v \cdot T_4)}}, \quad (11)$$

**Дозвољено трајно (100%) струјно оптерећење са исушивањем тла око кабла  $I(A)$** , у [9] се користи ознака  $I_{dis}(A)$ , за три једножилна кабла типа ХНЕ 49-А положена у “троугластом” снопу ( $n = 3, T_2 = 0, \lambda_2 = 0$ ), према израза (11) одређује се из:

$$I = I_{dis} = \sqrt{\frac{\Delta\Theta - W_d \cdot (0,5 \cdot T_1 + 3 \cdot T_3 + v \cdot T_4) + (v-1) \cdot \Delta\Theta_x}{R \cdot T_1 + R \cdot (1+\lambda_1) \cdot (3 \cdot T_3 + v \cdot T_4)}}, \quad (12)$$

где је:

$\Delta\Theta_x$  (°C) - пораст температуре на граници између исушене и влажне зоне тла изнад температуре околине;

$v$  - однос (количник) специфичне топлотне отпорности исушеног тла  $\rho_d$  (K·m/W) и специфичне топлотне отпорности тла са влагом  $\rho_w$  (K·m/W), или:

$$v = \frac{\rho_d}{\rho_w}. \quad (13)$$

**Пораст температуре  $\Delta\Theta_x$**  одређује се из:  $\Delta\Theta_x = \theta_x - \theta_z$ , где је

$\theta_x$  (°C) - критична температура тла на граници између исушене и влажне зоне тла;

$\theta_z$  (°C) - температура околног тла.

Иначе, сматра се да **исушивање тла почиње** када због пораста температуре и губитка влаге специфична топлотна отпорност тла око кабла достигне вредност:  $\rho_d = 2,5 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$ , односно критична температура тла око кабла достигне вредност:  $\theta_x = 50 \text{ }^\circ\text{C}$  (за изразито песковито тло:  $\theta_x = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

### 2.2.2 Случај са исушивањем тла - VDE метода [7]

**Дозвољено трајно (100%) струјно оптерећење кабла  $I(A)$  са исушивањем тла**, може да се искаже и у функцији фиктивне топлотне отпорности за губитке изазване струјом и фиктивне топлотне отпорности за диелектричне губитке, према [3], [7], [8] изразом:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\Theta - n \cdot W_d \cdot (T_{kd} + v \cdot T_4) + (v-1) \cdot \Delta\Theta_x}{n \cdot R_{ef} \cdot (T_{ki} + v \cdot T_4)}}. \quad (14)$$

За кабл типа ХНЕ 49-А дозвољено трајно (100%) струјно оптерећење са исушивањем тла  $I(A)$ , у [9] се користи ознака  $I_{dis}(A)$ , три једножилна кабла положена у “троугластом” снопу ( $n = 3, T_2 = 0, \lambda_2 = 0$ ), према изразу (14) одређује се из:

$$I = I_{dis} = \sqrt{\frac{\Delta\Theta - W_d \cdot (3 \cdot T_{kd} + v \cdot T_4) + (v-1) \cdot \Delta\Theta_x}{R_{ef} \cdot (3 \cdot T_{ki} + v \cdot T_4)}}. \quad (15)$$

**Рачунска провера претпоставке о исушивању тла** око кабловског вода обрађена је у поглављу 4 овог Прилога.

### 3 ДОЗВОЉЕНО ПРОМЕНЉИВО СТРУЈНО ОПТЕРЕЋЕЊЕ ЕНЕРГЕТСКОГ КАБЛА

#### 3.1 Транзијентни одзив температуре на „STEP“ функцију струје - ИЕС метода [6]

Прорачун максимално дозвољене струје кабловског вода при променљивом (дистрибутивном) оптерећењу према [6] заснива се на одређивању фактора цикличног оптерећења  $M$  када топлотни капацитети у каблу не могу да се занемаре, тако да је:

$$I_{pr} = M \cdot I, \quad (16)$$

где је:

$I_{pr}(A)$  - максимално дозвољено циклички променљиво струјно оптерећење кабла;

$M$  - фактор циклички променљивог оптерећења;

$I(A)$  - дозвољено трајно (100%) струјно оптерећење кабла, поглавље 2. овог Прилога, у [9] се користе ознаке  $I_{doz}$  или  $I_{dis}$  у зависности од тога да ли се не рачуна, или се рачуна, са појавом исушивања тла око кабла.

**Фактор цикличног оптерећења  $M$  за дневни дијаграм оптерећења са константном максималном струјом у трајању од шест часова**, без ограничења на облик преосталог дела дневног дијаграма, одређује се из:

$$M = \frac{1}{\sqrt{1 - (1 - \mu) \cdot [1 - \alpha(6) + k \cdot \alpha(6) \cdot (1 - \beta(6))]}}, \quad (17)$$

где је:

$\mu$  - фактор губитака;

$k$  - однос (количник) прираста температуре спољне површине кабла изнад амбијента према прирасту температуре проводника изнад амбијента при трајном струјном оптерећењу;

$\alpha(6)$  - фактор досега за проводник, и то је однос (количник) прираста температуре проводника у односу на температуру спољне површине кабла на крају периода максималног шесточасовног струјног оптерећења;

$\beta(6)$  - фактор досега за спољну површину кабла, и то је однос (количник) прираста температуре спољне површине кабла на крају периода максималног шесточасовног струјног оптерећења према прирасту температуре спољне површине кабла при трајном струјном оптерећењу.

**Фактор губитака  $\mu$**  се рачуна на основу познатог фактора оптерећења (испуне)  $m$  из:

$$\mu = 0,3 \cdot m + 0,7 \cdot m^2. \quad (18)$$

**Фактор досега за проводник  $\alpha(6)$**  одређује се из:

$$\alpha(6) = \frac{T_a \cdot (1 - e^{-a \cdot 6 \cdot 3600}) + T_b \cdot (1 - e^{-b \cdot 6 \cdot 3600})}{T_A + T_B}, \quad (19)$$

где је:

$$T_A = T_1; \quad T_B = (1 + \lambda_1) \cdot T_3; \quad (20)$$

$$a = \frac{M_0 + \sqrt{M_0^2 - N_0}}{N_0}; \quad b = \frac{M_0 - \sqrt{M_0^2 - N_0}}{N_0} \quad (21)$$

$$M_0 = \frac{1}{2} [Q_A \cdot (T_A + T_B) + Q_B \cdot T_B]; \quad N_0 = Q_A \cdot T_A \cdot Q_B \cdot T_B \quad (22)$$

$$T_a = \frac{1}{a - b} \cdot \left[ \frac{1}{Q_A} - b \cdot (T_A + T_B) \right]; \quad T_b = T_A + T_B - T_a \quad (23)$$



Топлотни капацитети  $Q_A$  и  $Q_B$  одређују се из:

$$Q_A = Q_c + p \cdot Q_i ; \quad Q_B = (1-p) \cdot Q_i + \frac{Q_s + p' \cdot Q_j}{1 + \lambda_1} \quad (24)$$

где је:

- $Q_c$  ( $J/K \cdot m$ ) - топлотни капацитет проводника;
- $Q_i$  ( $J/K \cdot m$ ) - топлотни капацитет изолације;
- $Q_s$  ( $J/K \cdot m$ ) - топлотни капацитет електричне заштите;
- $Q_j$  ( $J/K \cdot m$ ) - топлотни капацитет спољног плашта;
- $p$  - Van Wormer-ов параметар за изолацију;
- $p'$  - Van Wormer-ов параметар за спољни плашт.

