

13. ELEKTRIČNO POLJE

13.1. OPŠTE

Električno polje jednožilnog ekraniziranog kabla na rastojanju r od ose kabla je dato izrazom:

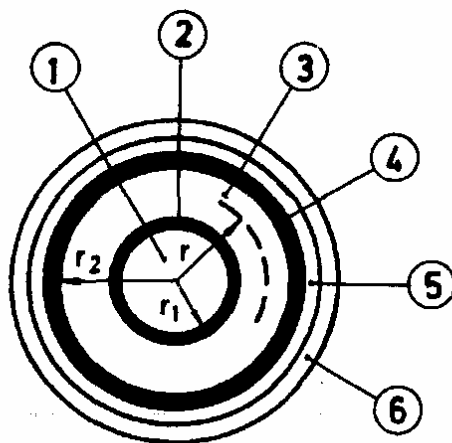
$$E_r = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad [\text{kV/mm}] \quad (13.1.)$$

gde je:

U - napon (kV),

r_1 - poluprečnik provodnika (unutrašnjeg ekrana) (mm),

r_2 - poluprečnik spoljašnjeg ekrana (metalnog plašta) (mm).



Sl. 13.1. Jednožilni kabl XHP

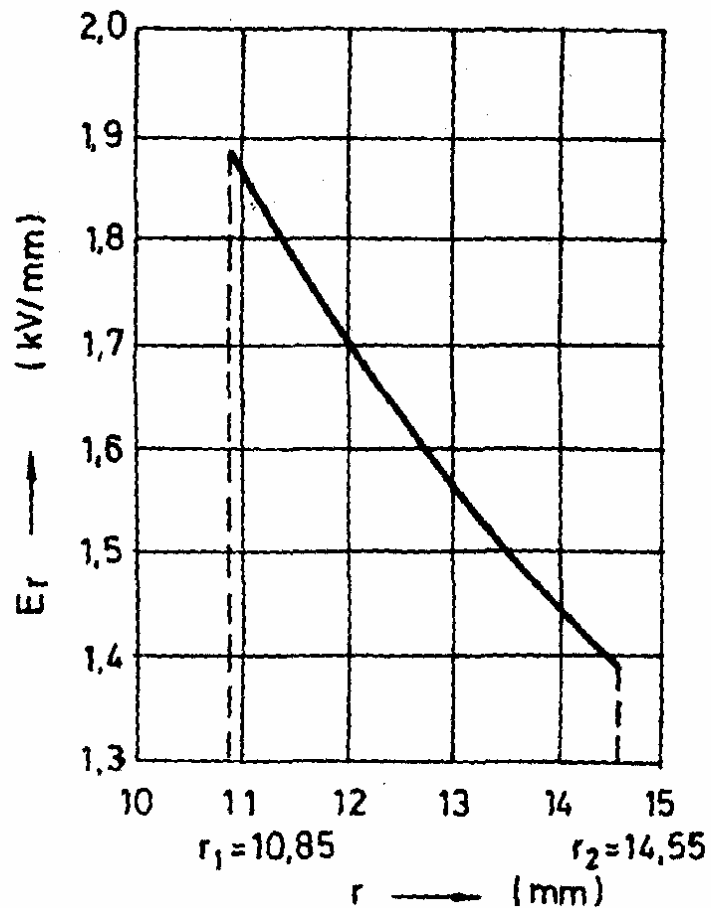
1 - provodnik; 2 - unutrašnji slaboprovodljivi sloj (ekran); 3 - XPE izolacija kabla; 4 - spoljašnji slaboprovodljivi sloj (ekran); 5 - električna zaštita (Cu-žice); 6 - PVC spoljašnji plašt.

Maksimalna jačina električnog polja je uz sam provodnik tj. unutrašnji ekran:

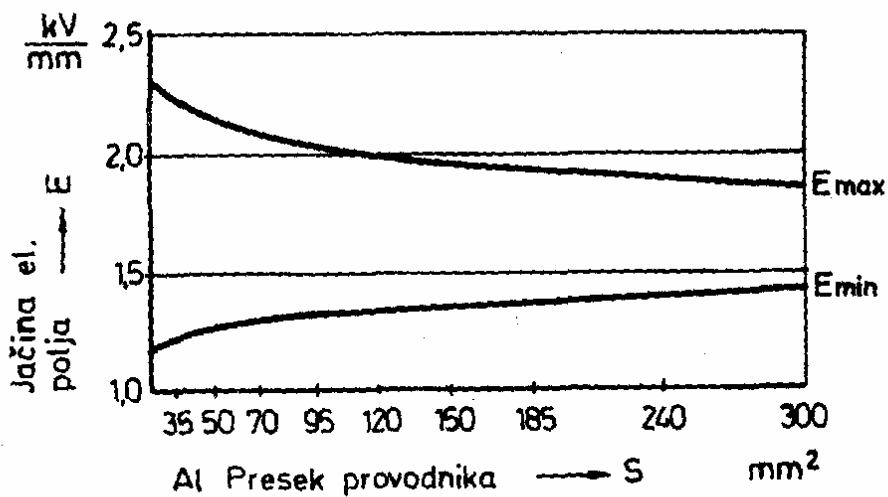
$$E_{\max} = \frac{U}{r_1 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad [\text{kV/mm}] \quad (13.2.)$$

a minimalna uz sam metalni plašt kabla tj. spoljašnji ekran:

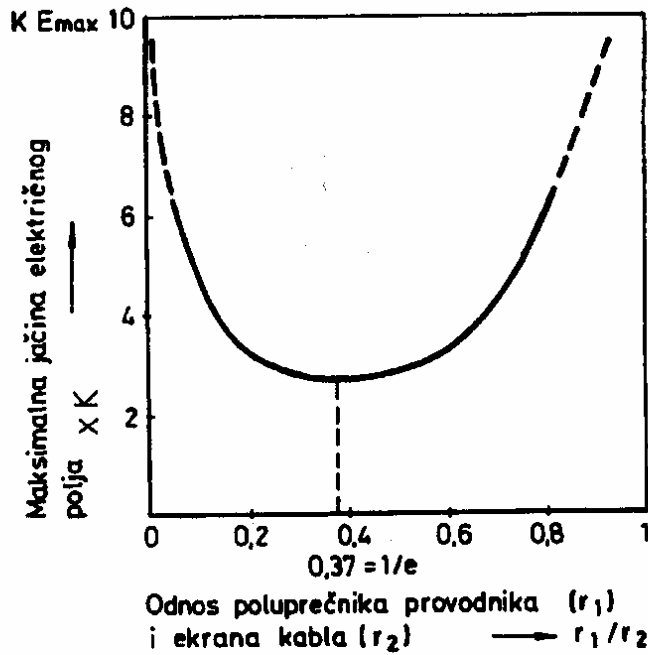
$$E_{\min} = \frac{U}{r_2 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad [\text{kV/mm}] \quad (13.3.)$$



Sl. 13.2. Jačina električnog polja kabla XHP 1×240/25 mm², 6/10 kV



Sl. 13.3. Ekstremne jačine električnog polja kabla XHP 48, 6/10 kV



Sl. 13.4. Maksimalna jačina električnog polja pri promeni odnosa r_1/r_2 i $K=r_2/U$

Koeficijent iskorišćenja izolacije je:

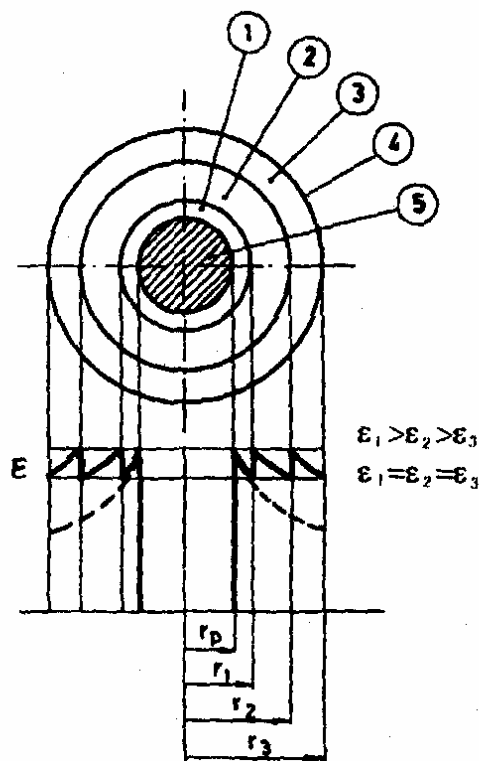
$$\eta = \frac{E_{sr}}{E_{max}} = \frac{\frac{U}{r_2 - r_1}}{\frac{U}{r_1 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}}} = \frac{r_1 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}}{r_2 - r_1} \quad (13.4.)$$

Maksimalna ječina električnog polja sa n slojeva izolacije se izračunava prema sledećoj formuli:

$$E = \frac{U}{\varepsilon_1 \cdot r_p \cdot \left[\frac{1}{\varepsilon_1} \cdot \ln \frac{r_1}{r_p} + \frac{1}{\varepsilon_2} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \dots + \frac{1}{\varepsilon_n} \cdot \ln \frac{r_n}{r_{n-1}} \right]} \quad [\text{kV/mm}] \quad (13.5.)$$

gde je:

- r_1 - poluprečnik prvog izolacionog sloja (mm),
- r_2, r_3, \dots, r_n - poluprečnici sledećih izolacionih slojeva (mm),
- $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ - relativne dielektrične konstante izolacionih slojeva poluprečnika r_1, r_2, \dots, r_n .



Sl. 13.5. Električno polje jednožilnog kabla sa više slojeva izolacije

- 1 - izolacioni sloj dielektrične konstante ϵ_1 ; 2 - izolacioni sloj dielektrične konstante ϵ_2 ;
3 - izolacioni sloj dielektrične konstante ϵ_3 ; 4 - metalni omotač (ekran); 5 - provodnik.

Maksimalne jačine električnog polja u pojedinim izolacionim slojevima biće jednake:

$$E_{1\max} = E_{2\max} = \dots = E_{n\max} \quad (13.6.)$$

ako je ispunjen uslov:

$$\epsilon_1 \cdot r_1 = \epsilon_2 \cdot r_2 = \dots = \epsilon_n \cdot r_n = \text{const} \quad (13.7.)$$

Debljina izolacije prema zemlji se određuje na osnovu izraza:

$$\Delta = \left(10^{\frac{U}{\sqrt{3} \cdot 2,3 \cdot r_1 \cdot E_p}} - 1 \right) \cdot r_1 \text{ [mm]} \quad (13.8.)$$

gde je:

E_p - pogonska jačina električnog polja, u stvari maksimalna jačina električnog polja, odnosno jačina električnog polja neposredno uz provodnik (kV/mm),

r_1 - poluprečnik provodnika (mm),

U - naznačen linijski napon (kV).

Pri konstruisanju kablova uvodi se i takozvani stepen sigurnosti koji se izračunava iz odnosa:

$$\frac{E_{PR}}{E_p} \quad (13.9.)$$

gde je:

- E_{pr} - jačina električnog polja pri probodu,
- E_p - jačina električnog polja (maksimalna).

Kod novih kablova ovaj pokazatelj je obično od 3 do 4. On se određuje eksperimentalno.

Tab. 13.1. Uobičajene pogonske (max) jačine električnog polja

Tip kabla	Pogonska jačina električnog polja E_p (kV/mm)
Papirni - "pojasni" kabl (papir impregnisan u uljnom kompaundu)	3 - 4 (max 4,5)
PVC kabl	3
PE kabl	3 - 10
XPE kabl	3 - 10
Uljni kabl niskog pritiska	8 - 10
Uljni kabl visokog pritiska	12 - 15

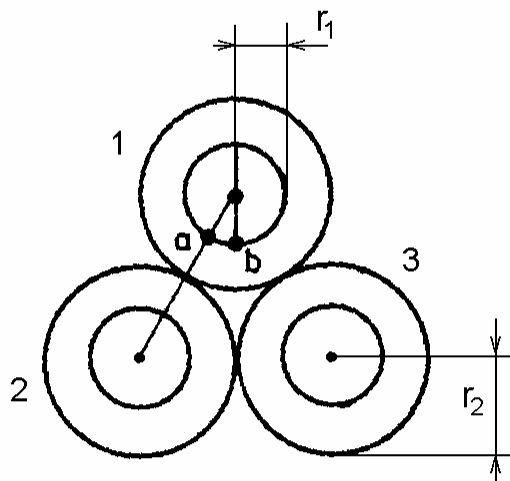
H.Đ. "Kablovi" - Jagodina za svoje konstrukcije kablova tipa XHE 48, 64/110 kV i slične sa debljinom izolacije od 18 mm daje maksimalnu jačinu električnog polja od 5,8 kV/mm (za presek 300 mm²) do 4,9 kV/mm (za presek 1000 mm²).

U kablju mogu postojati mesta gde jačina električnog polja prevazilazi vrednosti navedene u tabeli. To su mesta sa ukljućcima (vazdušni i dr.), mesta gde se susstiću dva dielektrika sa različitim dielektričnim konstatama i mesta se eksponiranim oblicima (oštre ivice, nezaokruženi oblici provodnika i sl.)

U sferičnim šupljinama jačina električnog polja se može skoro udvostručiti u odnosu na osnovni dielektrik. Šupljine mogu biti rezultat fabričkih propusta, a takođe različitih širenja konstruktivnih materijala kablja (na primer olova i ulja $k_{pb}=28 \times 10^{-6}$ 1/K, $k_u=8,3 \times 10^{-4}$ 1/K), na mestima gde se susstiću dva različita dielektrika na primer ulje ($\epsilon_r=2,2$) i papir ($\epsilon_r=3,5$) dolazi do povećanja električnog polja $3,5/2,2=1,6$ puta. Na neekranizovanim provodnicima gde su žice konveksne, a nalaze se delom okružene uljem a delom papirom jačina električnog polja može biti blizu 6 kV/mm ("pojasni", papirni kabl).

13.2. TROŽILNI KABL SA OKRUGLIM ŽILAMA

Jačina električnog polja višezilnih kablova menja se u ritmu naizmeničnog napona sve tri faze.



Sl. 13.6. Trožilni kabl sa okruglim žilama

U momentu kad je napon između žila 1 i 2 (sl. 13.6.) jednak linijskom naponu U najveće električno polje je u tački a.

U momentu kada je napon na žili najveći (U_0) na fazama 2 i 3 napon će biti upola manji ($-U_0/2$), pa je najveće polje u tački b.

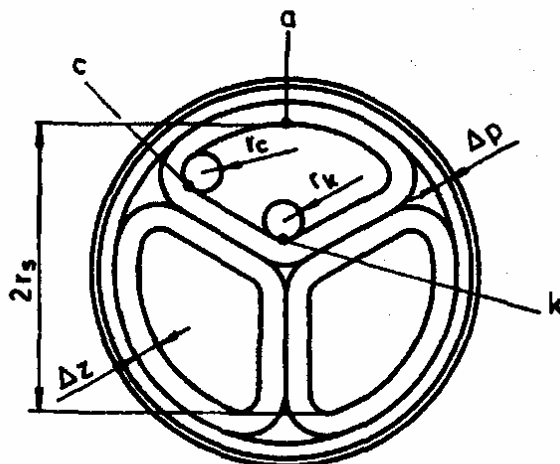
Maksimalna jačina električnog polja u tački a je:

$$E_{a \max} \approx \frac{U \cdot \sqrt{\frac{r_2 + 1}{r_1} + \frac{r_2 - 1}{r_1}}}{2r_1 \cdot \ln \left[\frac{r_2 + \sqrt{\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 - 1}}{r_1} \right]} \quad [\text{kV/mm}] \quad (13.10.)$$

Maksimalna jačina električnog polja u tački b je:

$$E_{b \max} \approx U \cdot \left(\frac{1}{r_2 - r_1} + \frac{0,18}{r_1} \right) \quad [\text{kV/mm}] \quad (13.11.)$$

13.3. TROŽILNI KABL SA SEKTORSKIM ŽILAMA



Sl. 13.7. Trožilni "pojasni" kabl sa sektorski žilama

Maksimalna jačina električnog polja u tački c (vidi sl. 13.7.):

$$E_{cmax} \approx \frac{U \cdot \frac{\frac{r_c + \Delta_z}{r_c}}{\frac{r_k + \Delta_z}{r_c} - 1}}{2r_c \cdot \ln \left\{ \frac{r_c + \Delta_z}{r_c} + \left[\left(\frac{r_c + \Delta_z}{r_c} \right)^2 - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}} \quad [\text{kV/mm}] \quad (13.12.)$$

Maksimalna jačina u tački k je:

$$E_{kmax} \approx \frac{U_0}{r_k \cdot \ln \frac{r_k + 1,55\Delta_z}{r_k}} \quad [\text{kV/mm}] \quad (13.13.)$$

Maksimalna jačina u tački a je:

$$E_{amax} \approx \frac{U_0}{r_s \cdot \ln \frac{r_s + \Delta_p + \Delta_z}{r_s}} \quad [\text{kV/mm}] \quad (13.14.)$$

13.4. KABLOVI JEDNOSMERNOG NAPONA

Kod naizmjeničnog napona raspodela električnog polja u dielektriku uslovljena je kapacitetom, dok je kod jednosmernog napona uslovljena otporom dielektrika. Kad je kabl jednosmernog napona (jednosmerni kabl) bez opterećenja, tj. nezagrejan raspodela potencijala i jačine električnog kabla u dielektriku je kao i kod kabla sa naizmjeničnim naponom. Kad se jednosmerni kabl strujno optereti onda će slojevi dielektrika uz provodnik biti najzagrejaniji. Električna provodnost konvencionalnih dielektrika zavisi od temperature i to tako da raste sa temperaturom. Zbog toga je jačina električnog polja manja uz provodnik nego uz metalni plašt kabla. Pri tome se specifična električna provodnost menja prema eksponencijalnom zakonu. Kod PE kablova specifična električna provodnost zavisi pored temperature i od jačine električnog polja.

14. NAPON KABLA

Napon kabla treba da ispuni opšti uslov:

$$U = \sqrt{3} \cdot U_0 \geq U_n \quad (14.1.)$$

gde je:

U/U_0 - naznačeni napon kabla (U - linijski, U_0 - fazni napon),
 U_n - nazivni linijski napon mreže.

Takođe važi uslov:

$$U_m \geq U_{pm} \quad (14.2.)$$

gde je:

U_m - najviši linijski napon kabla,
 U_{pm} - najviši linijski napon mreže.