Топлотни капацитети  $Q_c$ ,  $Q_i$ ,  $Q_s$  и  $Q_j$  одређују се из општег израза:

$$Q = q_{\text{spec}} \cdot S, \quad (25)$$

где је:

- $q_{\text{spec}}$  ( $J/m^3 \cdot K$ ) - специфични топлотни капацитет материјала разматраног дела кабла;
- $S$  ( $m^2$ ) - површина попречног пресека разматраног дела кабла.

Van-Wormer-ов параметар  $p$  за изолацију одређује се из:

$$p = \frac{1}{2 \cdot \ln\left(\frac{d_3}{d_1}\right)} - \frac{1}{\left(\frac{d_3}{d_1}\right)^2 - 1} \quad (26)$$

где је:

- $d_1$  ( $mm$ ) - пречник проводника;
- $d_3$  ( $mm$ ) - пречник преко изолације.

Van-Wormer-ов параметар  $p'$  за спољни плашт одређује се из:

$$p' = \frac{1}{2 \cdot \ln\left(\frac{d}{d_6}\right)} - \frac{1}{\left(\frac{d}{d_6}\right)^2 - 1}, \quad (27)$$

где је  $d_6$  ( $mm$ ) унутрашњи пречник спољног плашта, а  $d$  ( $mm$ ) спољни пречник кабла.

Фактор досега за спољну површину кабла  $\beta(6)$  одређује се из:

$$\beta(6) = \frac{-E_i\left(-\frac{d^2}{16 \cdot 6 \cdot 3600 \cdot \delta}\right) - \left[-E_i\left(-\frac{h^2}{6 \cdot 3600 \cdot \delta}\right)\right]}{2 \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot h}{d}\right)}, \quad (28)$$

где је  $\delta$  ( $m/s^2$ ) дифузивност земљишта, која за  $\rho_z = 1 K \cdot m/W$  износи:  $\delta = 0,5 \cdot 10^{-6} m/s^2$ , док се за  $\rho_z \neq 1 K \cdot m/W$  добија из израза:

$$\delta = \frac{10^{-3}}{\rho_z \cdot \gamma_{sz} \cdot (0,82 + 0,042 \cdot \eta)}, \quad (29)$$

где је:

- $\gamma_{sz}$  ( $kg/m^3$ ) - специфична густина суве земље;
- $\eta$  (%) - садржај воде у сувој тежини.

**Експоненцијални интеграл  $-E_i(-x)$  се одређује:**

- за  $0 \leq x \leq 1$  из:  $-E_i(-x) = -\ln(x) + \sum_{i=0}^5 a_i x^i$ , (30)

где је:  $a_0 = -0,5772$ ;  $a_1 = 1,000$ ;  $a_2 = -0,2499$ ;  $a_3 = 0,0552$ ;  $a_4 = 0,0098$ ;  $a_5 = 0,0011$ ;

- за  $1 < x < \infty$  из:  $-E_i(-x) = \frac{1}{x \cdot e^x} \left[ \frac{x^2 + a_1 \cdot x + a_2}{x^2 + b_1 \cdot x + b_2} \right]$ , (31)

где је:  $a_1 = 2,3347$ ;  $a_2 = 0,2506$ ;  $b_1 = 3,3307$ ;  $b_2 = 1,6815$ ;

- посебно за  $x \geq 8$  из:  $-E_i(-x) = 0$ ; (32)

- посебно за  $x < 0,01$  из:  $-E_i(-x) = -\ln(x) - 0,5772 + x$ . (33)

**Количник  $k$  прираста температуре у изразу (17) одређује се из:**

$$k = \frac{(1 + \lambda_1) \cdot T_4}{T_A + T_B + (1 + \lambda_1) \cdot T_4}. \quad (34)$$

### 3.2 Прорачун према фактору оптерећења (губитака) - VDE метода [7]

**Одређивање максимално дозвољене струје кабловског вода при променљивом (дистрибутивном) оптерећењу методом фактора оптерећења** заснива се на чињеници да се топлотна отпорност околног тла мења због променљивог оптерећења и губитака. За разлику од IEC методе [6] којом се у прорачуну обухвата утицај топлотних капацитета слојева кабла и околне земље, VDE метода [7] обухвата утицај само околне земље. Практична идентичност резултата добијених према IEC или VDE методи (одступања у опсегу испод 1 %) показује да је од доминантног значаја утицај околне земље.

#### 3.2.1 Случај без исушивања тла око кабла - VDE метода

**Максимално дозвољено струјно оптерећење кабловског вода** положеног у земљи, **при променљивом оптерећењу  $I_{pr}$**  и за услове **без исушивања тла око кабла**, према [7] одређује се из:

$$I_{pr} = \sqrt{\frac{\Delta\Theta - n \cdot W_d \cdot (T_{kd} + T_4)}{n \cdot R_{ef} \cdot (T_{ki} + T_y)}}. \quad (35)$$

**Максимално дозвољено струјно оптерећење кабловског вода од три једножилна кабла ( $n = 3$ ) типа ХНЕ 49-А** положена у земљи у „**троугластом**“ **снопу, при променљивом оптерећењу  $I_{pr}$**  и за услове **без исушивања тла око кабла** одређује се према изразу (35) из:

$$I_{pr} = \sqrt{\frac{\Delta\Theta - W_d \cdot (3 \cdot T_{kd} + T_4)}{R_{ef} \cdot (3 \cdot T_{ki} + T_y)}}. \quad (36)$$

где је:

$T_y$  ( $K \cdot m/W$ ) - **наизменична топлотна отпорност околног тла** која се за једножилне каблове положене у „**троугластом**“ **снопу одређује из:**

$$T_y = \frac{\rho_z}{2\pi} \cdot \left[ \ln\left(\frac{4 \cdot h}{d}\right) + 2 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{d}\right) - 3 \cdot (1 - \mu) \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot h}{d_y}\right) \right] = T_4 - \frac{\rho_z}{2\pi} \cdot \left[ 3 \cdot (1 - \mu) \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot h}{d_y}\right) \right]. \quad (37)$$

**Карактеристичан пречник  $d_y(cm)$**  у изразу (37) за променљиво оптерећење зависи од облика дијаграма дневног оптерећења (правоугаони, синусоидални или аритметичка средина претходна два), и за **правоугаони облик усвојен у ЕД Србије** одређује се из:

$$d_y = \frac{311 \cdot \sqrt{\mu}}{\rho_z^{0.4} \cdot \sqrt{\omega}} \quad (38)$$

где је:  $\mu$  фактор губитака,  $\rho_z$  специфична топлотна отпорност околног тла, а  $\omega$  број дана цикллично променљивог оптерећења - обично се усваја:  $\omega = 40$ .

*Напомена:* У ЕД Србије уобичајено се усваја да је упрошћен дневни дијаграм дистрибутивног оптерећења правоугаоног облика, на пример: тачка 24.6 у [9], Додатак ТП-11/1999 и стандард SRPS N.H1.016 за избор дозвољеног струјног оптерећења ЕТ-а итд.

### 3.2.2 Случај са исушивањем тла око кабла - VDE метода [7]

**Максимално дозвољено струјно оптерећење кабловског вода** положеног у земљи при променљивом (дистрибутивном) оптерећењу за услове са исушивањем околног тла, према [7] одређује се из:

$$I_{pr} = \sqrt{\frac{\Delta\Theta - n \cdot W_d \cdot (T_{kd} + v \cdot T_4) + (v-1) \cdot \Delta\Theta_x}{n \cdot R_{ef} \cdot (T_{ki} + v \cdot T_y)}} \quad (39)$$

**Максимално дозвољено струјно оптерећење кабловског вода од три једножилна кабла ( $n = 3$ ) типа ХНЕ 49-А** положена у земљи у „троугластом“ снопу, при променљивом (дистрибутивном) оптерећењу за услове са исушивањем околног тла  $I_{pr}(A)$ , због прегледности ћемо га означити са  $I_{pri}(A)$ , одређује се према изразу (39) из:

$$I_{pr} = I_{pri} = \sqrt{\frac{\Delta\Theta - W_d \cdot (3 \cdot T_{kd} + v \cdot T_4) + (v-1) \cdot \Delta\Theta_x}{R_{ef} \cdot (3 \cdot T_{ki} + v \cdot T_y)}} \quad (40)$$

Рачунска провера претпоставке о исушивању тла и ефикасним мерама за спречавање исушивања тла око кабловског вода обрађена је у наредном поглављу 4.

## 4 Решавање проблема исушивања тла око кабловског вода 110 kV

**IEC и VDE методе за прорачун дозвољених струјних оптерећења** приказане у [5], [6] и [7] појавиле су се још седамдесетих година прошлог века и третирали су случајеве који не доводе до исушивања тла. Међутим, у пракси је регистровано исушивање тла, посебно у случају сталног (100%) оптерећења. Узрок ове појаве је вероватно чињеница да је у то време за кабловску постелу обично коришћен песак неодређеног квалитета (гранулација и садржај кварца) или земља из откопа. Такође, шира примена ХРЕ каблова, чија изолација трајно дозвољава температуру проводника од 90 °C (код папирних каблова је 65 °C), заострила је проблем исушивања тла, па су касније развијене IEC и VDE методе прорачуна и са уважавањем исушивања тла око кабла.

**Дозвољено струјно оптерећење кабловског вода прорачунато са исушивањем тла  $I_{dis}(A)$  или  $I_{pri}(A)$  мање је за 20% до 25% у односу на дозвољено струјно оптерећење прорачунато без исушивања тла  $I_{doz}(A)$  или  $I_{pr}(A)$ .** У пракси то значи да треба или **редуковати снагу** која се прикључује на кабловски вод или **повећати пресек проводника кабла**, али су обе ове мере неприхватљиве.

Зато се проблем исушивања тла око кабла решава на два начина: **извршити рачунску проверу претпоставке о исушивању тла, или применити кабловску постелу** и остале **мере** које су дате у ТП-3/2012, **са којима се за променљиво (дистрибутивно) оптерећење искључује могућност појаве исушивања тла** око енергетског кабла.

#### 4.1 Рачунска провера претпоставке о исушивању тла

Теоријска подлога за проверу претпоставке о исушивању тла дата је у VDE методи [7]. Међутим, пошто су физички модели за прорачун по IEC и VDE методи у основи исти и доводе до идентичних резултата, провера претпоставке о исушивању тла може да се врши и када се за прорачун користи IEC метода.

Када дође до исушивања тла око три једножилна кабла у „троугластом“ снопу, у попречном пресеку формира се кружна линија која је изотерма са критичном температуром  $\theta_x$ . Између снопа каблова и изотерме са критичном температуром  $\theta_x$  налази се исушена зона у којој је специфична топлотна отпорност тла  $\rho_d$ .

Претпоставка да на траси кабловског вода може доћи до исушивања тла треба рачунски да се провери, независно од тога да ли је реч о трајном ( $m = 1$ ) или променљивом оптерећењу ( $m < 1$ ), у односу на **пречник круга исушене зоне  $d_x(cm)$**  који се одређује из:

$$d_x = \frac{4 \cdot h \cdot k_x}{k_x^2 - 1} \quad (41)$$

**Коефицијент  $k_x$  (фактор геометрије исушеног слоја тла) за трајно оптерећење ( $m = 1$ )** одређује се помоћу израза:

$$k_x = \exp\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta\theta_x}{3 \cdot \rho_w \cdot (W_d + R \cdot I^2)}\right) \quad (42)$$

**За променљиво (дистрибутивно) оптерећење ( $m < 1$ ) пречник  $d_x$  се пореди са карактеристичним пречником  $d_y$  прорачунатог према изразу (38), тако да се **коефицијент  $k_x$  (фактор геометрије)** одређује**

- **а) за  $d_x > d_y$  из:**  $k_x = \exp\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta\theta_x}{3 \cdot \rho_w \cdot (W_d + \mu \cdot R \cdot I^2)}\right)$  (43)

- **б) за  $d_x \leq d_y$  из:**  $k_x = \exp\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta\theta_x + 3 \cdot \rho_w \cdot (1 - \mu) \cdot R \cdot I^2 \cdot \ln d_y}{3 \cdot \rho_w \cdot (W_d + R \cdot I^2)}\right)$  (44)

**Провера претпоставке о исушивању тла код трајног оптерећења** врши се тако што се прорачуна струја  $I = I_{doz}$  без исушивања тла према изразу (2) или (9) и према њој помоћу израза (42) и (41) коефицијент  $k_x$  и пречник круга исушене зоне  $d_x$ . **Прорачуната вредност пречника круга исушене зоне  $d_x$  је тачна** и меродавна за проверу да ли постоји слој исушеног тла око кабла.

**Провера претпоставке о исушивању тла код променљивог (дистрибутивног) оптерећења** врши се тако што се најпре прорачуна струја  $I = I_{pr}$  без исушивања тла према изразу (36) и према њој помоћу израза (43) коефицијент  $k_x$  и пречник круга исушене зоне  $d_x$  према изразу (41). **Ако је испуњен претпостављени услов а):  $d_x > d_y$ , прорачуната вредност пречника круга исушене зоне  $d_x$  је тачна** и меродавна за проверу да ли постоји слој исушеног тла око кабла. Међутим, **ако није испуњен први претпостављени услов а)** у изразу (43), прелази се на испуњење услова **б):  $d_x \leq d_y$**  тако што се помоћу израза (44) прорачуна коефицијент  $k_x$  и пречник круга исушене зоне  $d_x$  према изразу (41) и тако **прорачуната вредност пречника круга исушене зоне  $d_x$  је тачна** и меродавна за проверу да ли постоји слој исушеног тла око кабла.

**Провера да ли постоји слој исушеног тла око кабла** врши се поређењем прорачунате тачне вредности пречника круга исушене зоне  $d_x$  са еквивалентним спољним пречником снопа три једножилна кабла  $D_{sn}(cm)$ , где је:  $D_{sn} = 2,3 \cdot d$ , а  $d(cm)$  је спољни пречник једножилног кабла у снопу, односно:

- ако је  $d_x \leq D_{sn}$  или ако је:  $d_x \leq 2,3 \cdot d$ , претпоставка о исушивању тла није потврђена јер не постоји слој исушеног тла, и за прорачун је меродавна струја  $I_{doz}$  добијена према изразу (2) или (9), односно струја  $I_{pr}$  добијена према изразу (36), за услове без исушивања тла око кабла;
- ако је:  $d_x > D_{sn}$  или ако је:  $d_x > 2,3 \cdot d$  значи да се око кабловског снопа формира слој исушеног тла, и за прорачун је меродавна струја  $I_{dis}$  добијена према изразу (12) или (15) који предвиђају исушивање тла око кабла.

Дебљина слоја исушеног тла може да се прорачуна помоћу израза:  $t_{is} = 0,5 \cdot (d_x - D_{sn})$ .

#### 4.2 Мере за спречавање исушивања тла

Анализа изведена у 4.1 је базирана на претпоставци да је постелица кабловског снопа од материјала чија је специфична топлотна отпорност приближно исте вредности као околног тла, на пример: песак неодређеног квалитета или земља из откопа.