Izolacija kabla se naponski napreže pri zemljospoju koji može trajati kraće ili duže, zavisno od načina uzemljenja zvezdišta električne mreže i relejne zaštite.

Prema IEC Standard Publication 183: Guide to the selection of high-voltage cables, 4.2. System categories, električne mreže se dele zavisno od trajanja zemljospoja na tri vrste:

- **Vrsta A:** Električne mreže kod kojih se zemljospoj isključuje brzo koliko je moguće, a ne duže od 1 min.
- **Vrsta B:** Ovoj vrsti pripadaju one električne mreže, koje rade u stanju greške u kratkom vremenu samo sa zemljospojem u jednoj fazi. Taj period uopšte ne prelazi 1 h, a duži period se može dopustiti ako je određeno odgovarajućim standardom za kabl.
Ako se očekuje da električna mreža često radi u stanju greške sa trajnim zemljospojem, ekonomično je uvrstiti dotičnu mrežu u sledeću vrstu, vrstu C.
- **Vrsta C:** Električne mreže koje ne pripadaju vrstama A i B.

Vrsti A pripadaju električne mreže sa uzemljenjem zvezdišta preko niskoomskog otpora.

Vrsti B pripadaju električne mreže sa izolovanim zvezdištem i mreže sa kompenzacijom struje zemljospoja.

Tab. 14.1. Naponi kablova i trofaznih električnih mreža
 U_0 - fazni napon; U_m , U_n , U_{pm} - linijski naponi

Kabl		Trofazna mreža		Nazivni podnosivi atmosferski udarni napon (kV)
• napon kablova: U/U_0 • najviši napon kablova: U_m		• napon mreže: U_n • najviši napon mreže (pogonski): U_{pm}		
U_0/U (kV)	U_m (kV)	U_n (kV)	U_{pm} (kV)	(temena vrednost)
0,6/1 ¹⁾	1,2	1	1,2	-
1,8/3 ¹⁾	3,6	3	3,6	40 ²⁾
3,6/6 ¹⁾	7,2	6	7,2	60 ²⁾
6/10 ¹⁾	12	10	12	75 ²⁾
8,7/15	17,5	15	17,5	95
12/20 ¹⁾	24	20	24	125 ²⁾
18/30	36	30	36	170
20/35 ³⁾	38	35	38	170 ⁴⁾
26/45	52	45	52	Od napona $U_0/U=26/45$ kV pa navise debljina izolacije je izabrana i ispitana prema predviđenim naprezanjima (vidi 1.8. KOORDINACIJA IZOLACIJE i IEC 71-1)
36/60	72,5	60	72,5	
64/110 ¹⁾	123	110	123	
76/132	145	132	145	
87/150	170	150	170	
127/220 ¹⁾	245	220	245	
220/380 ¹⁾	420	380	420	
Prema DIN VDE 0298, IEC 183, IEC 71-1		Prema Din VDE 0101 i 0111		Prema DIN VDE 0111, 0298, IEC 71-1

Tab. 14.2. Izbor kablova zavisno od vrste B i C

Vrsta kablova	Naznačeni napon kablova U_0/U (kV)	Pogon mreže sa zemljospojem	
		Vrsta B	Vrsta C
		Trajanje jednog zemljospoja max 8 h godišnji zbir zemljospojeva 125 h	Duže trajanje zemljospoja no u vrsti B
		Naznačeni napon kablova U_0/U (kV)	Naznačeni napon kablova U_0/U (kV)
"Pojasni" kabl (sa papirnom izolacijom)	3,6/6	3,6	6/6 (6/10) ⁵⁾
	6/10	6/10	8,7/10 (8,7/15) ⁶⁾
Kablovi sa radialnim sektorskim poljem, sa izolacijama: papir, PE, XPE i EPR	3,6/6	3,6/6	6/10
	6/10	6/10	8,7/15
	12/20	12/20	18/30
	20/35	20/35	26/45

Naš nacionalni propis, Pravilnik o tehničkim normativima za uzemljenje elektroenergetskih postrojenja nazivnog napona iznad 1000 V (Sl. list SRJ, br. 61 od 22.XII 1995. god.) u čl. 16 predviđa za mreže sa izolovanom neutralnom tačkom ili mrežom sa kompenzacijom struje zemljospoja da zemljospoj ne traje duže od 2 h. Ovo vreme u osnovi nije određeno sa gledišta izdržljivosti izolacije aparata na povišeni napon, već na osnovu verovatnoće nastanka dvostrukog zemljospoja.

¹⁾ Vrednosti koje daje i JUS N. A2. 001 (1989.)

²⁾ Vrednosti koje daje i JUS N. B0. 030 (1989.)

³⁾ Vrednost koju daje JUS N. A2. 001, a ne predviđaju navedeni standardi DIN VDE i IEC

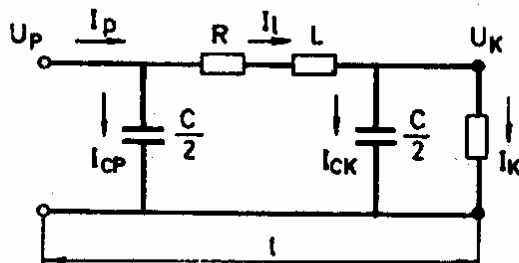
⁴⁾ Vrednost koju daje JUS N. B0. 030, a ne predviđaju navedeni standardi DIN VDE i IEC

⁵⁾ U standardnoj proizvodnji kabl 6/6 ne postoji, pa se uzima 6/10 kV

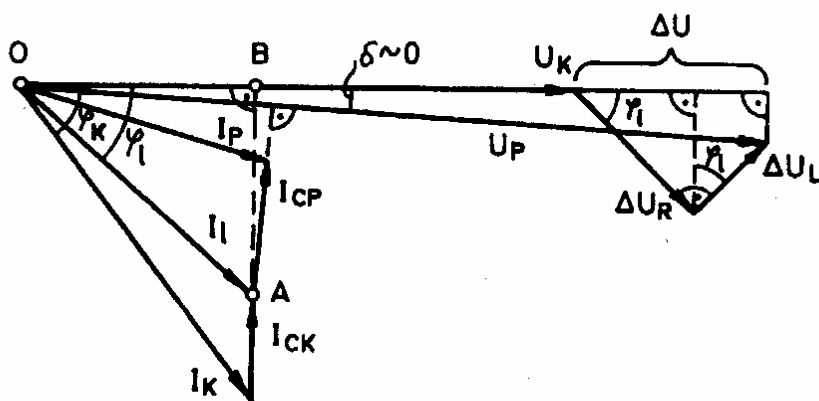
⁶⁾ Objašnjenje isto kao pod ⁵⁾

15. PAD NAPONA

Na sl. 15.1. prikazana je električna šema kablovskog voda sa koncentrisanim parametrima.



Sl. 15.1. Kablovski vod sa koncentrisanim parametrima



Sl. 15.2. Dijagram napona i struja kablovskog voda

Kako je ugao δ između napona na početku (U_p) i na kraju kablovskog voda (U_k) mali, pad napona je (V):

$$\Delta U \approx \sqrt{3} \cdot I_l \cdot L \cdot (R_{\text{efj}} \cdot \cos \varphi_l + X_{Lj} \cdot \sin \varphi_l) \quad (15.1.)$$

gde je:

- I_l - struja u kablovskom vodu (sl. 15.1.) (A),
- L - dužina kablovskog voda (km),
- R_{efj} - podužni efektivni otpor kablovskog voda (Ω/km),
- X_{Lj} - podužni induktivni otpor kablovskog voda (Ω/km),
- φ_l - ugao između struje I_l i napona na kraju kablovskog voda.

Takođe postoje i sledeće veze (vidi 12.3.2. Struja punjenja)

$$I_{cp} = \frac{U_p \cdot \omega \cdot C_{pj} \cdot L}{2\sqrt{3}} \cdot 10^{-3} \quad (A) \quad (15.2.)$$

$$I_{cp} = \frac{U_p \cdot \omega \cdot C_{pj} \cdot L}{2\sqrt{3}} \cdot 10^{-3} \quad (A) \quad (15.3.)$$

gde je:

U_p - linijski napon na početku kablovskog voda (kV),

U_k - linijski napon na kraju kablovskog voda (kV),

C_{pj} - podužni pogonski kapacitet kablovskog voda ($\mu F/km$).

$$\Delta U_R = \sqrt{3} \cdot I_l \cdot R_{efj} \cdot L \quad (V) \quad (15.4.)$$

$$\Delta U_r = \sqrt{3} \cdot I_l \cdot X_{Lj} \cdot L \quad (V) \quad (15.5.)$$

$$I_l = \sqrt{(I_k \cdot \cos \varphi_k)^2 + (I_k \cdot \sin \varphi_k - I_{ck})^2} \quad (A) \quad (15.6.)$$

Ugao φ_1 se može odrediti iz trougla OAB (sl. 15.2.):

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{\overline{AB}}{\overline{OB}} = \frac{I_k \cdot \sin \varphi_k - I_{ck}}{I_k \cdot \cos \varphi_k} \quad (15.7.)$$

Na taj način, poznavajući osobine potrošača (U_k , I_k , $\cos \varphi_k$), može se odrediti pad napona u kablovskom vodu.

Napon na početku kablovskog voda je (kV):

$$U_p = \sqrt{(10^3 \cdot U_k \cdot \cos \varphi_1 + \Delta U_R)^2 + (10^3 \cdot U_k \cdot \sin \varphi_1 + \Delta U_L)^2} \cdot 10^{-3} \quad (15.8.)$$

gde je U_k u (kV) i ΔU_R u (V).

Ako su u pitanju kraće kablovske deonice ili ako je pak napon niži od 10 kV udeo kapacitivnih struja se može zanemariti. Stoga za niski napon važi (vidi sl. 15.3.):

$$\Delta U \approx \sqrt{3} \cdot I_l \cdot L \cdot (R_{efj} \cdot \cos \varphi + X_{Lj} \cdot \sin \varphi) = \sqrt{3} \cdot I \cdot L \cdot B \quad (15.9.)$$

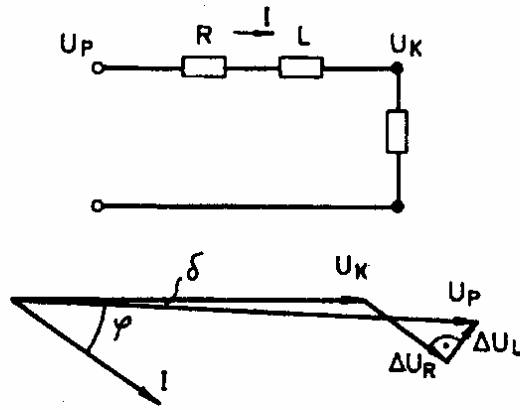
$$\Delta U\% = 100 \cdot \frac{P \cdot L \cdot (R_{efj} \cdot \cos \varphi + X_{Lj} \cdot \sin \varphi)}{U^2 \cdot \cos \varphi} = 100 \cdot \frac{P \cdot L \cdot B}{U^2 \cdot \cos \varphi} \quad (15.10)$$

gde je:

P - trofazna snaga opterećenja (kW),

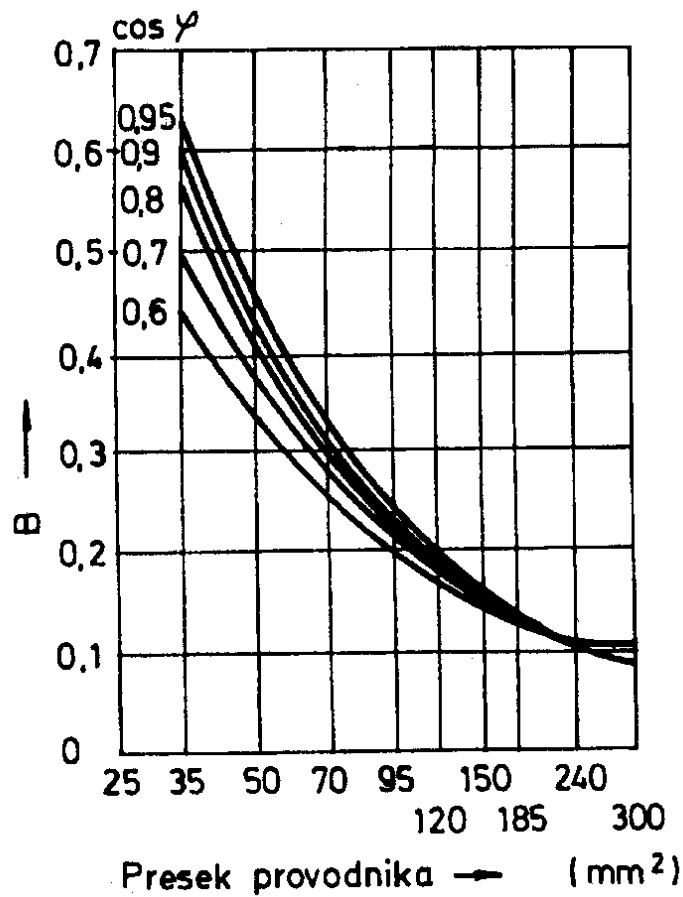
U - linijski napon (V),

B - vidi sl. 15.4. i 15.5.

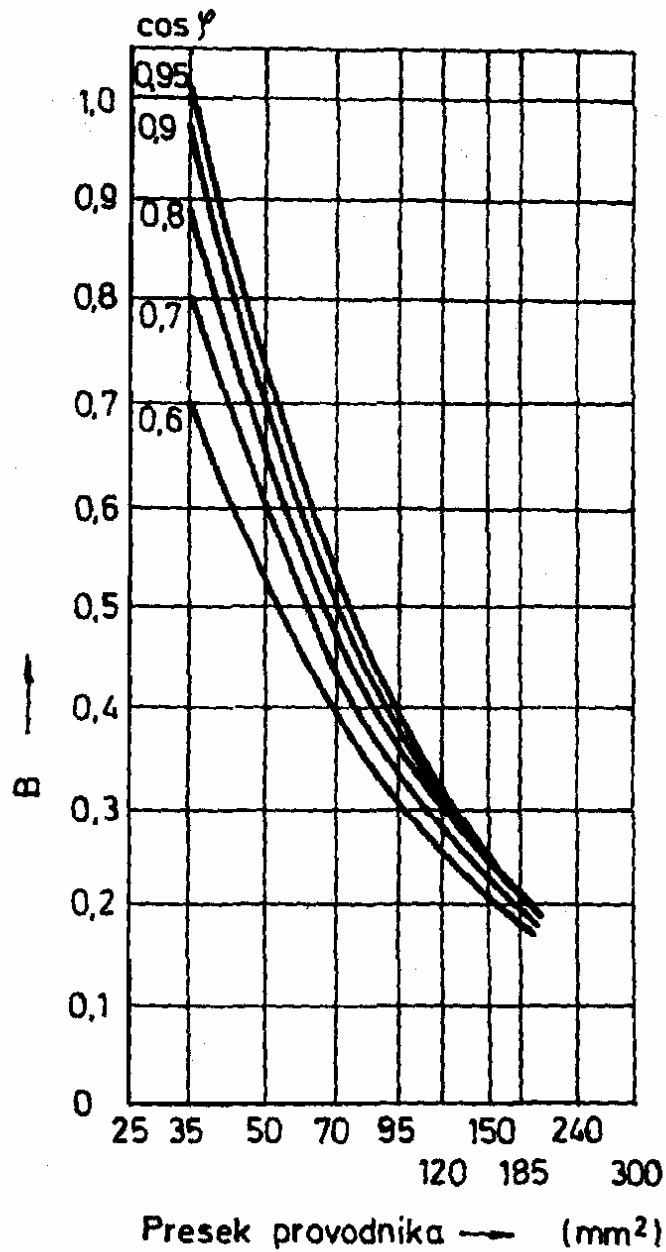


Sl. 15.3. Električna šema i dijagram niskonaponskog kablovskog voda

$$\cos \delta = \frac{U_k + \Delta U \cdot 10^{-3}}{U_p}$$



Sl. 15.4. $B = R_{eff} \cdot \cos \varphi + X_{ij} \cdot \sin \varphi$ za $\cos \varphi = 0,95 - 0,9 - 0,8 - 0,7 - 0,6$ kabla PP00 S $3 \times \dots + \dots$, 0,6/1 kV



Sl. 15.5. $B = R_{eij} \cdot \cos \varphi + X_{ij} \cdot \sin \varphi$ za
 $\cos \varphi = 0,95 - 0,9 - 0,8 - 0,7 - 0,6$ kabla PP00 ASJ $3 \times \dots + \dots$, 0,6/1 kV

16. IZBOR KABLOVA VISOKOG NAPONA

Da bi se odredio odgovarajući tip i konstrukcija kabla potrebno je raspolagati sa sledećim podacima:

USLOVI POGONA KABLA

- a) Nominalni napon sistema,
- b) Najveći napon sistema,
- c) Prenapon atmosferskog porekla,
- d) Frekvencija,
- e) Tip uzemljenja zvezdišta sistema (gde je neutralna tačka sistema neefikasno uzemljena, maksimalno dozvoljeno trajanje zemljospoja, pojedinačno i ukupno u toku jedne godine),
- f) Kablovske glave
 - nadmorska visina,
 - spoljašnja i unutrašnja montaža,
 - očekivano atmosfersko zaprljanje
 - tip postrojenja u koji se priključuje kabl (klasično, u SF₆ tehnicima),
 - rastojanje i izolacija korišćenja za priključak kabla na postrojenje
- g) Najveća naznačena struja
 - za stalno, tzv. 100% opterećenje (prema IEC 287),
 - za ciklično opterećenje (za utvrđeni dijagram opterećenja),
 - za nužni pogon,
 - za preopterećenje (za temperaturu provodnika iznad trajno dozvoljene - koju dozvoljava proizvođač).
- h) Očekivane simetrične i nesimetrične struje kratke veze koje mogu teći u slučaju kratkog spoja (u stvari struje kroz provodnik i metalni plašt kabla),
- i) Maksimalno vreme za koje struje kratkog spoja mogu teći,
- j) Uticaj struje zemljospoja za telekomunikacione vodove (TK)¹⁾
- k) Visina dozvoljenog napona uzemljivača postrojenja²⁾.

¹⁾ Potreba za smanjenjem uticaja na TK vodove može dovesti i do konstruktivnih promena na kablovima, tj. do povećanja preseka električne zaštite kabla (povećanje faktora redukcije kabla).