Међутим, у ЕД Србије се, тачка 10.6.6 у [9], за кабловски вод 110 kV предвиђа **обавезна примена кабловске постелице од мешавине песка и шљунка високог садржаја кварца, а на топлотно критичним местима** (на пример: при паралелном вођењу са топловодом) **се користи постелица од специјалне мешавине**, која се формира тако што се стандардној мешавини додаје цемент, и тада се кабловски ров испуњава до врха овом мешавином. Припрема мешавина се обавља машинским мешањем на сепарацији, а контрола гранулометријског састава врши се приликом набавке и на месту уградње. Обе мешавине се пар деценија успешно користе у ЕД Београд [2].

Припремљене мешавине и у исушеном стању имају специфичну топлотну отпорност:  $\rho_p \leq 1 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$ .

Иначе, кабловски ров у који се полаже снап једножилних каблова 64/110 kV је дубине најмање 1,4 m и ширине у дну 0,8 m до 1,0 m, слике 10.10 у [9], при чему је код примене стандардне постелице слој постелице дебљине најмање 0,7 m. Тако се значајно повећава контактна површина између кабловске постелице добре топлотне проводности и околног тла. Зато је у овом случају исправно да се **провера претпоставке о исушивању тла** врши поређењем вредности пречника круга исушене зоне  $d_x(\text{cm})$  са еквивалентним пречником  $D_p(\text{cm})$  фиктивног цилиндра испуњеног материјалом као за постелицу. У конкретном случају би код стандардне постелице попречног пресека:  $S_p = (90 \text{ cm} \times 70 \text{ cm})$  пречник износио:  $D_p \approx 90 \text{ cm}$ , док би код специјалне мешавине попречног пресека:  $S_p = (100 \text{ cm} \times 140 \text{ cm})$  пречник износио:  $D_p \approx 134 \text{ cm}$ .

То значи: **до исушивања тла око кабловског вода 110 kV би дошло**, у условима како трајног (100%), тако и променљивог (дистрибутивног) оптерећења, ако је испуњен услов:  $d_x > D_p$  и тада за прорачун струје  $I_{pr}$  треба користити израз (40) који предвиђа исушивање тла.

Међутим, прорачуни изведени у оквиру израде [9], као и у наредном примеру Прилога, **потврђују да је редовно:  $d_x \ll D_p$  и нема реалних услова за појаву исушивања тла.**

Зато је у ЕД Србије **прихваћено прагматично решење: испуњењем захтева утврђених у ТП-3/2012 [9]**, а пре свега: избором кабловске постелице према тачки 10.6.6 за нормалне и тешке услове одвођења топлоте, избором параметара за прорачун вредности дозвољених струјних оптерећења према IEC 60853-2 [6], избором типског пресека проводника кабла који задовољава услове терећења и за специфичну топлотну отпорност тла:  $\rho_z = 1,2 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$ , као и избором референтне температуре тла која одговара температури тла у летњем периоду ( $\theta_{ref} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ), **за променљиво (дистрибутивно) оптерећење искључује се могућност појаве исушивања тла око кабла.**

### 5 Пример прорачуна дозвољених струјних оптерећења - IEC и VDE методе

У "шумадијском" делу Београда гради се кабловски вод 110 kV који се састоји од три једножилна кабла типа ХНЕ 49-А, пресека проводника/електричне заштите: 1000/95 mm<sup>2</sup> Al/Si, производње "ФКС". Каблови се положу у земљу у "троугластом" снопу на дубини:  $h = 1,2$  m. Користи се кабловска постељица од стандардне или специјалне мешавине утврђене у тачки 10.6.6 у [9].

Након полагања врши се кратко спајање и уземљење електричних заштита на крајевима кабловског вода. Дуж вода не врши се преплитање електричних заштита.

а) Прорачунати дозвољено трајно  $I_{doz}(A)$  и променљиво  $I_{pr}(A)$  струјно оптерећење кабловског вода коришћењем IEC и VDE метода приказаним у [5], [6] и [7], ако нема исушивања тла око кабла.

б) Проверити да ли се око кабловског вода формира слој исушеног тла.

Основни подаци који се односе на конструкцију кабла налазе се у табелама 1 и 2.

Прорачун се изводи за специфичну топлотну отпорност тла:  $\rho_t = 1$  K·m/W.

Температура тла  $\theta_t$  на нивоу полагања је  $\theta_t = \theta_z = 10^\circ\text{C}$  за зимски период и  $\theta_t = \theta_L = 20^\circ\text{C}$  за летњи период, а референтна температура:  $\theta_t = \theta_{ref} = +20^\circ\text{C}$ .

Фактор испуне је  $m = 1$  за трајно и  $m = 0,8$  за дистрибутивно оптерећење.

#### Решење:

а) Прорачун дозвољеног струјног оптерећења без исушивања околног тла

а.1) Дозвољено трајно (100%) оптерећење - IEC метода [5]

Топлотна отпорност  $T_1$  између проводника и електричне заштите према (3) износи:

$$T_1 = \frac{\rho_i}{2\pi} \cdot \ln\left(1 + \frac{2 \cdot t_1}{d_1}\right) = \frac{3,5}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(1 + \frac{2 \cdot 18}{41,3}\right) = 0,349 \text{ K} \cdot \text{m} / \text{W}.$$

Топлотна отпорност  $T_3$  спољног заштитног плашта кабла према (4) износи:

$$T_3 = \frac{\rho_{sz}}{2\pi} \cdot \ln\left(1 + \frac{2 \cdot t_4}{d_6}\right) = \frac{3,5}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(1 + \frac{2 \cdot 4,0}{85,0}\right) = 0,05 \text{ K} \cdot \text{m} / \text{W}.$$

Топлотна отпорност  $T_4$  између површине кабла и околног тла према (5) износи:

$$T_4 = \frac{\rho_z}{2\pi} \cdot \left[ \ln\left(\frac{4 \cdot h}{d}\right) + 2 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{d}\right) \right] = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \ln\left(\frac{4 \cdot 1200}{93}\right) + \ln\left(\frac{2 \cdot 1200}{93}\right) \right] = 1,663 \text{ K} \cdot \text{m} / \text{W}.$$

Активна отпорност електричне заштите  $R_{ez}$  и реактанса електричне заштите  $X_{ez}$  одређују се из (7):

$$R_{ez} = \frac{\rho_{20}}{S_{ez}} \cdot [1 + \alpha_{20} \cdot (\theta_{mez} - 20)] = \frac{0,0178}{95} \cdot [1 + 0,0039 \cdot (80 - 20)] = 0,23 \cdot 10^{-3} \Omega / \text{m};$$

$$X_{ez} = 4\pi \cdot f \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot d}{0,5 \cdot (d_4 + d_5)}\right) = 4 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot 93}{0,5 \cdot (79,7 + 826)}\right) = 0,52 \cdot 10^{-4} \Omega / \text{m}.$$

Фактор губитака  $\lambda_1$ , односно фактор губитака због циркулационих струја  $\lambda_{ez}$ , према изразу (6) износи:

$$\lambda_1 \approx \lambda_{ez} = \frac{R_{ez}}{R} \cdot \frac{X_{ez}^2}{R_{ez}^2 + X_{ez}^2} = \frac{0,23 \cdot 10^{-3}}{0,041 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{(0,52 \cdot 10^{-4})^2}{(0,23 \cdot 10^{-3})^2 + (0,52 \cdot 10^{-4})^2} = 0,279.$$

**Дозвољено трајно (100%) струјно оптерећење** (фактор оптерећења:  $m = 1$ )  $I_{dozZ}(A)$  кабловског вода 110 kV положеног у земљи, у зимском периоду ( $\theta_t = \theta_z = 10^\circ C$ ), без исушивања тла око кабла, према изразу (2) износи:

$$I_{dozZ} = \sqrt{\frac{(\theta_{mp} - \theta_z) - W_d \cdot (0,5 \cdot T_1 + 3 \cdot T_3 + T_4)}{R \cdot T_1 + R \cdot (1 + \lambda_1) \cdot (3 \cdot T_3 + T_4)}}$$

$$I_{dozZ} = \sqrt{\frac{(90 - 10) - 0,4 \cdot (0,5 \cdot 0,349 + 3 \cdot 0,05 + 1,663)}{0,041 \cdot 10^{-3} \cdot 0,349 + 0,041 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 0,279) \cdot (3 \cdot 0,05 + 1,663)}} = 850,8 \text{ A.}$$

**Дозвољено трајно (100%) струјно оптерећење** (фактор оптерећења:  $m = 1$ )  $I_{dozL}(A)$  кабловског вода 110 kV положеног у земљи, у летњем периоду ( $\theta_t = \theta_L = 20^\circ C$ ), без исушивања тла око кабла, према изразу (2) износи:

$$I_{dozL} = \sqrt{\frac{(\theta_{mp} - \theta_L) - W_d \cdot (0,5 \cdot T_1 + 3 \cdot T_3 + T_4)}{R \cdot T_1 + R \cdot (1 + \lambda_1) \cdot (3 \cdot T_3 + T_4)}}$$

$$I_{dozL} = \sqrt{\frac{(90 - 20) - 0,4 \cdot (0,5 \cdot 0,349 + 3 \cdot 0,05 + 1,663)}{0,041 \cdot 10^{-3} \cdot 0,349 + 0,041 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 0,279) \cdot (3 \cdot 0,05 + 1,663)}} = 795,3 \text{ A.}$$

### a.2) Дозвољено променљиво (дистрибутивно) оптерећење - ИЕС метода [6]

Максимално дозвољена струја кабловског вода при променљивом (дистрибутивном) оптерећењу  $I_{pr}(A)$  изражава се у функцији фактора цикличног оптерећења  $M$  и вредности дозвољеног трајног струјног оптерећења  $I_{doz}(A)$ , односно:  $I_{pr} = M \cdot I_{doz}$ , израз (16).

**Фактор цикличног оптерећења  $M$  за дневни дијаграм оптерећења са константним максималном струјом у трајању од шест часова**, без ограничења на облик преосталог дела дневног дијаграма, одређује се из (17):

$$M = \frac{1}{\sqrt{1 - (1 - \mu) \cdot [1 - \alpha(6) + k \cdot \alpha(6) \cdot (1 - \beta(6))]}}$$

**Фактор оптерећења (испуне)** за конзум који се напаја из мреже 110 kV је:  $m = 0,8$  па **фактор губитака  $\mu$**  према изразу (18) износи:

$$\mu = 0,3 \cdot m + 0,7 \cdot m^2 = 0,3 \cdot 0,8 + 0,7 \cdot 0,8^2 = 0,688.$$

**Фактор досега за проводник  $\alpha(6)$**  према изразу (19) износи:

$$\alpha(6) = \frac{T_a \cdot (1 - e^{-a \cdot 6 \cdot 3600}) + T_b \cdot (1 - e^{-b \cdot 6 \cdot 3600})}{T_a + T_b}$$

$$\alpha(6) = \frac{2,887 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - e^{-2,032 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 3600}) + 0,41 \cdot (1 - e^{-3,209 \cdot 10^{-4} \cdot 6 \cdot 3600})}{0,349 + 0,064} = 0,9955$$

где је:

$$T_A = T_1 = 0,349 \text{ K} \cdot \text{m} / \text{W}; \quad T_B = (1 + \lambda_1) \cdot T_3 = (1 + 0,279) \cdot 0,05 = 0,064 \text{ K} \cdot \text{m} / \text{W};$$

$$a = \frac{M_0 + \sqrt{M_0^2 - N_0}}{N_0} = \frac{1804,07 + \sqrt{1804,07^2 - 1533112,3}}{1533112,3} = 2,032 \cdot 10^{-3} \text{ 1/s};$$

$$b = \frac{M_0 - \sqrt{M_0^2 - N_0}}{N_0} = \frac{1804,07 - \sqrt{1804,07^2 - 1533112,3}}{1533112,3} = 3,209 \cdot 10^{-4} \text{ 1/s};$$

$$M_0 = \frac{1}{2} [Q_A \cdot (T_A + T_B) + Q_B \cdot T_B] = \frac{1}{2} [7274,2 \cdot (0,349 + 0,064) + 9435,9 \cdot 0,064] = 1804,07 \text{ s};$$

$$N_0 = Q_A \cdot T_A \cdot Q_B \cdot T_B = 7274,2 \cdot 0,349 \cdot 9435,9 \cdot 0,064 = 1533112,3 \text{ s}^2;$$

$$T_a = \frac{1}{a-b} \cdot \left[ \frac{1}{Q_A} - b \cdot (T_A + T_B) \right],$$

$$T_a = \frac{1}{2,032 \cdot 10^{-3} - 3,209 \cdot 10^{-4}} \cdot \left[ \frac{1}{7274,2} - 3,209 \cdot 10^{-4} \cdot (0,349 + 0,064) \right] = 2,887 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{m/W};$$

$$T_b = T_A + T_B - T_a = 0,349 + 0,064 - 2,887 \cdot 10^{-3} = 0,41 \text{ K} \cdot \text{m/W}.$$

**Топлотни капацитети  $Q_A$  и  $Q_B$**  према изразу (24) износе:

$$Q_A = Q_c + p \cdot Q_i = 2480 + 0,3866 \cdot 12401 = 7274,2 \text{ J/K} \cdot \text{m};$$

$$Q_B = (1-p) \cdot Q_i + \frac{Q_s + p' \cdot Q_j}{1 + \lambda_1} = (1 - 0,3866) \cdot 12401 + \frac{333,5 + 0,485 \cdot 4136}{1 + 0,279} = 9435,9 \text{ J/K} \cdot \text{m};$$

где је:

$$Q_c = q_{\text{cspec}} \cdot S_c = 2,48 \cdot 10^6 \cdot 1000 \cdot 10^{-6} = 2480 \text{ J/K} \cdot \text{m};$$

$$Q_i = q_{\text{ispec}} \cdot S_i = 3,7 \cdot 10^6 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (77,3^2 - 41,3^2) \cdot 10^{-6} = 12401 \text{ J/K} \cdot \text{m};$$

$$Q_s = q_{\text{sspec}} \cdot S_s = 3,51 \cdot 10^6 \cdot 95 \cdot 10^{-6} = 333,5 \text{ J/K} \cdot \text{m};$$

$$Q_j = q_{\text{jspec}} \cdot S_j = 3,7 \cdot 10^6 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (93^2 - 85^2) \cdot 10^{-6} = 4136 \text{ J/K} \cdot \text{m}.$$

**Van-Wormer-ов параметар  $p$**  за изолацију према изразу (26) износи:

$$p = \frac{1}{2 \cdot \ln\left(\frac{d_3}{d_1}\right)} - \frac{1}{\left(\frac{d_3}{d_1}\right)^2 - 1} = \frac{1}{2 \cdot \ln\left(\frac{77,3}{38,3}\right)} - \frac{1}{\left(\frac{77,3}{38,3}\right)^2 - 1} = 0,3866.$$