²⁾ I ovaj zahtev može voditi ka smanjenju faktora redukcije kabla.

TRASA KABLA

a) Opšte

- dužina i profil trase,
- detalji o položaju žila kabla (u ravni, u obliku "deteline" - trougla). Kako su povezani i uzemljeni metalni plaševi kabla (na jednom kraju, na oba, transpozicijom tzv. Crossbonding),
- specijalni uslovi polaganja kabla (na primer kabl preko mostova, voda, u blizini jednosmerne vuče).

b) Ukopavanje kabla

- detalji o postavljanju kabla (direktno ukopan u zemlju, u cevima itd.) koji omogućuju da se izaberu odgovarajući spoljašnji plašt kabla (vrsta i sastav metalnog omotača - na primer otporan na vibracije, mehanička zaštita, zaštitni omotači - na primer antikorozioni, otporni na gorenje, na termite i dr.),
- dubina polaganja,
- specifični toplotni otpor zemljišta (meren u sušnom i vlažnom periodu) i vrsta zemljišta duž trase,
- ekstremne i središnja temperature zemljišta na dubini polaganja kablova,
- obližnji kablovi i drugi toplotni izvori - sa detaljima položaja i dr.,
- dužina cevi, sa položajem okana,
- broj cevi,
- unutrašnji prečnik cevi,
- međusobno rastojanje cevi,
- materijal cevi,
- kabl u vazduhu,
- ekstremne i srednja temperatura vazduha,
- način postavljanja kabla (na primer: na zidu, na regalu, način grupisanja kabla, dimenzije galerije, cevi i dr.),
- detalji ventilacije (kabl u galeriji sa drugim instalacijama, cevi),
- da li je kabl izložen neposrednom zračenju sunca?
- posebni uslovi (na primer: izloženost riziku od vatre).

IZOLACIONI NIVO KABLA

Sa gledišta izolacionog nivoa kabla postoje tri reda: A, B i C. Definicije redova A, B i C kao i izbor napona dati su u poglavlju 14. NAPON KABLA.

IZBOR PRESEKA PROVODNIKA

Predviđa se izbor preseka provodnika kabla na osnovu odgovarajućeg standarda kabla. Ukoliko za izabrani provodnik standard ne postoji onda se koristi IEC Publication 228: Conductor of Insatalled Cables,

Za izbor preseka provodnika uzimaju se u obzir sledeći faktori:

Maksimalna temperatura koja se javlja pri stalnom opterećenju (tzv. 100% opterećenje), cikličnom opterećenju, nužnom opterećenju i kratkospojnom stanju,

Mehanička naprezanja koja se javljaju u kابلu pri polaganju i pogonu,
Električno naprezanje izolacije (mali prečnici provodnika vode ka neprihvatljivo visokom električnom naprežanju izolacije).

ZAVRŠAVANJE KRAJEVA KABLA

Konstrukcija kablovskih glava zavisi od podnosivog udarnog napona (koji može biti različit od vrednosti za kabl), Stepena izloženosti atmosferskom zaprljanju kao i od nadmorske visine.

Ova problematika je regulisana aktom: IEC Publication 183 (1984.) - Guide to the Selection of High Voltage Cables.

17. STRUJNA OPTERETLJIVOST

Proračun strujne opteretljivosti kablova u nenarušenom režimu rada električne mreže sa gledišta prirode problema i metoda proračuna, može se svrstati u dve grupe:

- stalno strujno opterećenje (faktor opterećenja $m=1$ - tzv. 100% opterećenje) i
- promenljivo strujno opterećenje.

Postupak proračuna dozvoljene struje u kابلu pri stalnom opterećenju dat je međunarodnim standardom: *IEC Publication 287 - Calculation of the continuous current rating of cables (100% load factor)*. U njemu je učinjena pretpostavka da se zemljište u okolini kablova neće isušivati. Međutim, činjenice zasnovane na ispitivanjima i merenjima govore drugačije. Da bi se prekomerno zagrevanje kablova izbeglo, strujne vrednosti dobijene po postupku IEC 287 za stalno opterećenje treba smanjiti za 25% (faktor korekcije 0,75) ili pri proračunu uzeti u obzir odgovarajuću, višu, vrednost specifičnog toplotnog otpora zemljišta.

Problem isušivanja zemljišta se vrlo zaoštio primenom kablova sa visokom radnom temperaturom (na primer kablovi izolovani XPE-om, $\theta_{pd}=90^{\circ}$ C). Temperatura površine ovih kablova je oko 75° C pa čak i viša, za razliku od papirnih kablova kod kojih je temperatura površine oko 45° C (kablovi 10 kV, $\theta_{pd}=65^{\circ}$ C).

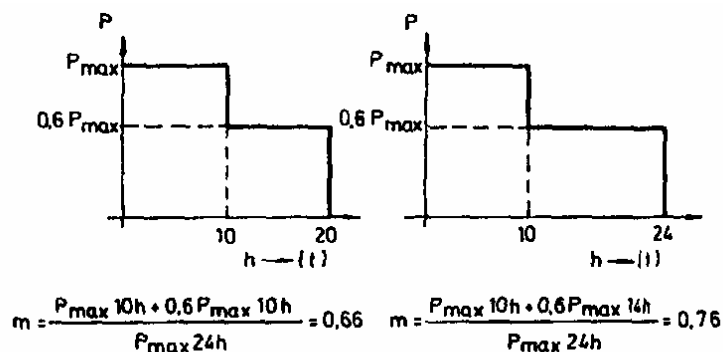
Starim nemačkim propisima, da bi se izbeglo isušivanje zemljišta, bila je ograničena temperatura površine visokonaponskih kablova (>60 kV) na 40° C, za temperaturu zemljišta od 15° C.

Nemačkim propisima određen je tip dijagrama opterećenja koji odgovara ovako proračunatim strujama. To je tzv. elektrodistributivno opterećenje (EVU-Last) a definisano je na sledeći način: Elektrodistributivno opterećenje se sastoji od perioda trajanja 10 časova sa maksimalnim opterećenjem, posle koga sledi najmanje isti period trajanja sa 60% maksimalnog opterećenja.

Faktor opterećenja m EVU-dijagrama (VDE 0255) varira od 0,66 do 0,76.

Faktor opterećenja je po definiciji:

$$m = \frac{\int_0^{24} P(t) dt}{P_{\max} \cdot 24 \text{ h}} \quad (17.1.)$$



Sl. 17.1. EVU-opterećenje; m - faktor opterećenja

Prema *DIN VDE 0298 Teil 2: VDE Bestimmung für Verwendung von Kabeln und isolierten Leitungen für Starkstromanlagen-Empfohlene Werte für Strombelastbarkeit von Kabeln mit Nennspannungen U_0/U bis 18/30 kV* osnovne vrednosti strujnih opterećenja date ovim standardom važe za $m=0,7$; $\theta_z=20^\circ\text{C}$ i $\rho_z=1 \text{ Km/W}$. Za druge vrednosti m , θ_z , ρ_z i broj kablova dati su korekcionni faktori.

17.1. STALNO STRUJNO OPTEREĆENJE ($m=1$)

17.1.1. KABL U ZEMLJIŠTU

17.1.1.1. Jedan kabl

Dozvoljeno opterećenje jednog kabla u zemljištu dato je izrazom¹⁾:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta_p}{N \cdot R_{\text{efj}} \cdot (T_{\text{kf}} + T_z)} \cdot 10^3} \text{ [A]} \quad (17.2.)$$

gde je:

$\Delta\theta_p = \theta_{\text{pd}} - \theta_z$ - dozvoljena nadtemperatura provodnika iznad okoline (K),

θ_{pd} - maksimalna dozvoljena trajna temperatura provodnika ($^\circ\text{C}$), zavisi od izolacije (vidi tabele 5.2., 5.3. i 5.8.),

θ_z - temperatura zemljišta ($^\circ\text{C}$),

R_{efj} - podužni efektivni otpor provodnika pri maksimalnoj dozvoljenoj trajnoj temperaturi (Ω/km), vidi poglavlje 6. Provodnik,

T_{kf} - fiktivni toplotni otpor kabla (Km/W),

T_z - toplotni otpor zemljišta (Km/W) i

N - broj strujno opterećenih provodnika.

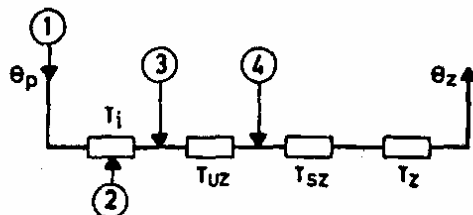
¹⁾ Dielektrični gubici nisu uzeti u obzir.

Fiktivni toplotni otpor¹⁾ kabla je:

$$T_{kf} = \frac{T_i + (1 + \lambda_0) \cdot T_{uz}}{1 + \lambda_0 + \lambda_M} + T_{sz} \quad [Km/W] \quad (17.3)$$

gde je:

- T_i - toplotni otpor izolacije (Km/W),
- T_{uz} - toplotni otpor unutrašnje zaštite (Km/W),
- T_{sz} - toplotni otpor spoljašnje zaštite (Km/W),
- λ_0 i λ_M - faktori dati u IEC 287²⁾.



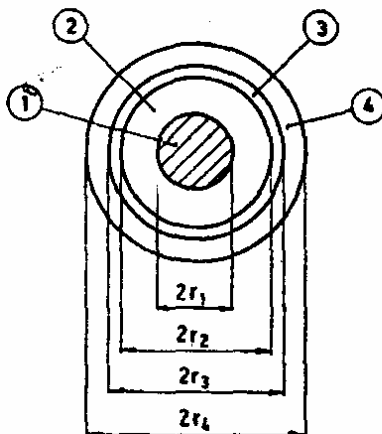
Sl. 17.1a. Šema prenošenja toplote sa provodnika kabla na zemljišta

- 1 - gubitci u provodniku; 2 - dielektrični gubitci; 3 - gubitci u metalnom plaštu;
- 4 - gubitci u mehaničkoj zaštiti; T_i - toplotni otpor izolacije;
- T_{uz} - toplotni otpor unutrašnje zaštite, T_{sz} - toplotni otpor spoljašnje zaštite,
- T_z - toplotni otpor zemljišta, θ_p - temperatura provodnika kabla, θ_z - temperatura zemljišta.

Toplotni otpor jednožilnog kabla sa n slojeva je:

$$T_k = \frac{1}{2\pi} \cdot \sum_{k=1}^n \rho_k \cdot \ln \frac{r_{k+1}}{r_k} \quad [Km/W] \quad (17.4)$$

gde je ρ_k specifični toplotni otpor k-tog koncentričnog sloja.



Sl. 17.2. Jednožilni kabl

- 1 - provodnik; 2 - izolacija; 3 - ekran - metalni omotač; 4 - spoljašnji omotač.

¹⁾ Toplotni otpor koji se suprotstavlja toploti koja bi se sva stvarala u provodniku (izuze dielektričnih gubitaka).

²⁾ λ_0 - odnos gubitaka u metalnom plaštu i ukupnih gubitaka u provodniku; λ_M - odnos gubitak u metalnoj mehaničkoj zaštiti i ukupnih gubitaka u provodniku.

Toplotni otpor jednožilnog kabla prikazanog na slici 17.2. je:

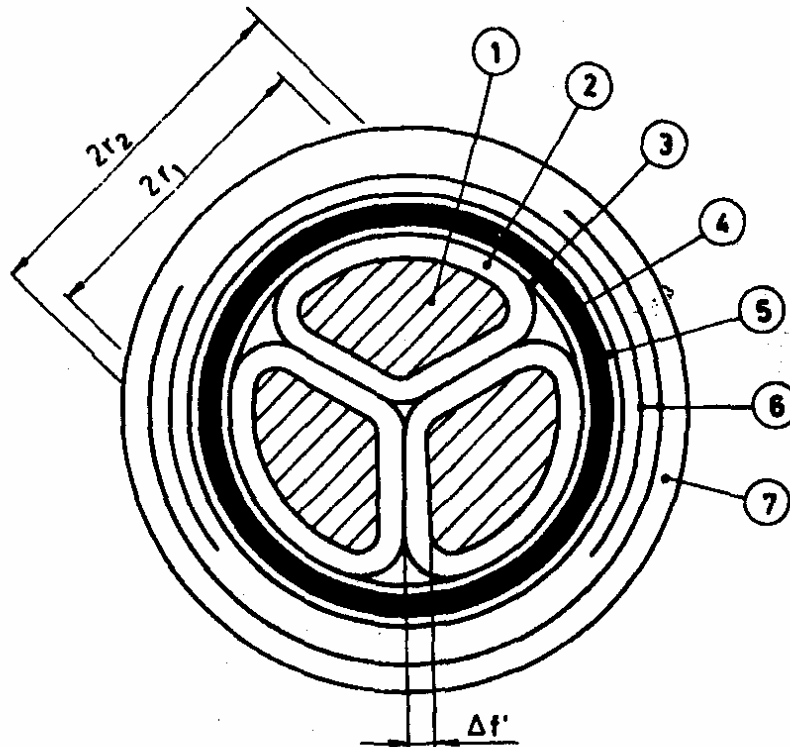
$$T_k = T_i + T_{sz} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\rho_i \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \rho_{sz} \cdot \ln \frac{r_4}{r_3} \right) \quad [\text{Km/W}] \quad (17.5.)$$

gde je:

ρ_i - specifični toplotni otpor izolacije (Km/W),

ρ_{sz} - specifični toplotni otpor spoljašnje zaštite - plašta (Km/W),

r_1, r_2, r_3, r_4 - prema slici, u istim jedinicama.



Sl. 17.3. "Pojasni" kabl tipa IPO 13, 10 kV

1 - provodnik; 2 - papirna izolacija žile; 3 - pojasna izolacija; 4 - olovni plašt;
5 - unutrašnji zaštitni sloj; 6 - dve čelične trake; 7 - spoljnji zaštitni sloj.

Toplotni otpor izolacije, bez pojasne izolacije, trožilnog kabla sa sektorskim provodnicima (sl. 17.3.) se svodi na jednožilni:

$$T_{i3} \approx \frac{2r_1 \cdot \pi}{2r_1 \cdot \pi - 6\Delta f} \cdot T_{i1} \quad [\text{Km/W}] \quad (17.6.)$$

gde je:

T_{i1} - toplotni otpor izolacije jednožilnog kabla (Km/W),

Δf - debljina izolacije u jedinicama kao r_1 .

Toplotni otpor izolacije, takođe bez pojasne izolacije, četvorpola kabla sa sektorskim provodnicima je:

$$T_{is} \approx \frac{2r_1 \cdot \pi}{\frac{3}{4}(2r_1 \cdot \pi - 6\Delta f)} \cdot T_{ii} \text{ [Km/W]} \quad (17.7.)$$

U dokumentu IEC 287 daje se detaljni postupak proračuna toplotnog otpora kablova.

Za "pojasne" kablove toplotni otpor izolacije za jedan provodnik je:

$$T_{ii} = \frac{\rho_i}{2\pi} \cdot G \text{ [Km/W]} \quad (17.8.)$$

Geometrijski faktor za tri sektorska provodnika je:

$$G = 3F_2 \cdot \ln \frac{d_a}{2r_1}$$

gde je:

$$F_2 = 1 + \frac{3t}{2\pi(d_x + t) - t}$$

d_a - srednji prečnik mehaničke zaštite (mm),

r_1 - poluprečnik opisanih provodnika (mm),

d_x - prečnik ekvivalentnog okruglog provodnika (mm),

t - debljina izolacije između provodnika (mm).

Za druge tipove kablova vidi IEC 287.

Tab. 17.1. Specifični toplotni otpori nekih materijala

Materijal	Specifični toplotni otpor (Km/W)
<u>Izolacija</u>	
• papir impregnisan u uljnom kompaundu	5,0-6,0
• papir u uljnim kablovima	5,0
• PE	3,5
• XPE	3,5
• PVC	
do 3 kV	5,0
iznad 3 kV	6,0
• EPR	
do 3 kV	3,5
iznad 3 kV	5,0
• Butil guma	5,0
• Guma	5,0
<u>Zaštitni slojevi - plaševi</u>	
• Juta impregnisana u kompaundu	6,0
• Guma u sloju	6,0
• Polihloropen	5,5
• PVC	
do 35 kV	5,0
iznad 35 kV	6,0
<u>Cevi u koje se uvlače kablovi</u>	
• Betonske	1,0
• Azbestne	2,0
• PVC	7,0
• PE	3,5
• Keramičke	1,2

Kako se često poznaje naznačena¹⁾ struja kabla:

$$I_n = \sqrt{\frac{\Delta\theta_{pn}}{N \cdot R_{efj} \cdot (T_{kf} + T_{zn})}} \cdot 10^3 \text{ [A]} \quad (17.9.)$$

gde je:

$$\Delta\theta_{pn} = \theta_{pd} - 20$$

T_{zn} - za specifični toplotni otpor zemljišta $\rho_{zn}=1$ Km/W i dubinu ukopavanja kabla $h_n=70$ cm (za kablove 1 i 10 kV).

Iz sledećeg izraza se lako dolazi do T_{kf} :

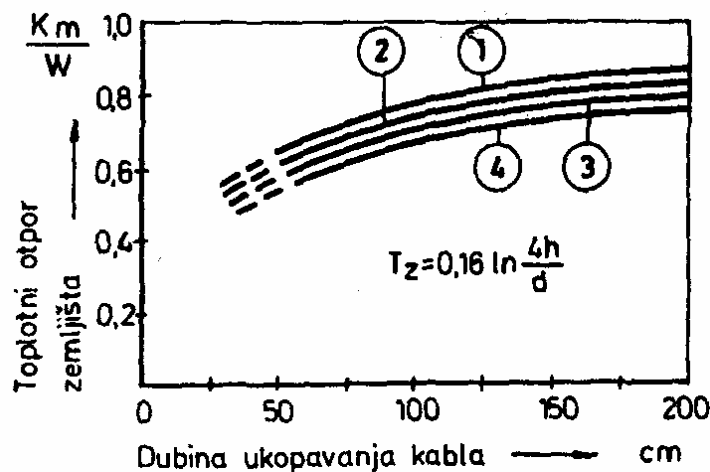
$$T_{kf} = \frac{\Delta\theta_{pn}}{W_n} - T_{zn} \text{ [Km/W]} \quad (17.10.)$$

gde je W_n - Džulovi gubici u kablju pri I_n , $W_n = N \cdot R_{efj} \cdot I_n^2$ [kW/Km]

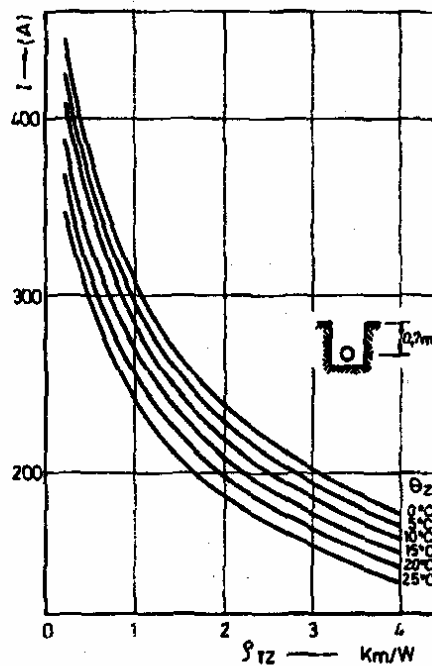
¹⁾ Ranije su korišćeni izrazi nominalna odnosno nazivna struja kablova, ali se sa standardom JUS N. A0. 151 uveo izraz naznačena struja. To je struja koju daje proizvođač kablova. Isto tako važi za napon idr. Ali za el. mreže ostaje, na primer: el. mreža nazivnog napona 10 kV.

Tab. 17.2. Izrazi za toplotni otpor zemljišta i strujnu opteretljivost trofaznih kablova

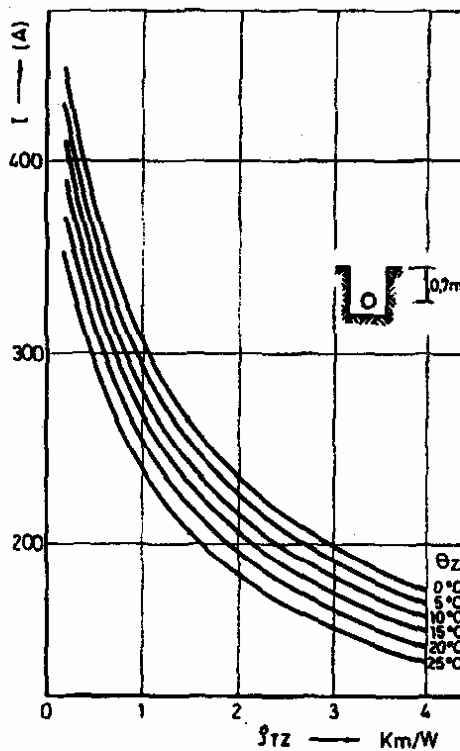
Tip kabla		
Trožilni i četvorožilni	Tri jednožilna	
	Položeni u snopu	Položeni u horizontali
Toplotni otpor zemljišta		
$T_z = \frac{\rho_z}{2\pi} \cdot \ln \frac{h + \sqrt{h^2 - \frac{d^2}{4}}}{\frac{d}{2}} \approx \frac{\rho_z}{2\pi} \cdot \ln \frac{4h}{d}$	$T_z = \frac{\rho_z}{2\pi} \cdot \left(\ln \frac{4h}{d} + 2 \ln \frac{2h}{d} \right)$	$T_z = \frac{\rho_z}{2\pi} \cdot \left[\ln \frac{4h}{d} + 2 \ln \sqrt{\frac{4h^2}{a^2} + 1} \right]$
Dozvoljeno strujno opterećenje (m=1)		
$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta_p \cdot 10^3}{3R_{eff} \cdot (T_{kt} + T_z)}}$		$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta_p \cdot 10^3}{R_{eff} \cdot (T_{kt} + T_z)}}$



Sl. 17.4. Toplotni otpor zemljišta za $\rho_z=1 \text{ Km/W}$ u zavisnosti od dubine ukopavanja kabla h
 1 - IPO 13 3×10 mm^2 , 10 kV; 2 - IPO 13 3×25 mm^2 , 10 kV;
 3 - IPO 13 3×95 mm^2 , 10 kV; 4 - IPO 13 3×300 mm^2 , 10 kV



Sl. 17.5. Dozvoljena strujna opteretljivost kabla IPO 13 - S $3 \times 95 \text{ mm}^2$, 10 kV u zavisnosti od specifičnog toplotnog otpora zemljišta ρ_z za različite temperature zemljišta θ_z .

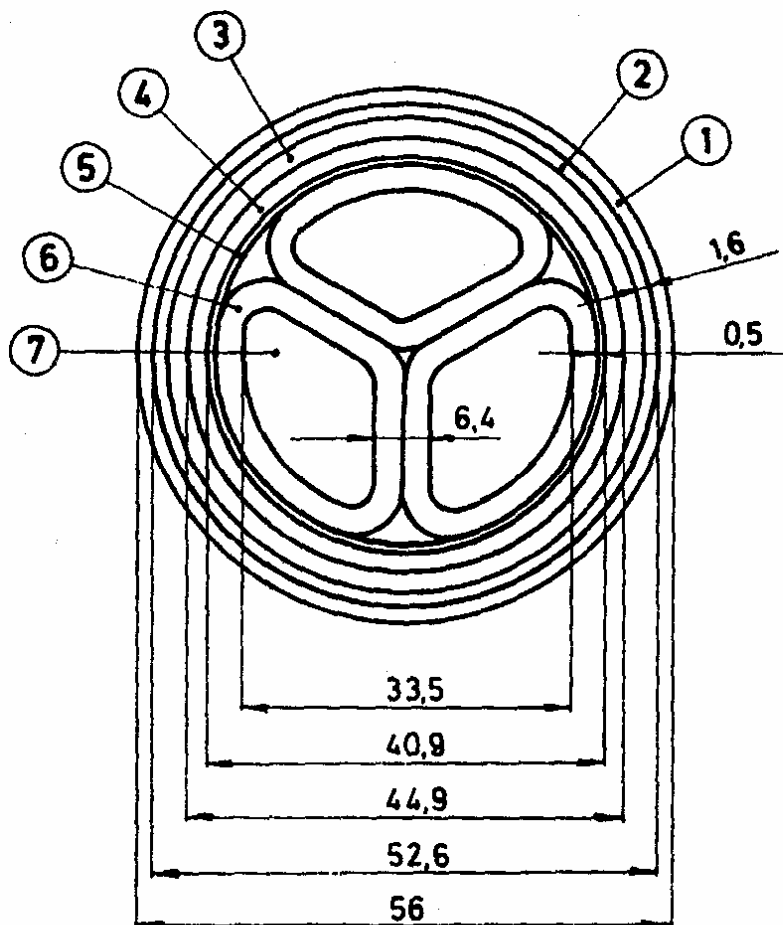


Sl. 17.5a. Dozvoljena strujna opteretljivost kabla IPO 13-AS $3 \times 150 \text{ mm}^2$, 10 kV u zavisnosti od specifičnog toplotnog otpora zemljišta ρ_z za različite temperature zemljišta θ_z .

Primer 17.1.

Proračun dozvoljenog strujnog opterećenja prema IEC 287, 1982.
za kabl IPO 13-AS $3 \times 150 \text{ mm}^2$, 6/10 kV, prema sledećim podacima:

- dubina ukopavanja kabla je 70 cm,
- specifični toplotni otpor zemljišta je 1 Km/W ,
- temperatura zemljišta je 20° C ,
- maksimalna dozvoljena trajna temperatura provodnika je 65° C ,
- strujno opterećenje je stalno ($m=1$)



IPO 13-AS $3 \times 150 \text{ mm}^2$, 6/10 kV

1 - spoljašnji zaštitni sloj (bitumenizirana juta); 2 - dve čelične trake; 3 - unutrašnji zaštitni sloj (papirne trake); 4 - olovni plašt; 5 - "pojasna" izolacija; 6 - izolacija provodnika; 7 - provodnik

Veličina	Oznaka	Jedinica	Vrednost
Spoljašnji prečnik kabla	d_k	mm	56,0
Spoljašnji prečnik olovnog plašta	d_{Pb}	mm	44,9
Debljina olovnog plašta	Δ_{Pb}	mm	2,0
Srednji prečnik olovnog plašta	d	mm	42,9
Debljina izolacije provodnik-provodnik	t	mm	6,4
Debljina "pojasne" izolacije	t_p	mm	0,5
Spoljašnji prečnik "pojasne" izolacije	d_s	mm	40,9
Debljina unutrašnjeg zaštitnog sloja	Δ_{un}	mm	2,25
Spoljašnji prečnik mehaničke zaštite	d_M	mm	52,6
Srednji prečnik mehaničke zaštite	d_A	mm	51,0 ¹⁾
Debljina jedne čelične trake	Δ_{Fe}	mm	0,8
Površina mehaničke zaštite	A	mm ²	192,16 ²⁾
Ekvivalentna debljina mehaničke zaštite	δ	mm	1,199 ³⁾
Debljina spoljašnjeg zaštitnog sloja	Δ_{sp}	mm	1,70
Poluprečnik kruga opisanog oko provodnika	r_1	mm	16,75
Prečnik ekvivalentnog okruglog provodnika	d_x	mm	14,45
Oсно rastojanje provodnika	s	mm	20,85 ⁴⁾
Površina olovnog plašta	S_{Pb}	mm ²	270,00 ⁵⁾
Specifični električni otpor olova	ρ_{Pb}	$\Omega\text{mm}^2/\text{km}$	214,00
Temperaturni koeficijent el. otpora olova	α_{Pb}	1/K	$4 \cdot 10^{-3}$
Relativna permeabilnost čelične trake	μ	-	300,00
Električni otpor olovnog plašta na 40° C	R_s	Ω/m	$0,8550 \cdot 10^{-3}$ ⁵⁾
Naizmenični el. otpor provodnika na 65° C	R	Ω/m	$0,2395 \cdot 10^{-3}$ ⁶⁾

Napomene:

$$1) d_A = d_{Pb} + 2\Delta_{un} + 2\Delta_{Fe} = 44,9 + 2 \cdot 2,25 + 2 \cdot 0,8 = 51 \text{ mm};$$

$$2) A = d_A \cdot \pi \cdot 1,5\Delta_{Fe} = 51,0 \cdot \pi \cdot 1,5 \cdot 0,8 = 192,16 \text{ mm}^2;$$

$$3) \delta = \frac{A}{\pi \cdot d_A} = \frac{192,16}{\pi \cdot 51,0} = 1,199 \text{ mm};$$

$$4) s = d_x + t = 14,45 + 6,4 = 20,85 \text{ mm};$$

$$5) R_{S20} = \rho_{Pb} \cdot \frac{1}{S_{Pb}} = 214 \cdot \frac{1}{2,70} = 0,79 \cdot 10^{-3} \Omega / \text{km}$$

$$S_{Pb} = d \cdot \pi \cdot \Delta_{Pb} = 42,9 \cdot \pi \cdot 2 \approx 270 \text{ mm}^2$$

$$R_{S40} = R_{S20} \cdot (1 + \alpha \cdot (40 - 20)) = 0,79 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 4,0 \cdot 10^{-3} \cdot 20) =$$

$$R_{S40} = 0,855 \cdot 10^{-3} \Omega / \text{m}$$

$$6) \text{ Računato prema IEC 287 za } \rho_{Af} = 0,0303 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$$

Faktor gubitaka u olovnom plaštu:

$$\lambda_0 = \lambda_0' + \lambda_0''$$

$$\lambda_0' \approx 0$$

$$\lambda_0'' = 0,94 \frac{R_s}{R} \cdot \left(\frac{2r_f + t}{d} \right)^2 \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s \cdot 10^7}{\omega} \right)^2}$$

$$\lambda_0'' = 0,94 \frac{0,855 \cdot 10^{-3}}{0,2395 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(\frac{2 \cdot 16,25 + 6,4}{42,9} \right)^2 \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{0,855 \cdot 10^{-3} \cdot 10^7}{2\pi f} \right)^2}$$

$$\lambda_0'' = 0,0036$$

Korekcija zbog uticaja čeličnih traka:

$$\left[1 + \left(\frac{d}{d_A} \right)^2 \cdot \frac{1}{1 + \frac{d_A}{\mu\delta}} \right]^2 = \left[1 + \left(\frac{42,9}{51,0} \right)^2 \cdot \frac{1}{1 + \frac{51,0}{300 \cdot 1,199}} \right]^2 = 2,62$$

$$\lambda_0 = 0,0036 \cdot 2,62 = 0,00943$$

Faktor gubitaka u mehaničkoj zaštiti:

$$\lambda_M = \lambda_M' + \lambda_M''$$

$$\lambda_M'' = \frac{s^2 \cdot k^2 \cdot 10^{-7}}{R \cdot d_A \cdot \delta}$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{d_A}{\mu\delta}} = \frac{1}{1 + \frac{51,0}{300 \cdot 1,199}} = 0,875$$

$$\lambda_M'' = \frac{20,85^2 \cdot 0,875^2 \cdot 10^{-7}}{0,2395 \cdot 10^{-3} \cdot 49,5 \cdot 1,199} = 0,00234$$

$$\lambda_M'' = \frac{2,25 \cdot s^2 \cdot k^2 \cdot \delta \cdot 10^{-8}}{R \cdot d_A} = \frac{2,25 \cdot 20,85^2 \cdot 0,875^2 \cdot 1,199 \cdot 10^{-8}}{0,2395 \cdot 10^{-3} \cdot 51,0}$$

$$\lambda_M'' = 0,00074$$

$$\lambda_M = 0,00234 + 0,00074 = 0,003$$

Toplotni otpor izolacije:

$$T_i = \frac{P_i}{2\pi} \cdot G \quad (\text{za jedan provodnik})$$

$$G = 3F_2 \cdot \ln \frac{d_a}{2r_1}$$

$$F_2 = 1 + \frac{3t}{2\pi \cdot (d_x + t) - t} = 1 + \frac{3 \cdot 6,4}{2\pi \cdot (14,45 + 6,4) - 6,4} = 1,154$$

$$G = 3 \cdot 1,154 \cdot \ln \frac{40,9}{2 \cdot 16,75} = 0,69$$

$$T_i = \frac{5}{2\pi} \cdot 0,69 = 0,55$$

Za sva tri provodnika toplotni otpor izolacije je:

$$T_{i3} = \frac{T_i}{3} = \frac{0,55}{3} = 0,183 \text{ Km/W}$$

Toplotni otpor unutrašnje zaštite je:

$$T_{uz} = \frac{\rho_{uz}}{2\pi} \cdot \ln \frac{d_{Pb} + 2\Delta_{un}}{d_{Pb}} = \frac{5}{2\pi} \cdot \ln \frac{44,9 + 2 \cdot 2,25}{44,9} = 0,076 \text{ Km/W}$$

Toplotni otpor spoljašnje zaštite je:

$$T_{sz} = \frac{\rho_{sz}}{2\pi} \cdot \ln \frac{d_k}{d_k - 2\Delta_{sp}} = \frac{6}{2\pi} \cdot \ln \frac{56,0}{56,0 - 2 \cdot 1,7} = 0,059 \text{ Km/W}$$

Fiktivni otpor kabla:

$$T_{kf} = \frac{T_{i3} + (1 + \lambda_0) \cdot T_{uz}}{1 + \lambda_0 + \lambda_M} + T_{sz} = \frac{0,183 + (1 + 0,00943) \cdot 0,076}{1 + 0,00943 + 0,003} + 0,059$$

$$T_{kf} = 0,315$$

Struja je:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta_{pn} \cdot 10^3}{3R_{efj} \cdot (T_{kf} + T_z)}} = \sqrt{\frac{(65 - 20) \cdot 10^3}{3 \cdot 0,247 \cdot (0,3157 + 0,62)}} = 254 \text{ A} = I_n$$

gde je:

$$T_z = \frac{\rho_z}{2\pi} \cdot \ln \frac{4h}{d_k} = \frac{1}{2\pi} \cdot \ln \frac{4 \cdot 70}{5,6} = 0,62 \text{ Km/W}$$

Za R_{efj} vidi tab. 12.5.

Uticaj dielektričnih gubitaka

Dielektrični gubitci u kablju trofaznog sistema su:

$$W_D = U^2 \cdot c_{pj} \cdot \omega \cdot \operatorname{tg}\delta \cdot 10^{-3} \quad [\text{kW/km}] \quad (17.11.)$$

gde je:

U - linijski napon (kV),

c_{pj} - podužni pogonski kapacitet kabla ($\mu\text{F/km}$),

$\omega = 2\pi f$,

$\operatorname{tg}\delta$ - tangens gubitaka.

Ako se uzmu u obzir dielektrični gubitci tada izraz (17.2.) glasi:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta_p - W_D \cdot \left(\frac{T_i}{2} + T_{uz} + T_{sz} + T_z\right)}{N \cdot R_{efj} \cdot (T_{kf} + T_z)}} \cdot 10^3 \quad [\text{A}] \quad (17.12.)$$

gde je T_i - ukupni toplotni otpor izolacije (za sve provodnike),

Važi:

$$T_i = \frac{T_{i1}}{N}$$

gde je T_{i1} - toplotni otpor izolacije za jedan provodnik.