**Van-Wormer-ов параметар  $p'$**  за спољни плашт према изразу (27) износи:

$$p' = \frac{1}{2 \cdot \ln\left(\frac{d}{d_6}\right)} - \frac{1}{\left(\frac{d}{d_6}\right)^2 - 1} = \frac{1}{2 \cdot \ln\left(\frac{93}{85}\right)} - \frac{1}{\left(\frac{93}{85}\right)^2 - 1} = 0,485.$$

**Фактор досега за спољну површину кабла  $\beta(6)$**  према изразу (28) износи:

$$\beta(6) = \frac{-E_i\left(-\frac{d^2}{16 \cdot 6 \cdot 3600 \cdot \delta}\right) - \left[-E_i\left(-\frac{h^2}{6 \cdot 3600 \cdot \delta}\right)\right]}{2 \cdot \ln\left(\frac{4h}{d}\right)},$$

$$\beta(6) = \frac{-E_i\left(-\frac{93^2}{16 \cdot 6 \cdot 3600 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}}\right) - \left[-E_i\left(-\frac{1,2^2}{6 \cdot 3600 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}}\right)\right]}{2 \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot 1200}{93}\right)},$$



$$\beta(6) = \frac{-E_i(-0,05) - [-E_i(-133,33)]}{2 \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot 1200}{93}\right)} = \frac{2,468 - 0}{2 \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot 1200}{93}\right)} = 0,3129.$$

У (28) је  $\delta$  ( $m/s^2$ ) дифузивност земљишта и за  $\rho_z = 1 K \cdot m/W$  износи:  $\delta = 0,5 \cdot 10^{-6} m/s^2$ .

Експоненцијални интеграл  $-E_i(-x)$  у (28) за  $x = 133,33$  је према изразу (32) раван нули, док је за  $x = 0,05$  прорачунат према изразу (30) и износи 2,468.

Количник  $k$  прираста температуре према изразу (34) износи:

$$k = \frac{(1 + \lambda_1) \cdot T_4}{T_A + T_B + (1 + \lambda_1) \cdot T_4} = \frac{(1 + 0,279) \cdot 1,663}{0,349 + 0,064 + (1 + 0,279) \cdot 1,663} = 0,837.$$

Према томе, фактор цикличног оптерећења  $M$  према изразу (17) износи:

$$M = \frac{1}{\sqrt{1 - (1 - 0,688) \cdot [1 - 0,9955 + 0,837 \cdot 0,9955 \cdot (1 - 0,3129)]}} = 1,104.$$

То значи: у истим условима, вредност дозвољеног променљивог (дистрибутивног) оптерећења ( $m = 0,8$ ) већа је за око 10% него код трајног ( $m = 1$ ) оптерећења.

Максимално дозвољена струја  $I_{prz}$  (A) (снага  $S_{prz}$  (MVA) кабловског вода 110 kV положеног у земљи, при променљивом (дистрибутивном) оптерећењу (фактор оптерећења:  $m = 0,8$ ), у зимском периоду према изразу (16) износи:

$$I_{prz} = M \cdot I_{dozZ} = 1,104 \cdot 850,8 = 939,3 \text{ A} \Rightarrow (S_{prz} = 179 \text{ MVA}).$$

Максимално дозвољена струја  $I_{prL}$  (A) (снага  $S_{prL}$  (MVA) кабловског вода 110 kV положеног у земљи, при променљивом (дистрибутивном) оптерећењу (фактор оптерећења:  $m = 0,8$ ), у летњем периоду према изразу (16) износи:

$$I_{prL} = M \cdot I_{dozL} = 1,104 \cdot 795,3 = 878,0 \text{ A} \Rightarrow (S_{prL} = 167 \text{ MVA}).$$

### а.3) Дозвољено трајно оптерећење - VDE метода [7]

У Уводу је речено да је физички модел за прорачун трајног струјног оптерећења по VDE методи у основи исти као код IEC методе и доводи до идентичног резултата. Зато нема потребе да изводимо овај прорачун, већ ћемо из поглавља а.1) усвојити прорачунате вредности дозвољеног трајног оптерећења  $I_{doz}$  по IEC методи, и искористити их за проверу формирања слоја исушеног тла у поглављу б).

### а.4) Дозвољено променљиво (дистрибутивно) оптерећење - VDE метода [7]

Максимално дозвољена струја кабловског вода при променљивом (дистрибутивном) оптерећењу  $I_{pr}(A)$  методом фактора оптерећења одређује се помоћу израза (36).

Карактеристичан пречник  $d_y(cm)$  за усвојен правоугаони облик променљивог (дистрибутивног) оптерећења према изразу (38) износи:

$$d_y = \frac{311 \cdot \sqrt{\mu}}{\rho_z^{0,4} \cdot \sqrt{\omega}} = \frac{311 \cdot \sqrt{0,688}}{1^{0,4} \cdot \sqrt{40}} = 40,79 \text{ cm}$$

где број дана цикличног променљивог оптерећења износи:  $\omega = 40$ .

За једножилне каблове положене у „троугластом“ снопу наизменична топлотна отпорност околне земље  $T_y$  ( $K \cdot m/W$ ) према изразу (37) износи ( $T_4 = 1,663 K \cdot m/W$ ):

$$T_y = T_4 - \frac{\rho_z}{2\pi} \cdot \left[ 3 \cdot (1 - \mu) \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot h}{d_y}\right) \right] = 1,663 - \frac{1}{2\pi} \cdot \left[ 3 \cdot (1 - 0,688) \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot 1200}{10 \cdot 40,79}\right) \right] = 1,296 K \cdot m/W.$$

За ХРЕ каблове без арматуре, типа ХНЕ 49-А у "троугластом" снопу, параметри  $R_{ef}$ ,  $T_{ki}$  и  $T_{kd}$  према изразу (10) износе:

$$R_{ef} = R \cdot (1 + \lambda_1) = 0,041 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 0,279) = 0,052 \cdot 10^{-3} \Omega / m;$$

$$T_{ki} = \frac{T_1}{3 \cdot (1 + \lambda_1)} + T_3 = \frac{0,349}{3 \cdot (1 + 0,279)} + 0,05 = 0,141 \text{ K} \cdot m / W;$$

$$T_{kd} = \frac{T_1}{2 \cdot 3} + T_3 = \frac{0,349}{2 \cdot 3} + 0,05 = 0,141 \text{ K} \cdot m / W.$$

**Максимално дозвољена струја  $I_{prz}$  (А) кабловског вода 110 kV** положеног у земљи, **при променљивом (дистрибутивном) оптерећењу** (фактор оптерећења:  $m = 0,8$ ), **у зимском периоду** ( $\theta_z = 10^\circ\text{C}$ ), методом фактора оптерећења према изразу (36) износи:

$$I_{prz} = \sqrt{\frac{(\theta_{mp} - \theta_z) - W_d \cdot (3 \cdot T_{kd} + T_4)}{R_{ef} \cdot (3 \cdot T_{ki} + T_y)}} = \sqrt{\frac{(90 - 10) - 0,4 \cdot (3 \cdot 0,141 + 1,663)}{0,052 \cdot 10^{-3} \cdot (3 \cdot 0,141 + 1,296)}} = 937,6 \text{ A}.$$

**Максимално дозвољена струја  $I_{prz}$  (А) кабловског вода 110 kV** положеног у земљи, **при променљивом (дистрибутивном) оптерећењу** (фактор оптерећења:  $m = 0,8$ ), **у летњем периоду** ( $\theta_L = 20^\circ\text{C}$ ), методом фактора оптерећења према изразу (36) износи:

$$I_{prL} = \sqrt{\frac{(\theta_{mp} - \theta_L) - W_d \cdot (3 \cdot T_{kd} + T_4)}{R_{ef} \cdot (3 \cdot T_{ki} + T_y)}} = \sqrt{\frac{(90 - 20) - 0,4 \cdot (3 \cdot 0,141 + 1,663)}{0,052 \cdot 10^{-3} \cdot (3 \cdot 0,141 + 1,296)}} = 876,4 \text{ A}.$$

Види се да су вредности максимално дозвољених струја  $I_{prz}$  (А) и  $I_{prL}$  (А) за променљиво (дистрибутивно) оптерећење добијене према IEC или VDE методи практично идентичне.