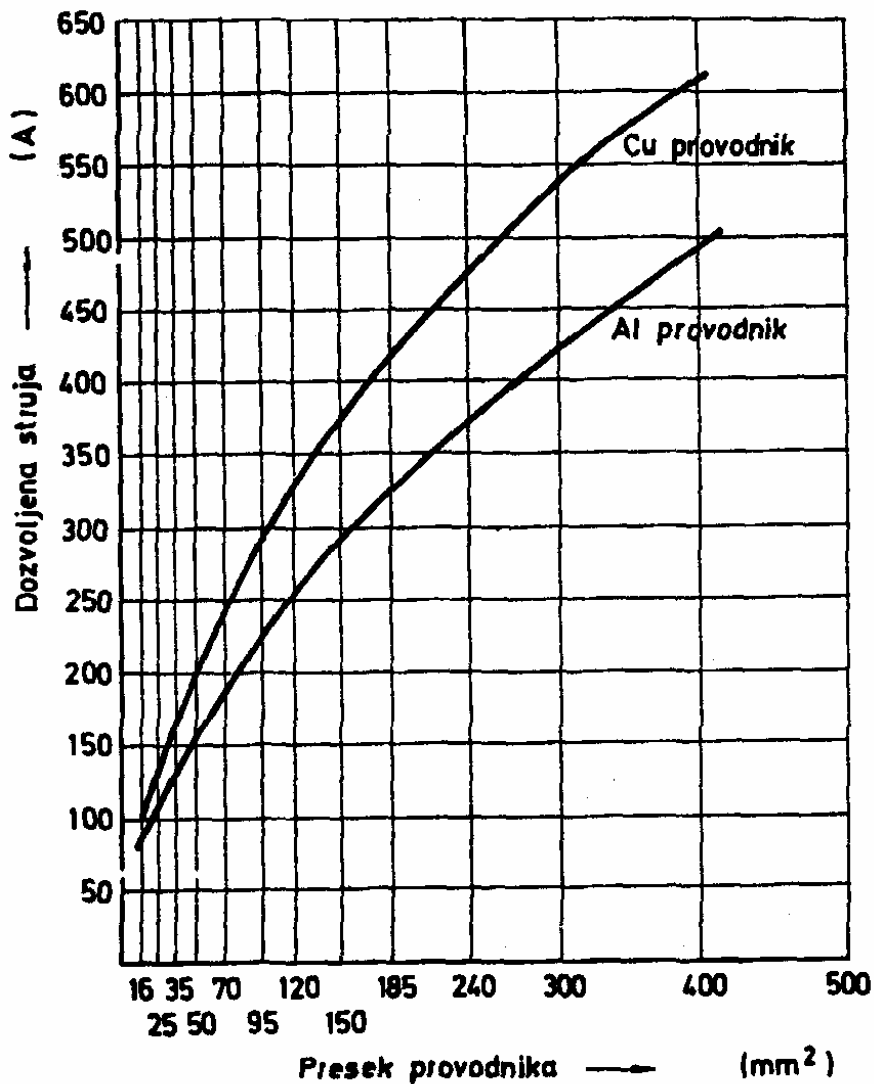
Dielektrični gubitci za niskonaponske i srednjenaponske kablove su zanemarljivi (izuzev za PVC kablove). Počinju bivati od manjeg značaja za 110 kV, da bi za 400 kV iznosili čak skoro 40% ukupnih gubitaka.

U IEC 287 se navodi izraz za dozvoljenu strujnu opteretljivost kabla u kome se daju toplotni otpor izolacije između provodnika i metalnog plašta (po provodniku) i dielektrični gubici po jednoj fazi.

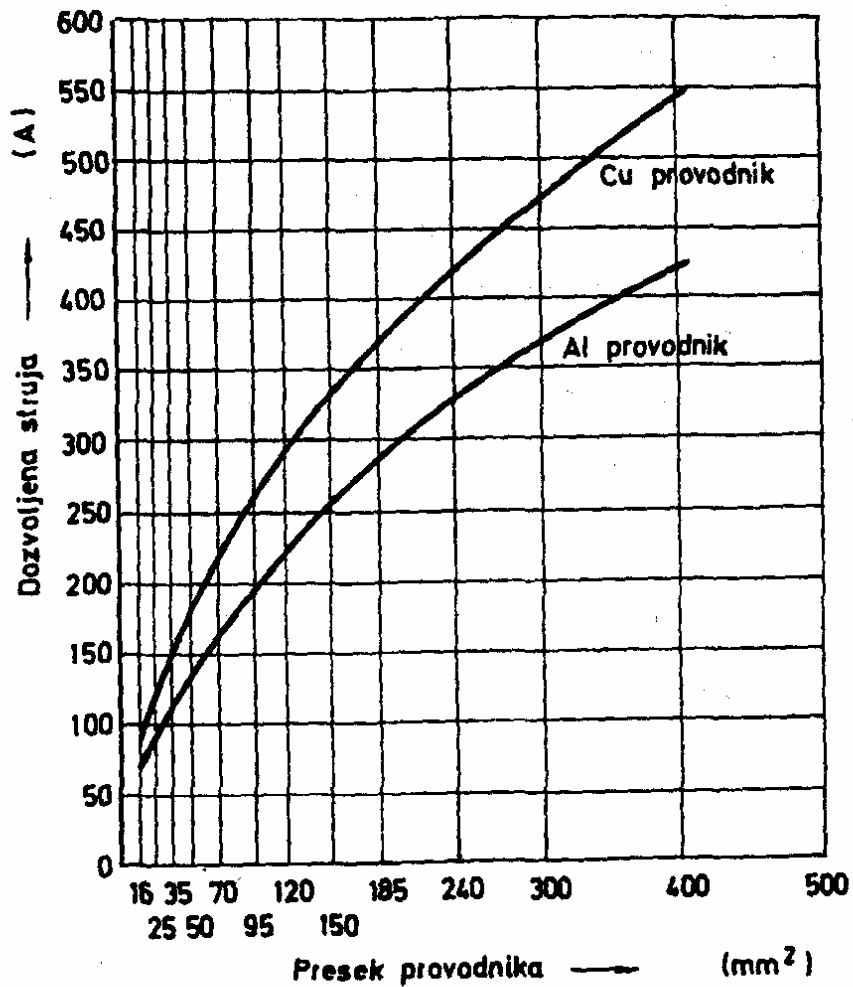
**A. NAZNAČENE STRUJE KABLOVA
IZOLOVANIH IMPREGNISANIM PAPIROM
POLOŽENIH U ZEMLJIŠTE
3,5/6 kV, 6/10 kV, 12/20 kV i 20/35 kV**

Napomene:

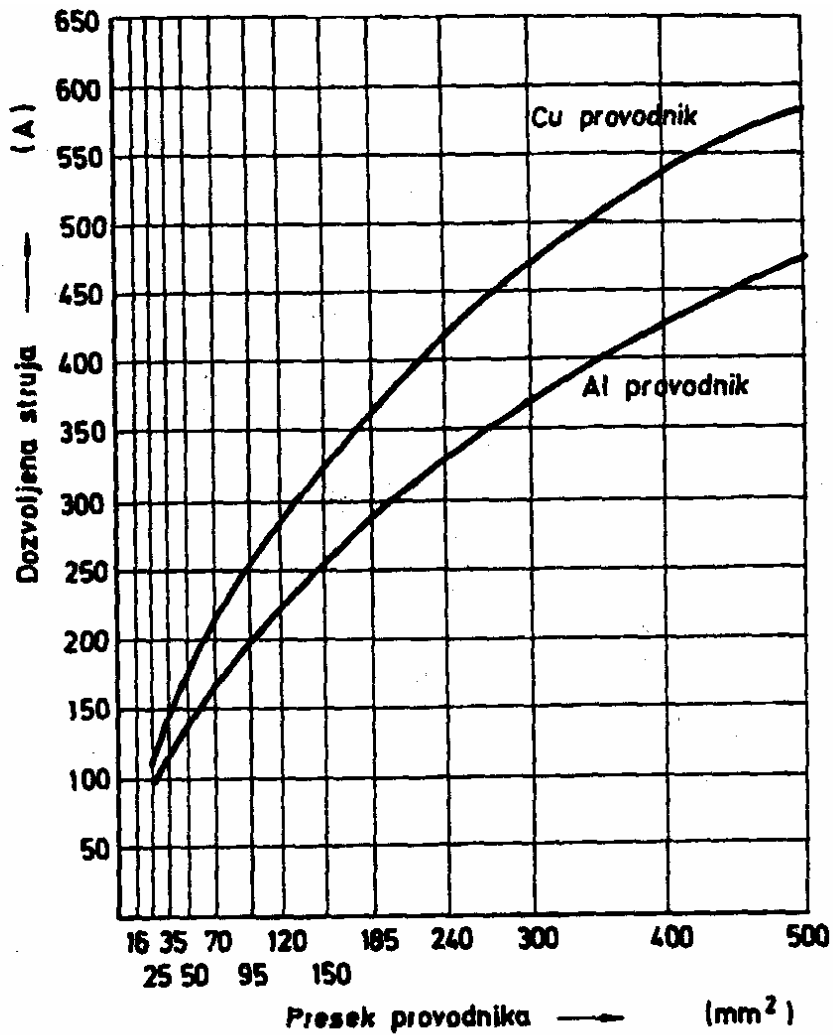
- *Strujna opterećenja se odnose na faktor opterećenja $m \approx 0,7$ (tzv. elektrodistributivno opterećenje).*
- *Za stalno, tzv. 100% opterećenje, vrednost struje treba pomnožiti sa 0,75.*
- *Za papirne kablove 20/35 kV uzeta je standardna dubina ukopavanja kabla, 70 cm, iako se oni obično polažu na 90-100 cm. Međutim, za uobičajene dubine polaganja od 70 do 120 cm. nema razlike u dozvoljenom strujnom opterećenju, jer koliko se izgubi na dubini dobije se na nižoj temperaturi i nižem specifičnom toplotnom otporu zemljišta.*
- *Metalni plašteni uzemljeni na oba kraja kabla.*



Sl. 17.6. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost) "pojasnog" kabla I(N)PO 13-(A) 3x..., 3,5/6 kV (Odnosi se i na "pojasne" kablove sa Al-plaštom)
 $\rho_z = 1 \text{ Km/W}$ - specifični toplotni otpor zemljišta,
 $\theta_z = 20^\circ \text{ C}$ - temperatura zemljišta,
 $h = 70 \text{ cm}$ - dubina ukopavanja kabla



Sl. 17.7. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost)
 "pojasnog" kabla I(N)PO 13-(A) 3x..., 6/10 kV
 (Odnosi se i na "pojasne" kablove sa AL-plaštom)
 $\rho_z = 1 \text{ Km/W}$ - specifični toplotni otpor zemljišta,
 $\theta_z = 20^\circ \text{ C}$ - temperatura zemljišta,
 $h = 70 \text{ cm}$ - dubina ukopavanja kabla



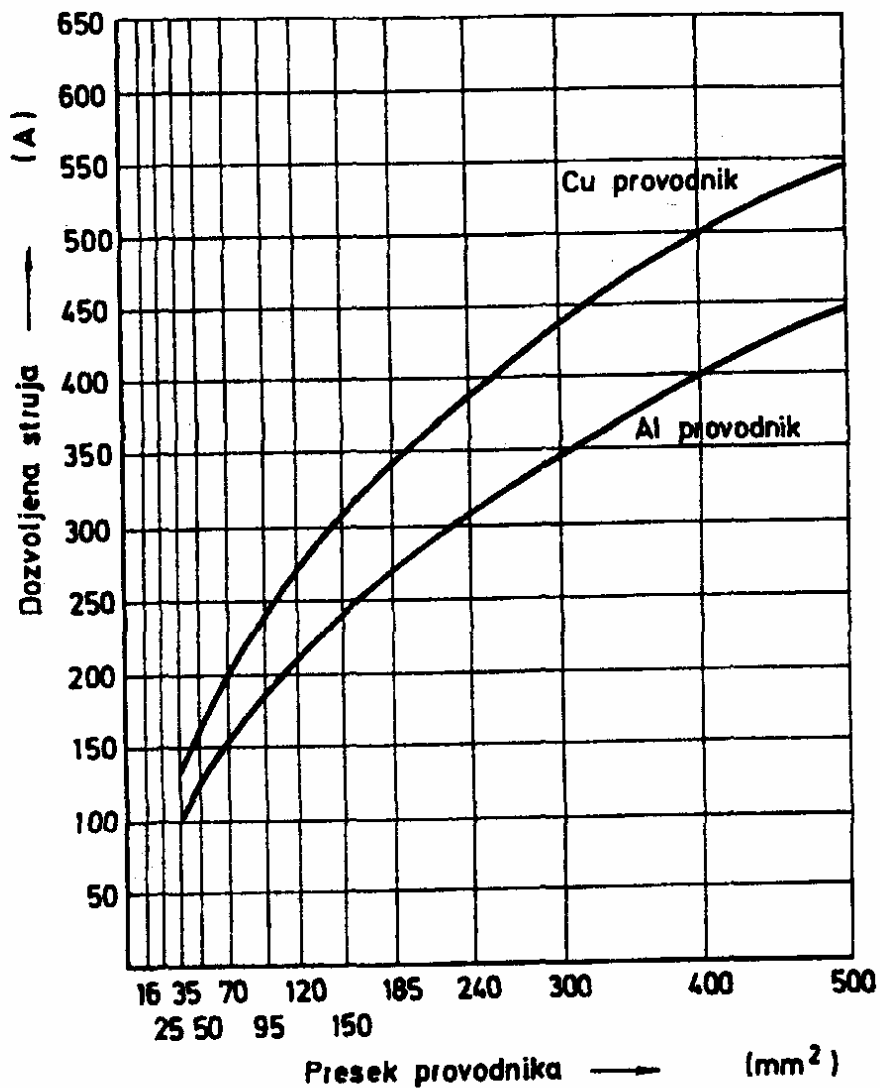
Sl. 17.8. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost) kabla

I(N)PZO 13-(A) 3x..., 12/20 kV

$\rho_z = 1 \text{ Km/W}$ - specifični toplotni otpor zemljišta,

$\theta_z = 20^\circ \text{ C}$ - temperatura zemljišta,

$h = 70 \text{ cm}$ - dubina ukopavanja kabla



Sl. 17.9. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost) kabla
 I(N)PZO 13-(A) 3x..., 20/35 kV
 $\rho_z = 1 \text{ Km/W}$ - specifični toplotni otpor zemljišta,
 $\theta_z = 20^\circ \text{ C}$ - temperatura zemljišta,
 $h = 70 \text{ cm}$ - dubina ukopavanja kabla

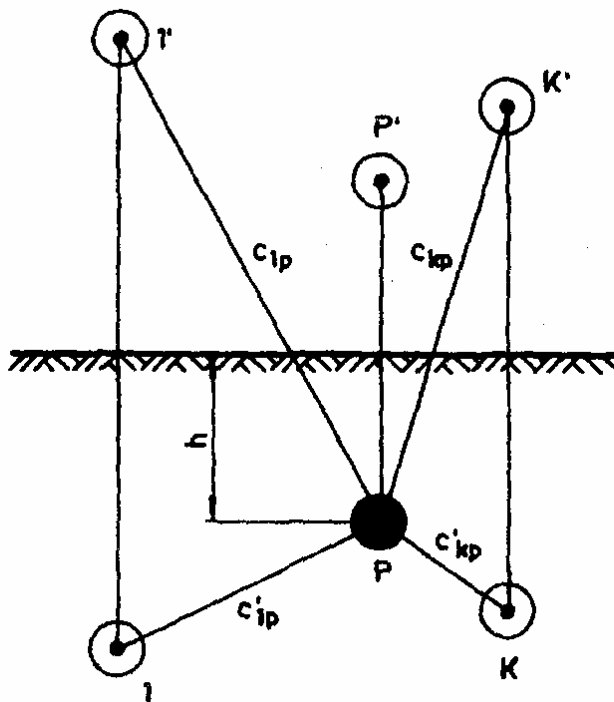
1.1.2. Grupa kablova istog tipa i jednog strujnog opterećenja

Da je u pitanju više kablova istog tipa onda je dozvoljeno strujno opterećenje bilo kog kabla u grupi od k kablova:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta_p}{N \cdot R_{\theta p} \cdot (T_{kf} + T_z + \Delta T_z)} \cdot 10^3, [A]} \quad (17.13.)$$

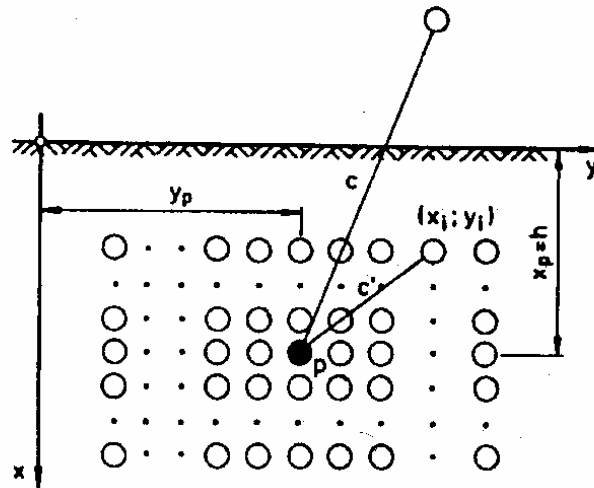
gde je ΔT_z dodatni toplotni otpor zemljišta izazvan prisustvom $k-1$ kablova. Ostale oznake su prema izrazu (17.2.).

U stvari posmatra se toplotno najugroženiji kabl i određuje se njegovo dozvoljeno strujno opterećenje pod uticajem drugih kablova jednakog strujnog opterećenja.