Комплетни упоредни подаци прорачуна дозвољених струјних оптерећења кабловског вода 110 kV типа ХНЕ 49-А за трајно (100%) и променљиво (дистрибутивно) оптерећење, добијени према IEC или VDE методи, дати су у Табели Пр.2а у ТП-3/2012 [9].

#### б) Рачунска провера претпоставке о исушивању тла око кабла

У ЕД Србије је прихваћено решење да се испуњењем захтева утврђених у [9], а пре свега **обавезном применом кабловске постељице од мешавине песка и шљунка која и у исушеном стању има специфичну топлотну отпорност:  $\rho_p \leq 1 \text{ K} \cdot m / W$** , у коју се полаже сноп једножилних каблова 64/110 kV типа ХНЕ 49-А, **за променљиво оптерећење фактора оптерећења  $m = 0,8$  искључује се појава исушивања тла око кабла.**

Међутим, због важности коју кабловски вод има у дистрибутивној мрежи 110 kV, претпоставка да на траси кабловског вода може да дође до исушивања тла је оправдана и треба рачунски да се провери. Ову рачунску проверу ћемо да изведемо независно од тога да ли је реч о трајном ( $m = 1$ ) или променљивом (дистрибутивном) оптерећењу ( $m = 0,8$ ), и то прво под претпоставком да је употребљена неадекватна постељица (песак или земља из откопа) и затим када се примењује кабловска постељица према тачки 10.6.6 у ТП-3/2012.

**Провера да ли постоји слој исушеног тла око кабла** врши се поређењем вредности пречника круга исушене зоне  $d_x$  са еквивалентним спољним пречником снопа три једножилна кабла  $D_{sn}$ , односно са еквивалентним пречником  $D_p$  фиктивног цилиндра испуњеног материјалом као за постељицу.

**Еквивалентни спољни пречник снопа  $D_{sn}(cm)$  три једножилна кабла** типа ХНЕ 49-А, пресека проводника  $1000 \text{ mm}^2 \text{ Al}$ , износи:  $D_{sn} = 2,3 \cdot d = 2,3 \cdot 9,3 = 21,4 \text{ cm}$ .

Кабловски вод се полаже у ров дубине најмање  $h_{kr} = 140 \text{ cm}$  и ширине у дну  $a_p = 80 \text{ cm}$  до  $a_p = 100 \text{ cm}$ , у слој кабловске постељице дебљине најмање  $t_p = 70 \text{ cm}$  код примене стандардне постељице, и  $t_p = 140 \text{ cm}$  на топлотно критичним местима.

**Еквивалентни пречник  $D_p(cm)$  фиктивног цилиндра за стандардну постељицу износи:**

$$a_p \cdot h_{kr} = (\pi/4) \cdot D_p^2 \Rightarrow D_p = \sqrt{(4/\pi) \cdot 80 \cdot 70} = 85 \text{ cm до } D_p = 95 \text{ cm.}$$

**Еквивалентни пречник  $D_p(cm)$  фиктивног цилиндра за специјалну постељицу на топлотно критичним местима ( $a_p = 100 \text{ cm}$ ,  $t_p = 140 \text{ cm}$ ) износи:  $D_p = 134 \text{ cm}$ .**

### 6.1) Провера исушивања тла за трајно (100%) оптерећење

**Коефицијент  $k_{xz}$  (фактор геометрије исушеног слоја тла) у зимском периоду износи:**

$$k_{xz} = \exp\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta\Theta_x}{3 \cdot \rho_w \cdot (W_d + R \cdot I_{dozZ}^2)}\right) = \exp\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot (50 - 10)}{3 \cdot 1 \cdot (0,4 + 0,041 \cdot 10^{-3} \cdot 850,8^2)}\right) = 16,05.$$

**Пречник круга исушене зоне  $d_{xz}(cm)$  у зимском периоду износи:**

$$d_{xz} = \frac{4 \cdot h \cdot k_x}{k_x^2 - 1} = \frac{4 \cdot 120 \cdot 16,05}{16,05^2 - 1} = 30,03 \text{ cm.}$$

**Коефицијент  $k_{xL}$  у летњем периоду износи:**

$$k_{xL} = \exp\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta\Theta_x}{3 \cdot \rho_w \cdot (W_d + R \cdot I_{dozL}^2)}\right) = \exp\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot (50 - 20)}{3 \cdot 1 \cdot (0,4 + 0,041 \cdot 10^{-3} \cdot 795,3^2)}\right) = 6,35.$$

**Пречник круга исушене зоне  $d_{xL}(cm)$  у летњем периоду износи:**

$$d_{xL} = \frac{4 \cdot h \cdot k_x}{k_x^2 - 1} = \frac{4 \cdot 120 \cdot 6,35}{6,35^2 - 1} = 77,5 \text{ cm.}$$

**У случају трајног (100%) оптерећења ( $m = 1$ ,  $D_{sn} = 21,4 \text{ cm}$  и  $D_p \approx 90 \text{ cm}$ ) је:**

- $d_{xz} > D_{sn}$  и  $d_{xL} \gg D_{sn}$ , што значи да трајно постоје услови да се око кабловског снопа формира слој исушеног тла ако би се применила неадекватна постељица;
- $d_{xz} \ll D_p$  и  $d_{xL} < D_p$ , што значи да и у случају трајног оптерећења нема услова да се око кабловског снопа формира слој исушеног тла ако се примени адекватна постељица према тачки 10.6.6 у ТП-3/2012.

### 6.2) Провера исушивања тла за променљиво (дистрибутивно) оптерећење

Проверу исушивања тла за променљиво (дистрибутивно) оптерећење ( $m = 0,8$ ) извршићемо методом фактора оптерећења [7], на основу карактеристичног пречника  $d_y$  за правоугаони облик дневног дијаграма оптерећења и наизменичне топлотне отпорности околне земље  $T_y$ . У а.4) смо израчунали да је:  $d_y = 40,79 \text{ cm}$  и  $T_y = 1,296 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$ , док дозвољене струје у зимском и летњем периоду износе:  $I_{prZ} = 937,6 \text{ A}$  и  $I_{prL} = 876,4 \text{ A}$ .

**Поређење пречника  $d_x$  са карактеристичним пречником  $d_y$  извршићемо уз претпоставку б) у изразу (44) да је:  $d_x \leq d_y$ , па коефицијент  $k_{xz}$  у зимском периоду износи:**

$$k_{xz} = \exp\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta\Theta_x + 3 \cdot \rho_w \cdot (1-\mu) \cdot R \cdot I_{prZ}^2 \cdot \ln d_y}{3 \cdot \rho_w \cdot (W_d + R \cdot I_{prZ}^2)}\right),$$

$$k_{xz} = \exp\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot (50 - 10) + 3 \cdot 1 \cdot (1 - 0,688) \cdot 0,041 \cdot 10^{-3} \cdot 937,6^2 \cdot \ln 40,79}{3 \cdot 1 \cdot (0,4 + 0,041 \cdot 10^{-3} \cdot 937,6^2)}\right) = \exp(3,442) = 30,92.$$

**Пречник круга исушене зоне  $d_{xz}(cm)$  у зимском периоду износи:**

$$d_{xz} = \frac{4 \cdot h \cdot k_x}{k_x^2 - 1} = \frac{4 \cdot 120 \cdot 30,92}{30,92^2 - 1} = 15,54 \text{ cm.}$$

Како је  $d_{xz} = 15,54 \text{ cm} < d_y = 40,79 \text{ cm}$  учињена претпоставка б) у изразу (44) је тачна и меродавна за проверу да ли постоји слој исушеног тла око кабла.

**Поређење** пречника  $d_x$  са карактеристичним пречником  $d_y$  извршићемо **уз претпоставку б)** у изразу (44) **да је:  $d_x \leq d_y$** , па **коэффицијент  $k_{xL}$  у летњем периоду** износи:

$$k_{xL} = \exp\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta\Theta_x + 3 \cdot \rho_w \cdot (1-\mu) \cdot R \cdot I_{prL}^2 \cdot \ln d_y}{3 \cdot \rho_w \cdot (W_d + R \cdot I_{prL}^2)}\right),$$

$$k_{xL} = \exp\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot (50 - 10) + 3 \cdot 1 \cdot (1 - 0,688) \cdot 0,041 \cdot 10^{-3} \cdot 876,4^2 \cdot \ln 40,79}{3 \cdot 1 \cdot (0,4 + 0,041 \cdot 10^{-3} \cdot 876,4^2)}\right) = \exp(3,11) = 22,23.$$

**Пречник круга исушене зоне  $d_{xL}(\text{cm})$  у летњем периоду** износи:

$$d_{xL} = \frac{4 \cdot h \cdot k_x}{k_x^2 - 1} = \frac{4 \cdot 120 \cdot 22,23}{22,23^2 - 1} = 21,64 \text{ cm}.$$

Како је  $d_{xL} = 21,64 \text{ cm} < d_y = 40,79 \text{ cm}$  учињена претпоставка б) у изразу (44) је тачна и меродавна за проверу да ли постоји слој исушеног тла око кабла.

Према томе, **у случају променљивог (дистрибутивног) оптерећења** ( $m = 0,8$  и  $D_{sn} = 21,4 \text{ cm}$ ) је:  $d_{xz} < D_{sn}$  и  $d_{xL} \approx D_{sn}$ , што значи да **не постоје услови да се** око кабловског снопа **формира слој исушеног тла чак и за хипотетички услов да је примењена неадекватна кабловска постељица.**

Наравно, независно од предходног закључка, у тачки 10.6.б у ТП-3/2012 [9] **се инсистира на примени одговарајуће квалитетне постељице**, што иде у прилог сигурности и што је потврда исправности опредељења: **за променљиво (дистрибутивно) оптерећење искључује се могућност појаве исушивања тла око кабловског вода 110 kV.**

**Додатак: Геометријске, топлотне и електричне карактеристике:**

**Енергетски кабл ХНЕ 49-А, 64/110 кV „ФКС“- полагање у „троугластом“ снопу**

**Табела 1. Геометријске карактеристике и губици**

Површина попречног пресека проводника, $S_p$ (mm <sup>2</sup> ) Al	1000	800	630
Пречник проводника $d_1$ (mm)	38,3	33,9	29,8
Отпорност проводника на 90 °C (нс), $R$ (Ω/m)	$0,041 \cdot 10^{-3}$	$0,050 \cdot 10^{-3}$	$0,062 \cdot 10^{-3}$
Дебљина полупроводног слоја преко проводника, $t_{psp}$ (mm)	1,0	1,0	1,0
Унутрашњи пречник изолације, $d_2$ (mm)	41,3	36,9	32,8
Дебљина изолације, $t_1$ (mm)	18,0	18,0	18,0
Пречник преко изолације, $d_3$ (mm)	77,3	72,9	68,8
Дебљина полупроводног слоја преко изолације, $t_{psi}$ (mm)	1,2	1,2	1,2
Диелектрични губици у изолацији, $W_d$ (W/m)	0,4	0,4	0,4
Унутрашњи пречник ел. заштите, $d_4$ (mm)	79,7	75,3	71,2
Пречник преко ел. заштите, $d_5$ (mm)	82,6	78,2	74,1
Површина попречног пресека електричне заштите, $S_{ez}$ (mm <sup>2</sup> )	95	95	70
Отпорност ел. заштите на 80 °C (нс), $R_{ez}$ (Ω/m)	$0,23 \cdot 10^{-3}$	$0,23 \cdot 10^{-3}$	$0,31 \cdot 10^{-3}$
Унутрашњи пречник спољног плашта, $d_6$ (mm)	85,0 (83,2)	81,4 (78,6)	76,6 (74,8)
Дебљина спољног плашта, $t_4$ (mm)	4,0 (3,9)	3,8 (3,7)	3,7 (3,6)
Спољни пречник кабла, $d$ (mm)	93 (91)	89 (86)	84 (82)
<i>Напомена: вредности у загради се односе на кабл типа ХНЕ 48-А, 64/110 кV „ФКС“</i>			

**Табела 2. Топлотне и електричне карактеристике**

Карактеристике	Проводник	Изолација	Електрична заштита	Спољни плашт
Специфична топлотна отпорност, $\rho_{st}$ (K·m/ W)	$4,5 \cdot 10^{-3}$	3,5	$2,6 \cdot 10^{-3}$	3,5
Специфични топлотни капацитет, $q_{spec}$ (J/m <sup>3</sup> ·K)	$2,48 \cdot 10^6$	$3,7 \cdot 10^6$	$3,51 \cdot 10^6$	$3,7 \cdot 10^6$
Специфична ел. отпорност на 20 °C ( $j_{cc}$ ), $\rho_{20}$ (Ω·mm <sup>2</sup> /m)	0,02874	-	0,0178	-
Температурни коеф. промене отпорности, $\alpha_{20}$ (1/K)	0,0042		0,0039	

**Литература:**

- [1] S. King, N. Halfter: "Underground Power Cables", Longman, London, New York, 1982.
- [2] Б. Лалевић: "Електроенергетски каблови", Београд, 1993.
- [3] Д. Тасић: "Основи електроенергетске кабловске технике", Електронски факултет у Нишу, 2001.
- [4] J. Nahman, M. Tanasković, "Evaluation of the loading capacity of a pair of three-phase high voltage cable systems using the finite element method", *Electris Power Systems Research*, vol.81, pp.1550-1555, 2011.
- [5] IEC 60287/2006: Calculation of the continuous current rating of cables (100% load factor).
- [6] IEC 60853-2/1989-07: Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables.
- [7] Franz Winkler: "Strombelastbarkeit von Starkstromkabeln in Erde bei Berücksichtigung der Bodenaustrocknung und eines Tageslastspieles", *ETZ Report-13*, VDE-Verlag GmbH, Berlin 1978.
- [8] М. Танасковић, Т. Бојковић, Д. Перић: "Дистрибуција електричне енергије", Академска мисао, Београд, 2007.
- [9] Техничка препорука бр.3 ЕД Србије: "Основни технички захтеви за избор и монтажу енергетских каблова и кабловског прибора у електродистрибутивним мрежама 1 kV, 10 kV, 20 kV, 35 kV и 110 kV", V-о издање, новембар 2012. год.