Sl. 17.36. Međusobni toplotni uticaj kablova

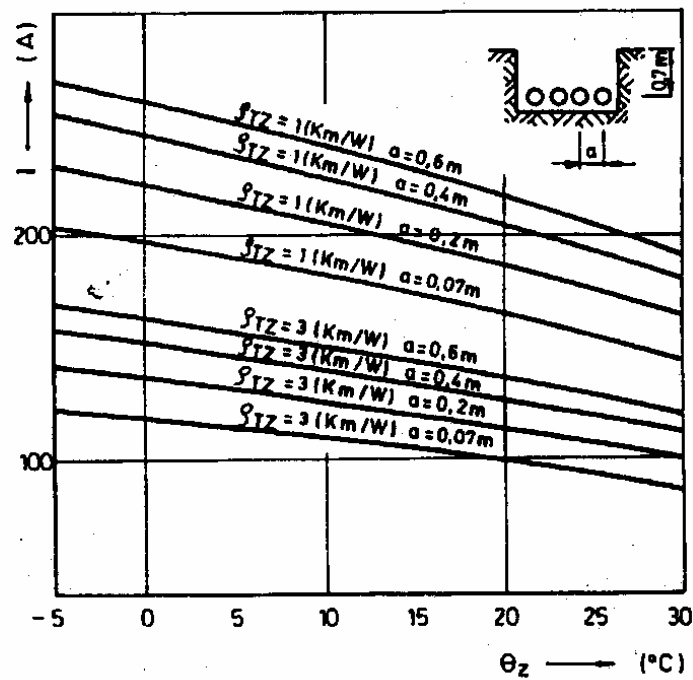
$$\begin{aligned} T_z + \Delta T_z &= \frac{\rho_z}{2\pi} \cdot \ln \frac{4h}{d} + \frac{\rho_z}{2\pi} \cdot \left(\frac{c_{1p}}{c'_{1p}} \cdot \frac{c_{2p}}{c'_{2p}} \cdot \frac{c_{3p}}{c'_{3p}} \dots \frac{c_{kp}}{c'_{kp}} \right) = \\ &= \frac{\rho_z}{2\pi} \cdot \ln \left[\frac{4h}{d} \cdot \left(\frac{c_{1p}}{c'_{1p}} \cdot \frac{c_{2p}}{c'_{2p}} \cdot \frac{c_{3p}}{c'_{3p}} \dots \frac{c_{kp}}{c'_{kp}} \right) \right] [Km/W] \quad (17.14.) \end{aligned}$$



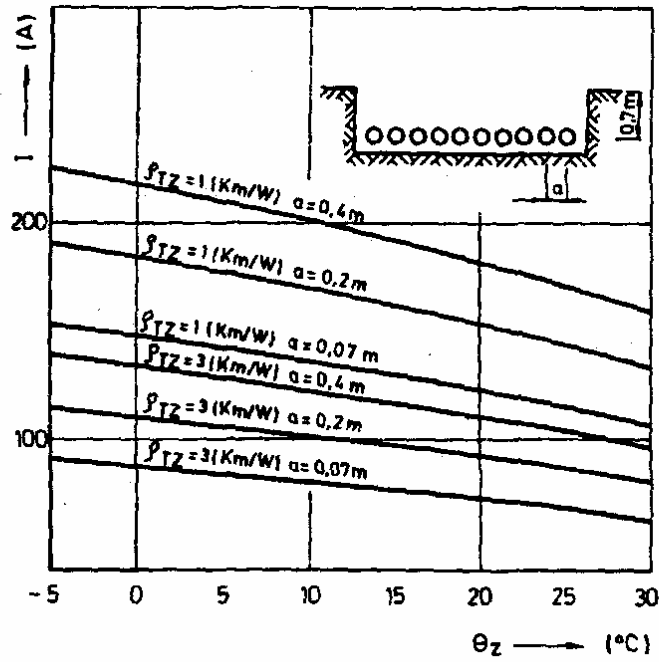
Sl. 17.37. Grupa kablova

Takođe važi izraz:

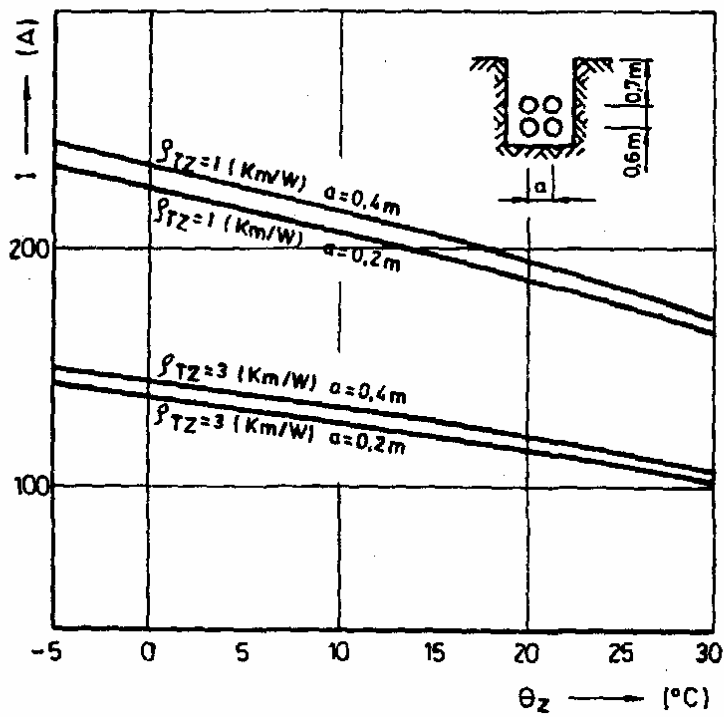
$$T_z + \Delta T_z = \frac{\rho_z}{2\pi} \left[\ln \frac{4h}{d} + \frac{1}{2} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq p}}^k \ln \frac{(y_i - y_p)^2 + (h + x_i)^2}{(y_i - y_p)^2 + (h - x_i)^2} \right] \text{ [Km/W]} \quad (17.15.)$$



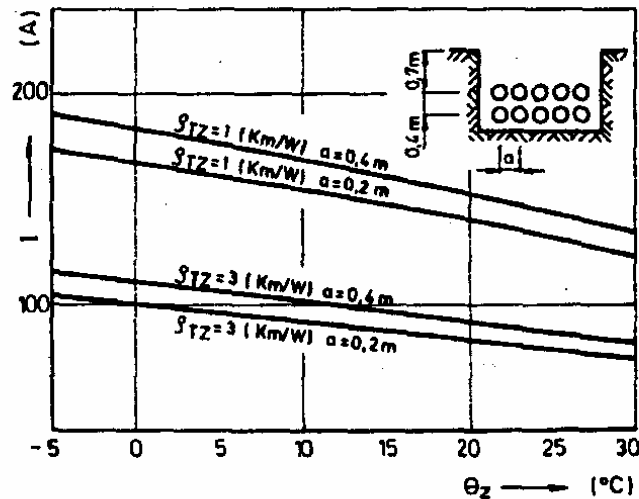
Sl. 17.38. Dozvoljeno strujno opterećenje 4 kablova IPO 13-AS 3×150 mm², 6/10 kV u horizontalnom rasporedu u zavisnosti od temperature zemljišta θ_z , za različita osna rastojanja kablova a i specifične toplotne otpore zemljišta ρ_z



Sl. 17.39. Isto kao sl. 17.38. samo 10 kablova



Sl. 17.40. Isto kao sl. 17.38 samo 4 kabla raspoređena u "paketu" (u dva nivoa)



Sl. 17.41. Isto kao sl. 17.38. samo 10 kablova raspoređena u "paketu" (u dva nivoa)

17.1.1.3. Uticaj isušivanja zemljišta

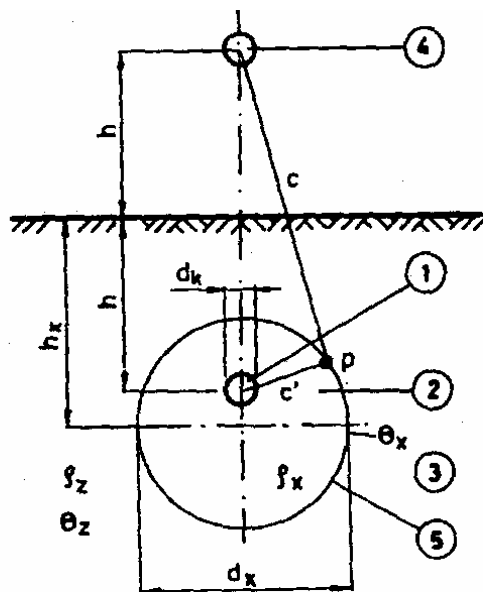
Isušivanje zemljišta ima veliki uticaj na visinu dozvoljenog strujnog opterećenja kablova, jer vodi do porasta specifičnog toplotnog otpora zemljišta oko kablova.

Dozvoljeno strujno opterećenje kablova sa zonom isušivanja u zemljištu glasi:

$$I = \sqrt{\frac{\theta_{pd} - \theta_z - w_D (T_{KD} + T_{Zi}) + (\theta_x - \theta_z) \cdot \frac{\rho_x - \rho_z}{\rho_z}}{N \cdot R_{ef} \cdot (T_{kf} + T_{Zi})}} \cdot 10^3, [A] \quad (17.16)$$

gde je:

- $T_{KD} = \frac{T_{if}}{2N} + T_{uz} + T_{sz}$, [Km/W] - toplotni otpor kablova sa gledišta prenosa toplote kroz kabl nastale dielektričnim gubicima,
- T_{if} [Km/W] - toplotni otpor izolacije po provodniku,
- ρ_x [Km/W] - specifični toplotni otpor isušene zone zemljišta,
- $T_{Zi} = \frac{\rho_x}{2\pi} \cdot \ln \frac{4h}{d_k}$ [Km/W] - toplotni otpor zemljišta kad bi celo bilo isušeno,
- θ_x [°C] - temperatura granične izoterme pri kojoj nastaje isušivanje,
- ostale veličine su prema jednačinama (17.2.) i (17.3.)



Sl. 17.42. Isušena zona zemljišta oko kabla
 1 - kabl; 2 - isušena zona zemljišta; 3 - neisušena zona zemljišta;
 4 - lik kabla; 5 - granična izoterma isušivanja
 θ_x - izoterma isušene zone

Smatra se da isušivanje peskovitog zemljišta kablovske posteljice se dešava već pri relativno niskim temperaturama, na oko 30 °C. Za zemljišta koja imaju u osnovi glinu ta je temperatura viša, oko 50 °C.

Prečnik granične izoterme isušivanja je:

$$d_x = \frac{4 \cdot h \cdot k_x}{k_x^2 - 1} \quad (17.17.)$$

a njena dubina je:

$$h_x = \frac{h \cdot (k_x^2 + 1)}{k_x^2 + 1} \quad (17.18.)$$

gde je:

$$k_x = e^{\frac{2\pi \cdot (\theta_x - \theta_z)}{r_z \cdot (W + W_D)}} \quad (17.19.)$$

$$W = N \cdot R_{efj} \cdot I^2$$

Postupak proračuna strujnog opterećenja pri isušivanju zemljišta dat je u časopisu CIGRE Electra, Januar 1986. N° 104.

Primer 17.2. Proračun dozvoljene struje pri isušivanju zemljišta.

- **Kabl IPO 13-AS $3 \times 150 \text{ mm}^2$, 6/10 kV,**
- **Broj faza je 3,**
- **Dubina ukopavanja kabla $h=70 \text{ cm}$,**
- **Specifični toplotni otpor peskovitog zemljišta $\rho_z=1 \text{ Km/W}$,**
- **Specifični toplotni otpor isušene zone zemljišta $\rho_x=2,5 \text{ Km/W}$,**
- **Temperatura granične izoterme pri kojoj počinje isušivanje $\theta_x=30^\circ \text{ C}$ (zemljište pretežno peskovitog sastava),**
- **Temperatura zemljišta $\theta_z=20^\circ \text{ C}$,**
- **Maksimalna dozvoljena trajna temperatura provodnika $\theta_{pd}=65^\circ \text{ C}$.**

Oznake	Značenje veličine matematički izraz	Vrednost	Napomena
w_D	Dielektrični gubici: $w_D = U^2 \cdot c_{pj} \cdot \omega \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot 10^3$ (kW/km) U (kV) c_{pj} - podužni pogonski kapacitet ($\mu\text{F/km}$) $\omega = 2\pi f$ $\operatorname{tg} \delta$	0,05 10 0,34 314 $3,6 \times 10^3$	sl. 12.13. Tab. 7.2.
T_{KD}	Toplotni otpor kabla koji se suprotstavlja dielektričnim gubicima $T_{KD} = \frac{T_{ii}}{2 \cdot 3} + T_{uz} + T_{sz}$ (Km/W)	0,226	
T_{ii} (po žili)	$T_{ii} = \frac{\rho_i}{2\pi} \cdot G$ (Km/W)	0,55	Vidi primer 17.1
T_{uz}	$T_{uz} = \frac{\rho_{uz}}{2\pi} \cdot \ln \frac{d_{pb} + 2\Delta_{un}}{d_{pb}}$ (Km/W)	0,076	Isto
T_{sz}	$T_{sz} = \frac{\rho_{sz}}{2\pi} \cdot \ln \frac{d_k}{d_k - 2\Delta_{sp}}$ (Km/W)	0,059	Isto
R_{efj}	Podužni efektivni električni otpor provodnika 150 mm^2 , Al, pri 65°C (Ω/km)	0,247	Tab. 12.5.
T_{kf}	Fiktivni toplotni otpor kabla $T_{kf} = \frac{\Delta\theta_{pn}}{W_n} - T_{zn}$ (Km/W) $\Delta\theta_{pn} = 65 - 20$ (K) W_n (kW/km) $T_{zn} = \frac{\rho_{zn}}{2\pi} \cdot \ln \frac{4h}{d_k}$ (Km/W)	0,32 ¹⁾ 45 48 0,62	
T_{zi}	Toplotni otpor zemljišta kad bi bilo celo isušeno $T_{zi} = \frac{\rho_x}{2\pi} \cdot \ln \frac{4h}{d_k}$ (Km/W)	1,56	

¹⁾ U primeru 17.1. dobijena je vrednost 0,315 Km/W što ne utiče bitno na rezultat.

Na osnovu ovih vrednosti dolazi se do dozvoljenog opterećenja a prema izrazu (17.16.):

$$I = \sqrt{\frac{65 - 20 - 0,05 \cdot (0,226 + 1,56) + (30 - 20) \cdot 1,5}{3 \cdot 0,247 \cdot (0,32 + 1,56)}} \cdot 10^3 = 208 \text{ A}$$

$$k_x = e^{\frac{2\pi \cdot (\theta_x - \theta_z)}{\rho_z \cdot (w + w_D)}} = e^{\frac{2\pi \cdot (30 - 20)}{1 \cdot (3 \cdot 0,247 \cdot 208^2 \cdot 10^{-3} + 0,05)}} = 7,1$$

Prečnik isušene zone je:

$$d_x = \frac{4h \cdot k_x}{k_x^2 - 1} = \frac{4 \cdot 70 \cdot 7,1}{7,1^2 - 1} = 40 \text{ cm}$$

a dubina njenog centra je:

$$h_x = \frac{h \cdot (k_x^2 + 1)}{k_x^2 - 1} = \frac{70 \cdot (7,1^2 + 1)}{7,1^2 - 1} = 72,8 \text{ cm}$$

U slučaju da se kabl ukopava u glinovito zemljište može se uzeti da je $\theta_x = 50^\circ\text{C}$, te bi dozvoljena struja iznosila:

$$I = 255 \text{ A} \approx I_n = 254 \text{ A}$$

Što govori da isušene zone i nema. Granična izoterma se u stvari poklapa sa spoljašnjim prečnikom kabla. To se pokazuje:

$$k_x = e^{\frac{2\pi \cdot (30 - 20)}{1 \cdot (3 \cdot 0,247 \cdot 255^2 \cdot 10^{-3} + 0,05)}} = 7,1$$

$$d_x = \frac{4 \cdot 70 \cdot 50}{50^2 - 1} = 5,6 \text{ cm}$$

tj. poklapa se sa prečnikom kabla ($d_k = 5,6 \text{ cm}$).

Jednožilni kablovi položeni u snopu

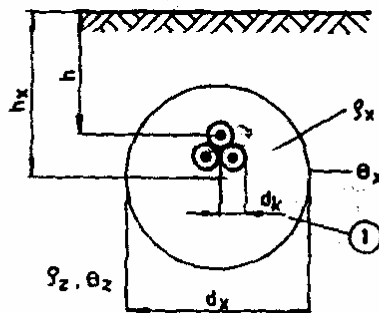
Za ovaj slučaj važi izraz (17.16.) uz izvesne izmene. Tako se sledeći izrazi i veličine menjaju, te glase:

$$T_{KD} = \frac{T_i}{2} + T_{uz} + T_{sz} \quad (17.20.)$$

$$T_{zi} = \frac{\rho_x}{2\pi} \cdot \left(\ln \frac{4h}{d_k} + 2 \cdot \ln \frac{2h}{d_k} \right) \quad (17.21.)$$

N=1

$$k_x = e^{\frac{2\pi \cdot (\theta_x - \theta_z)}{3\rho_z \cdot (w+w_0)}} \quad (17.22.)$$



Sl. 17.43. Isušena zona zemljišta kod jednožilnih kablova u snopu
1 - isušena zona; θ_x - granična izoterma isušene zone

Za proračun d_x i h_x koriste se izrazi (17.17) i (17.18).

Jednožilni kablovi položeni jedan pored drugog

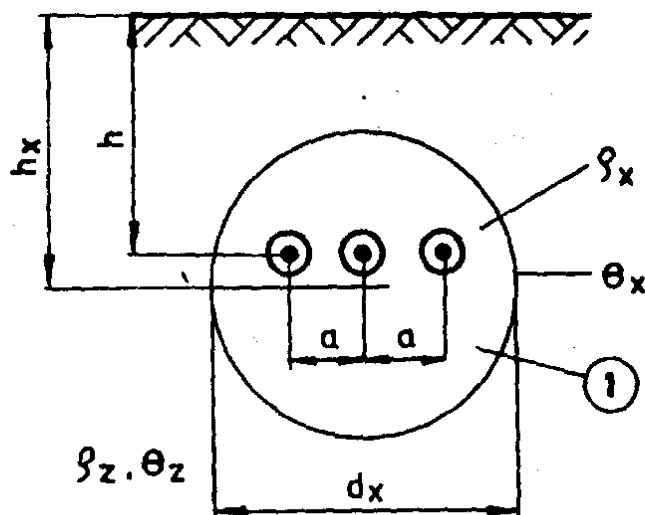
U ovom slučaju važe takođe sledeći izrazi:

$$T_{KD} = \frac{T_i}{2} + T_{uz} + T_{sz} \quad (17.23.)$$

$$T_{zi} = \frac{\rho_x}{2\pi} \cdot \left(\ln \frac{4h}{d_k} + 2 \cdot \ln \sqrt{\left(\frac{2h}{a}\right)^2 + 1} \right) \quad (17.24.)$$

N=1

$$k_x = e^{\frac{2\pi \cdot (\theta_x - \theta_z)}{3\rho_z \cdot (w+w_0)}} \quad (17.25.)$$



Sl. 17.44. Isušena zona zemljišta kod jednožilnih kablova položenih jedan pored drugog
1 - isušena zona; θ_x - granična izoterma isušene zone.

Isušena zona je približno kružnog oblika, pod uslovom da prečnik bude znatno veći ili znatno manji u odnosu na osno rastojanje kablova položenih jedan pored drugog.

Primer 17.3. Proračun dozvoljene struje pri isušivanju. Tri jednožilna kabla XHE 48-A $1 \times 1000/95 \text{ mm}^2$, 64/110 kV, položeni jedan pored drugog na rastojanju $a=18,2 \text{ cm}$ (međuosno rastojanje).

Dubina ukopavanja kabla $h=100 \text{ cm}$,

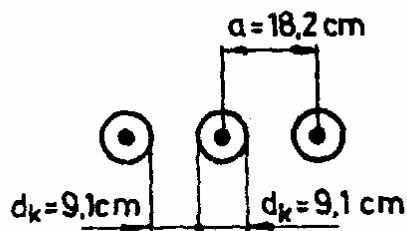
Specifični toplotni otpor zemljišta $\rho_z=1,2 \text{ Km/W}$,

Specifični toplotni otpor isušene zone zemljišta $\rho_x=2,5 \text{ Km/W}$,

Temperatura granične izoterme pri kojoj počinje isušivanje $\theta_x=50^\circ \text{ C}$,

Temperatura zemljišta $\theta_z=15^\circ \text{ C}$,

Maksimalna dozvoljena trajna temperatura provodnika $\theta_{p\sigma}=90^\circ \text{ C}$,



Oznake	Značenje veličine - matematički izraz	Vrednost	Napomena
w_D	<p>Dielektrični gubici:</p> $w_D = U_0^2 \cdot c_{pj} \cdot \omega \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot 10^3 \text{ (kW/km)}$ <p>U_0 (kV) c_{pj} - podužni pogonski kapacitet ($\mu\text{F/km}$) $\omega = 2\pi f$ $\operatorname{tg} \delta$</p>	<p>0,15 64 0,203 314 $0,6 \times 10^3$</p>	<p>Sl. 12.15. Tab. 7.14.</p>
T_{KD}	<p>Toplotni otpor kabla koji se suprotstavlja dielektričnim gubicima</p> $T_{KD} = \frac{T_{11}}{2 \cdot 3} + T_{uz} + T_{sz} \text{ (Km/W)}$	0,25	
T_1	$T_1 = \frac{\rho_i}{2\pi} \cdot G \text{ (Km/W)}$ <p>r_2 - poluprečnik preko izolacije (mm) r_1 - poluprečnik preko unutrašnjeg slabovodljivog sloja (mm) ρ_i - specifični toplotni otpor XPE izolacije (Km/W)</p>	<p>0,36 38,65 20,15 3,5</p>	Tab. 17.1
T_{uz}	$T_{uz} = \frac{\rho_{uz}}{2\pi} \cdot \ln \frac{r_4}{r_3} \text{ (Km/W)}$ <p>r_3 - poluprečnik preko izolacije (mm) r_4 - poluprečnik preko slabovodljivog sloja (mm) ρ_{uz} - specifični toplotni otpor slabovodljivog PE (Km/W)</p>	<p>0,017 38,65 39,85 3,5</p>	
T_{sz}	$T_{sz} = \frac{\rho_{sz}}{2\pi} \cdot \ln \frac{d_k}{d_k - 2\Delta_{sp}} \text{ (Km/W)}$ <p>r_5 - poluprečnik preko električne zaštite (mm) r_6 - spoljašnji poluprečnik kabla (mm) ρ_{sz} - specifični toplotni otpor spoljašnjeg PE plašta (Km/W)</p>	<p>0,05 41,6 45,5 3,5</p>	
R_{efj}	<p>Podužni efektivni električni otpor provodnika 1000 mm^2, Al (Ω/km)</p>	0,04	

T_{kf}	<p>Fiktivni toplotni otpor kablova</p> $T_{kf} = \frac{\Delta\theta_{pn}}{W_n} - T_{zn} \text{ (Km/W)}$ $\Delta\theta_{pn} = 95 - 15 \text{ (K)}$ $W_n = R_{ef} \cdot I_n^2 \text{ (kW/km)}$	1,5	
T_{zn}	$T_{zn} = \frac{\rho_{zn}}{2\pi} \cdot \ln \frac{4h}{d_k} + 2 \cdot \ln \left[\left(\frac{2h_n}{a} \right)^2 + 1 \right] \text{ (Km/W)}$	75	18,77
T_{zi}	<p>Toplotni otpor zemljišta kad bi bilo celo isušeno</p> $T_{zi} = \frac{\rho_x}{2\pi} \cdot \left[\ln \frac{4h}{d_k} + 2 \cdot \ln \sqrt{\left(\frac{2h}{a} \right)^2 + 1} \right] \text{ (Km/W)}$	2,5	
		5,2	

Dozvoljeno strujno opterećenje na osnovu izraza (17.16) je:

$$I = \sqrt{\frac{90 - 15 - 0,15 \cdot (0,25 + 5,2) + (50 - 15) \cdot \frac{2,5 - 1,2}{1,2}}{0,04 \cdot (1,5 + 5,2)}} \cdot 10^3 = 646 \text{ A}$$

$$k_x = e^{\frac{2\pi \cdot (\theta_x - \theta_z)}{3\rho_z \cdot (w + w_D)}} = e^{\frac{2\pi \cdot (50 - 15)}{3 \cdot 1,2 \cdot (0,04 \cdot 646^2 \cdot 10^{-3} + 0,15)}} = 37,6$$

Prečnik granične izoterme isušivanja je:

$$d_x = \frac{4 \cdot 100 \cdot 37,6}{37,6^2 - 1} = 10,6 \text{ cm}$$

Pojas isušivanja je uzak, svega $(10,6 - 9,1)/2 = 0,75 \text{ cm}$, ali je to dovoljno da se struja od $I_n = 685 \text{ A}$ snizi na 646 A .

17.2. PROMENLJIVO STRUJNO OPTEREĆENJE

Pod promenljivim strujnim opterećenjem podrazumeva se promenljivo strujno opterećenje u jednom vremenskom intervalu (obično jedan dan) koje se ponavlja dati broj intervala (dana).

Metoda proračuna dozvoljenog strujnog opterećenja kabla za ovakvo ciklično opterećenje kabla data je u dokumentu CIGRÉ, Study Committe No. 21. (H.V. Cables) - Working Group 02 (Cable Rating Factor): Current ratings of cables for cyclic and emergency load. (Electra No. 24, 1972, p. 63.-97.). Za inženjerske proračune razrađena je metoda¹⁾ koja se zasniva na maksimalnom opterećenju i faktoru opterećenja bez potreba ulaženja u oblik dijagrama dnevnog opterećenja. U ovom postupku se uvodi tzv. karakteristični prečnik (d_y) koji zavisi od oblika opterećenja, tj. da li je po obliku sinusoidan, pravougaoni ili srednji, po obliku između ova dva.

Za dijagram opterećenja oblika sinusoide karakteristični prečnik je:

$$d_y = \frac{129,5}{\rho_z^{0,4} \cdot \sqrt{\omega}} \quad (17.26.)$$

Za dijagram opterećenja pravougaonog oblika:

$$d_y = \frac{311 \cdot \sqrt{\mu}}{\rho_z^{0,4} \cdot \sqrt{\omega}} \quad (17.27.)$$

Za dijagram oblika između dva prethodna (aritmetička sredina):

$$d_y = \frac{65 + 155,5 \cdot \sqrt{\mu}}{\rho_z^{0,4} \cdot \sqrt{\omega}} \quad (17.28.)$$

gde je:

- ω - učestanost, broj intervala (dana),
- ρ_z - specifični toplotni otpor zemljišta (Km/W),
- μ - faktor gubitaka $\mu = 0,3 \cdot m + 0,7 \cdot m^2$,
- m - faktor opterećenja (vidi jednačinu 17.1.).

¹⁾ Guido Mainka: Berechnung der Belastbarkeit von in Erde verlegten Starkstromkabeln unter Berücksichtigung von Belastungsfaktor und Bodenaustrocknung ETZ-A, Bd. 92 (1971.) H.3

Po definiciji faktor gubitaka je:

$$\mu = \frac{1}{24h \cdot W_{\max}} \int_0^{24} W(t) dt = \frac{1}{24h \cdot I_{\max}^2} \int_0^{24} I^2(t) dt \quad (17.29.)$$

Tab. 17.14. Karakteristični prečnik za $\rho_z=1 \text{ Km/W}$ i $\omega=40 \text{ dana}^1)$

Faktor opterećenja, m	0,70	0,80	0,90	1,00
Faktor gubitaka, μ	0,55	0,69	0,84	1,00
Karakteristični prečnik, d_y (cm)				
oblik opterećenja				
sinusoidno:	20,5	20,5	20,5	20,5
pravougaono:	36,6	40,8	45,0	49,2
srednje:	28,6	30,7	32,8	34,9

Višežilni kablovi

Dozvoljeno strujno opterećenje višežilnog kabela je:

$$I = \sqrt{\frac{\theta_{pd} - \theta_z - w_D \cdot (T_{KD} + T_z)}{N \cdot R_{ef} \cdot (T_{kf} + T_y)}} \cdot 10^3 \text{ [A]} \quad (17.30.)$$

gde je:

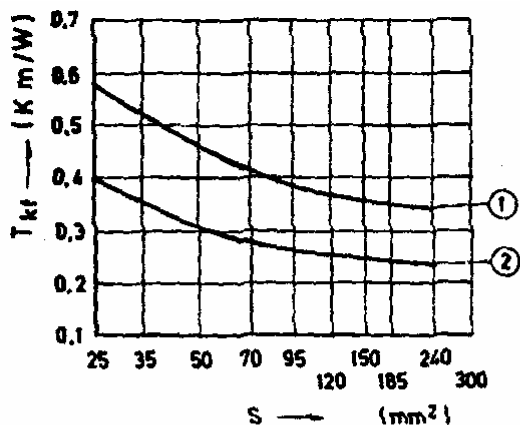
$$T_y = \frac{\rho_z}{2\pi} \left[\ln \frac{4h}{d_k} + (\mu - 1) \cdot \ln \frac{4h}{d_y} \right] \text{ [Km/W]} \quad (17.31)$$

$$T_z = \frac{\rho_z}{2\pi} \cdot \ln \frac{4h}{d_k} \text{ [Km/W]}$$

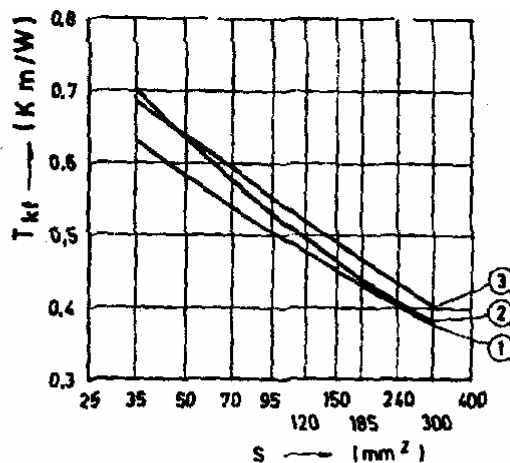
Fiktivni toplotni otpor kabela se ne može računati prema izrazu (17.10), jer više nije u pitanju stalno (100%) opterećenje već promenljivo. Izraz (17.3.) je i dalje važeći ali faktor gubitaka λ_0 i λ_M se računaju na drugi način²⁾ (sl. 17.45., sl. 17.46., i sl. 17.47.). Ostale veličine su prema izrazu (17.16.).

¹⁾ Posle 40 dana cikličnog opterećenja temperatura provodnika sasvim se ustaljuje.

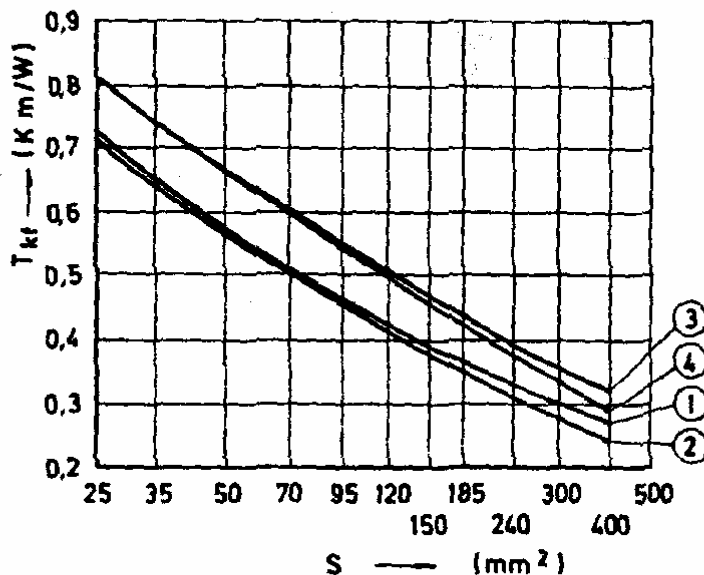
²⁾ Vidi priručnik Hütte, Elektrotechnik, III Band.



Sl. 17.45. Fiktivni toplotni otpori 1kV kablova T_{kf} izolovanih PVC-om i XPE-om u zavisnosti od preseka provodnika (S)
 1 - PP 00 (A) 3x...+..., 0,6/1 kV;
 2 - XP 00 (A) 3x...+..., 0,6/1 kV;



Sl. 17.46. Fiktivni toplotni otpor papirnih kablova T_{kf} u zavisnosti od preseka provodnika (S)
 1 - IPZO 13(A) 3x..., 12/20 kV;
 2 - IPO 13(A) 3x..., 6/10 kV;
 3 - IPZO 13(A) 3x..., 20/35 kV;



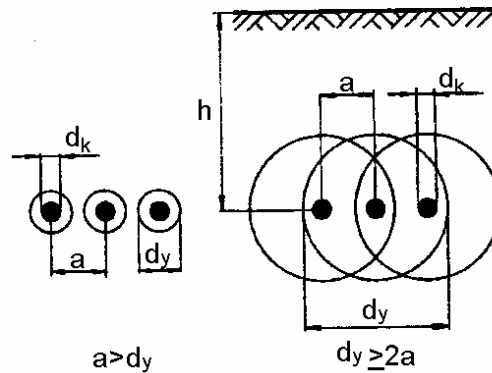
Sl. 17.47. Fiktivni toplotni otpor kablova T_{kf} izolovanih XPE-om u zavisnosti od preseka provodnika (S)
 1 - XHE 48(A) 1x.../., 6/10 kV (u snopu);
 2 - XHE 48(A) 1x.../., 6/10 (jedan pored drugog, odstojanje 7 cm);
 3 - XHE 48(A) 1x.../., 12/20 kV (u snopu);
 4 - XHE 48(A) 1x.../., 12/20 (jedan pored drugog, odstojanje 7 cm)

Jednožilni kablovi položeni jedan pored drugog

$$T_y = \frac{\rho_z}{2\pi} \cdot \left[\ln \frac{4h}{d_k} + (\mu - 1) \cdot \ln \frac{4h}{d_y} + 2\mu \cdot \ln \sqrt{\left(\frac{2h}{a}\right)^2 + 1} \right] \text{ [Km/W]} \quad (17.33.)$$

gde je a osno rastojanje kablova.

Ovaj izraz važi za $2a \geq d_y$. Za slučaj da je $d_y > 2a$ za T_y važi naredni izraz za snop.



Sl. 17.48. Zone karakterističnog prečnika

Jednožilni kablovi položeni u snopu

$$T_y = \frac{\rho_z}{2\pi} \cdot \left[\ln \frac{4h}{d_k} + 3(\mu - 1) \cdot \ln \frac{4h}{d_y} + 2\ln \sqrt{\left(\frac{2h}{a}\right)^2 + 1} \right] \text{ [Km/W]} \quad (17.33.)$$

Primer 17.4. Proračun dozvoljene struje pri promenljivom opterećenju srednjeg oblika.

- **Kabl IPO 13-AS 3×150 mm², 6/10 kV,**
- **$m = 0,7$**
- **ostali podaci su isti kao u primeru 17.1.**

$$T_y = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \frac{4 \cdot 70}{5,6} + (0,55 - 1) \cdot \ln \frac{4 \cdot 70}{28,6} \right] = 0,457 \text{ Km/W}$$

$$I = \sqrt{\frac{45 \cdot 10^3}{3 \cdot 0,247 \cdot (0,456 + 0,457)}} = 258 \text{ A}$$

Pretpostavljeno je da nema isušivanja zemljišta. Dielektrični gubici su zanemarljivi.

17.2.1. UTICAJ ISUŠIVANJA ZEMLJIŠTA

Višežilni kablovi

Dozvoljeno strujno opterećenje višežilnog kabla je:

$$I = \sqrt{\frac{\theta_{pd} - \theta_z - w_D \cdot (T_{KD} + T_{zi}) + \left(\frac{\rho_x - \rho_z}{\rho_z}\right) \cdot (\theta_x - \theta_z)}{N \cdot R_{efj} \cdot (T_{kf} + T_{xy})}} \cdot 10^3 \text{ [A]} \quad (17.34)$$

gde je:

$$T_{xy} = \frac{\rho_x}{2\pi} \cdot \left[\ln \frac{4h}{d_k} + (\mu - 1) \cdot \ln \frac{4h}{d_y} \right] \text{ [Km/W]} \quad (17.35)$$

ostale veličine su prema jednačini (17.16.).

Izraz za struju se odnosi na sve slučajeve odnosa d_x i d_y , tj.:

$$d_y > d_x \text{ i } d_y < d_x$$

Za proračun prečnika granične izoterme d_x koeficijent k_x iznosi za $d_x > d_y$:

$$k_x = e^{\frac{2\pi \cdot (\theta_x - \theta_z)}{(\mu \cdot w + w_D) \cdot \rho_z}} \quad (17.36)$$

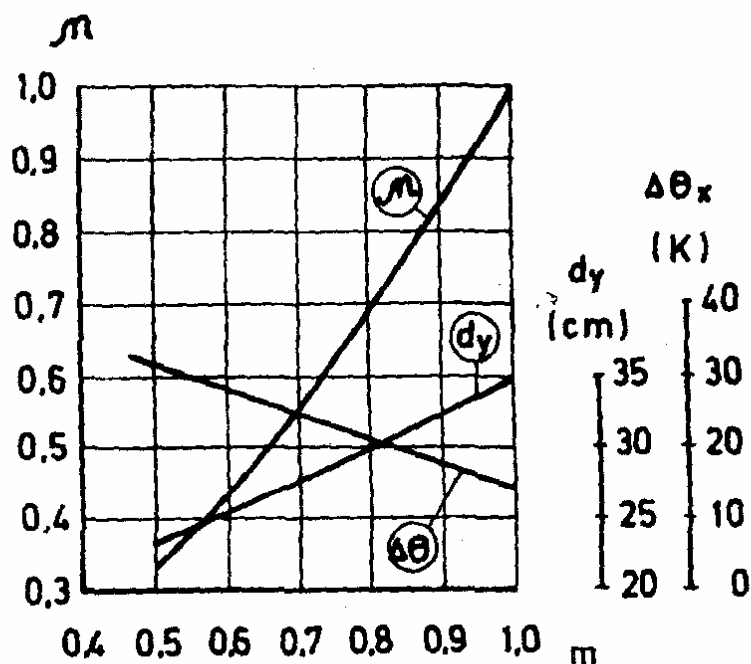
a za $d_y > d_x$:

$$k_x = e^{\frac{\frac{2\pi(\theta_x - \theta_z)}{\rho_z} + (1-\mu) \cdot w \cdot \ln k_y}{w + w_D}} ; k_y = \ln \frac{4h}{d_y} \quad (17.37.)$$

Izraz za d_x dat je jednačinom (17.17.).

Za isušivanje zemljišta nije merodavna samo apsolutna temperatura zemljišta, već takođe i temperaturna razlika između granične izoterme isušivanja i temperature zemljišta, U stvari od temperaturne razlike u zemljištu zavisi migracija vlage oko kabla.

Proračuni prema VDE 0298, Teil 2 zasnivaju se na temperaturnoj razlici. Za stalno opterećenje (faktor opterećenja $m=1$) uzima se da se isušivanje dešava pri temperaturnoj razlici od 15 K (20°C zemljište + $15^{\circ}\text{C} = 35^{\circ}\text{C}$), a za $m=0,5$ pri 32,5 K (20°C zemljište + $32,5^{\circ}\text{C} = 52,5^{\circ}\text{C}$).



Sl. 17.49. Faktor opterećenja m za veličine: μ - faktor gubitaka; $\Delta\theta_x$ - temperaturna razlika granične izoterme isušivanja zemljišta i zemljišta; d_y - karakteristični prečnik.
(za $\rho_z=1\text{ Km/W}$ i srednji oblik dijagrama opterećenja - aritmetička sredina dijagrama opterećenja sinusoidnog i pravougaonog oblika)

Primer 17.5. Proračun dozvoljene struje pri promenljivom opterećenju srednjeg oblika sa isušivanjem zemljišta.

- Kabl IPO 13-AS $3 \times 150\text{mm}^2$, 6/10 kV,
- $m=0,7$

$$T_{xy} = \frac{2,5}{2\pi} \cdot \left[\ln \frac{4 \cdot 70}{5,6} + (0,55 - 1) \cdot \ln \frac{4 \cdot 70}{28,6} \right] = 2,5 \cdot T_y = 1,14 \text{ Km/W}$$

$$I = \sqrt{\frac{65 - 20 - 0,05 \cdot (0,248 + 1,55) + \frac{2,5 - 1}{1} \cdot (30 - 20)}{3 \cdot 0,247 \cdot (0,456 + 1,14)}} \cdot 10^3$$

$$I = 225 \text{ A}$$

Za $d_y > d_x$:

$$k_x = e \frac{\frac{2\pi \cdot (30 - 20)}{1} + (1 - 0,55) \cdot 3 \cdot 0,247 \cdot 225^2 \cdot 10^{-3} \cdot \ln \frac{4 \cdot 70}{28,6}}{3 \cdot 0,247 \cdot 225^2 \cdot 10^{-3} + 0,05} = 14,88$$

Prečnik isušene zone je:

$$d_x = \frac{4 \cdot 70 \cdot 14,88}{14,88^2 - 1} = 19 \text{ cm}$$

Pa je zadovoljen pretpostavljeni uslov da je:

$$d_y = 28,6 \text{ cm} > d_x = 19 \text{ cm}$$

Koristeći metodologiju proračuna po VDE 0298, pa uzimajući podatke se dijagrama prikazanog na sl. 17.49. za $m=0,7$ dobija se dozvoljeno strujno opterećenje:

$$T_{xy} = \frac{2,5}{2\pi} \cdot \left[\ln \frac{4 \cdot 70}{5,6} + (0,55 - 1) \cdot \ln \frac{4 \cdot 70}{27,5} \right] = 1,18 \text{ Km/W}$$

$$I = \sqrt{\frac{65 - 20 + \frac{2,5 - 1}{1} \cdot (45 - 20)}{3 \cdot 0,247 \cdot (0,456 + 1,18)}} \cdot 10^3$$

$$I \approx 260 \text{ A}$$

(zanemareni su dielektrični gubici što se moglo učiniti i za prethodni slučaj).

Vrednost od 260 A odgovara tabličnoj vrednosti struje prema VDE 0289, Teil 2, od 259 A, što se i moglo očekivati.

$$k_x = e \frac{\frac{2\pi \cdot (45-20)}{1} + (1-0,55) \cdot 3 \cdot 0,247 \cdot 260^2 \cdot 10^{-3} \cdot \ln \frac{4,70}{27,5}}{3 \cdot 0,247 \cdot 260^2 \cdot 10^{-3} + 0,06} = 65$$

Prečnik isušene zone je:

$$d_x = \frac{4 \cdot 70 \cdot 65}{65^2 - 1} = 4,3 \text{ cm}$$

što je manje od prečnika kabla pa nema isušivanja. U stvari se smatra da za $m < 0,75$ nema isušivanja (za papirne kablove).

Stoga ispitajmo to, i uzмимо da je $m=0,75$, te koristeći podatke sa sl. 17.49. dobija se:

$$T_{xy} = \frac{2,5}{2\pi} \cdot \left[\ln \frac{4,70}{5,6} + (0,62-1) \cdot \ln \frac{4,70}{28,3} \right] = 2,5 \cdot T_y = 1,2 \text{ Km/W}$$

$$I = \sqrt{\frac{65 - 20 + \frac{2,5-1}{1} \cdot (43-20)}{3 \cdot 0,247 \cdot (0,456 + 1,2)} \cdot 10^3}$$

$$I = 254 \text{ A}$$

$$k_x = e \frac{\frac{2\pi \cdot (43-20)}{1} + (1-0,62) \cdot 3 \cdot 0,247 \cdot 254^2 \cdot 10^{-3} \cdot \ln \frac{4,70}{28,3}}{3 \cdot 0,247 \cdot 254^2 \cdot 10^{-3} + 0,05} = 48,75$$

$$d_x = \frac{4 \cdot 70 \cdot 48,75}{48,75^2 - 1} = 5,7 \text{ cm} \approx d_k = 5,6 \text{ cm}$$

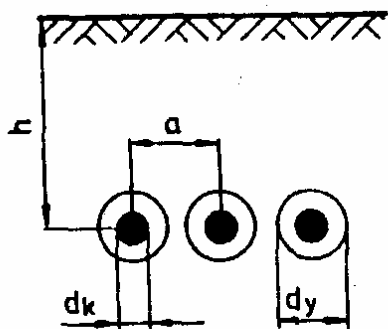
Granična zona isušivanja se praktično poklapa sa prečnikom kabla. U stvari tek za $m > 0,75$ nastaje zona isušivanja.

Jednožilni kablovi položeni jedan pored drugog

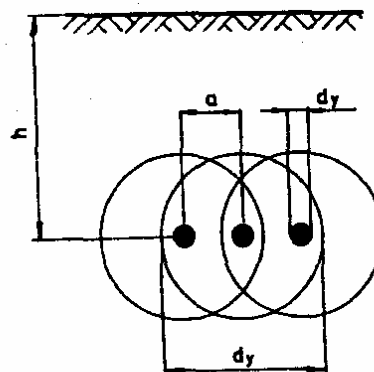
Za $d_y \leq 2a$ važi:

$$T_{xy} = \frac{\rho_x}{2\pi} \left[\ln \frac{4h}{d_k} + (\mu - 1) \cdot \ln \frac{4h}{d_y} + 2\mu \cdot \ln \sqrt{\left(\frac{2h}{a}\right)^2 + 1} \right] \quad (17.38.)$$

$$T_{zi} = \frac{\rho_x}{2\pi} \left(\ln \frac{4h}{d_k} + 2 \ln \sqrt{\left(\frac{2h}{a}\right)^2 + 1} \right) \quad (17.39.)$$



Sl. 17.50. Jednožilni kablovi položeni jedan pored drugog ($d_y \leq 2a$)



Sl. 17.51. Jednožilni kablovi položeni jedan pored drugog ($d_y \geq 2a$)

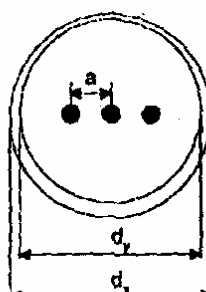
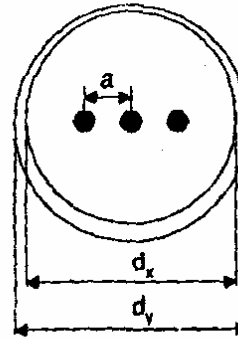
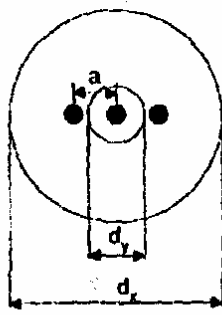
Za $d_y \geq 2a$ važi:

$$T_{xy} = \frac{\rho_x}{2\pi} \left[\ln \frac{4h}{d_k} + 3(\mu - 1) \cdot \ln \frac{4h}{d_y} + 2 \ln \sqrt{\left(\frac{2h}{a}\right)^2 + 1} \right] \quad (17.51.)$$

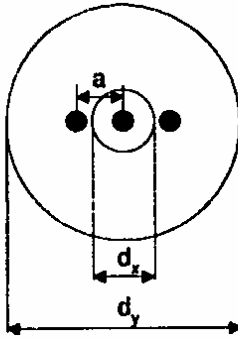
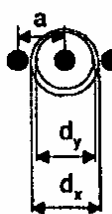
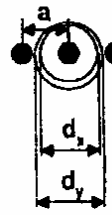
$$T_{zi} = \frac{\rho_x}{2\pi} \left(\ln \frac{4h}{d_k} + 2 \ln \sqrt{\left(\frac{2h}{a}\right)^2 + 1} \right) \quad (17.52.)$$

Za proračun zone isušivanja kod jednožilnih kablova razlikuje se šest slučajeva.

Tab. 17.15. Faktor k_x jednožilnih kablova, položenih jedan pored drugog, za razne odnose d_x , d_y i a

<p>$d_x > d_y > 2a$</p> 
$k_x = e^{\frac{2\pi \cdot (0_x - 0_z)}{3 \cdot \rho_z \cdot (\mu \cdot w + w_D)}}$
<p>$d_y > d_x > 2a$</p> 
$k_x = e^{\frac{2\pi \cdot (0_x - 0_z)}{3 \rho_z} + \frac{(1-\mu) \cdot w \cdot \ln \frac{4h}{d_y}}{w+w_D}}$
<p>$d_x > 2a > d_y$</p> 
$k_x = e^{\frac{2\pi \cdot (0_x - 0_z)}{3 \cdot \rho_z \cdot (\mu \cdot w + w_D)}}$

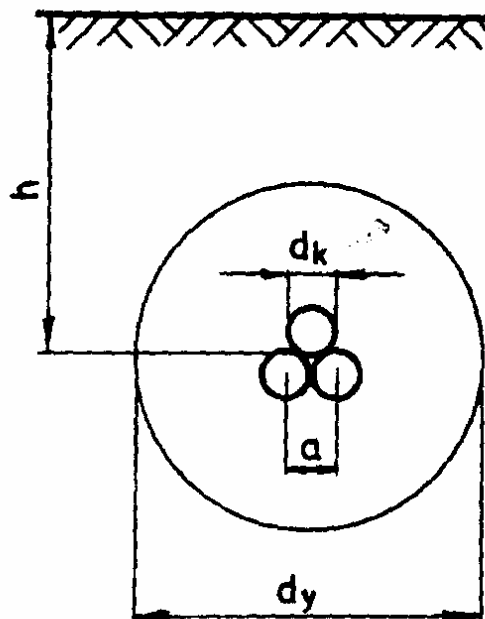
Tab. 17.15. Nastavak

<p style="text-align: center;">$d_y > 2a > d_x$</p>  $\frac{2\pi \cdot (\theta_x - \theta_z)}{\rho_z} + 3(1-\mu) \cdot w \cdot \ln \frac{4h}{d_y} - (w+w_D) \cdot 2 \ln \sqrt{\left(\frac{2h}{a}\right)^2 + 1}$ <p style="text-align: center;">$k_x = e$ $w+w_D$</p>
<p style="text-align: center;">$2a > d_x > d_y$</p>  $\frac{2\pi \cdot (\theta_x - \theta_z)}{\rho_z} - (\mu \cdot w + w_D) \cdot 2 \ln \sqrt{\left(\frac{2h}{a}\right)^2 + 1}$ <p style="text-align: center;">$k_x = e$ $\mu \cdot w + w_D$</p>
<p style="text-align: center;">$2a > d_y > d_x$</p>  $\frac{2\pi \cdot (\theta_x - \theta_z)}{\rho_z} + (1-\mu) \cdot w \cdot \ln \frac{4h}{d_y} - (\mu \cdot w + w_D) \cdot 2 \ln \sqrt{\left(\frac{2h}{a}\right)^2 + 1}$ <p style="text-align: center;">$k_x = e$ $w+w_D$</p>

Jednožilni kablovi položeni u snopu

$$T_{xy} = \frac{\rho_x}{2\pi} \left[\ln \frac{4h}{d_k} + 3(\mu - 1) \cdot \ln \frac{4h}{d_y} + 2 \ln \sqrt{\left(\frac{2h}{a}\right)^2 + 1} \right] \text{ [Km/W]} \quad (17.42.)$$

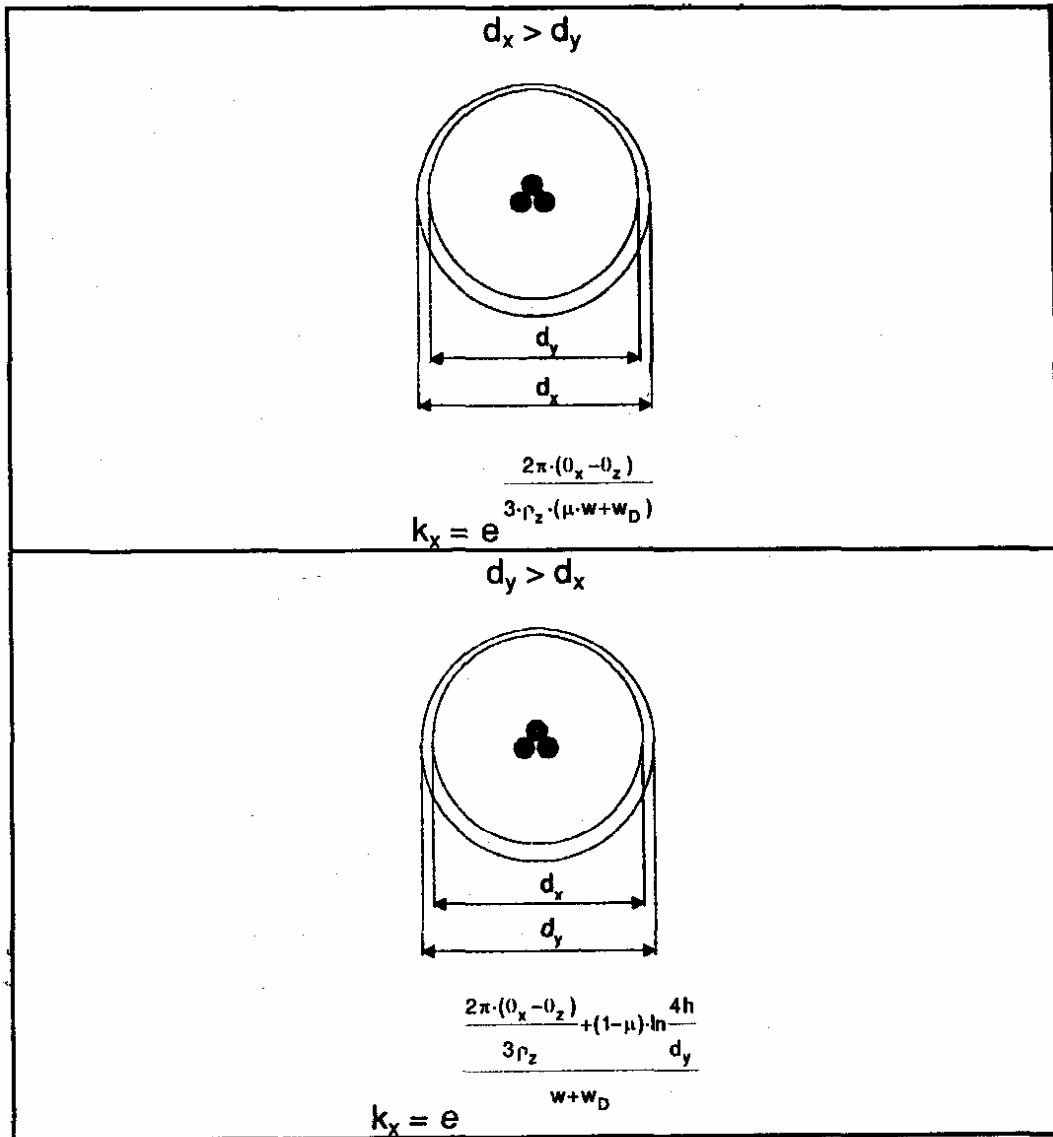
$$T_{zi} = \frac{\rho_x}{2\pi} \left(\ln \frac{4h}{d_k} + 2 \ln \sqrt{\left(\frac{2h}{a}\right)^2 + 1} \right) \text{ [Km/W]} \quad (17.43.)$$



Sl. 17.52. Jednožilni kablovi položeni u snopu

Za proračun zone isušivanja razlikuju se dva slučaja: $d_x > d_y$ i $d_x < d_y$.

Tab. 17.16. Faktor k_x jednožilnih kablova položenih u snopu u zavisnosti od odnosa d_x i d_y



Primer 17.6. Proračun dozvoljene struje pri promenljivom opterećenju srednjeg oblika sa isušivanjem.

- Jednožilni kabl: XHE 48-A $1 \times 1000/95 \text{ mm}^2$, 64/110 kV,
- $m=0,85$,
- Ostali podaci su isti kao u primeru 17.3. (izuzev θ_x).

Uz pretpostavku da je $d_y < 2a$:

$$T_{xy} = \frac{2,5}{2\pi} \cdot \left[\ln \frac{400}{9,1} + (0,75 - 1) \cdot \ln \frac{400}{32} + 0,75 \cdot 2 \ln \sqrt{\left(\frac{400}{18,2}\right)^2 + 1} \right]$$

$$T_{xy} = 4,12 \text{ Km/W}$$

Podaci za μ i d_y uzeti su sa dijagrama prikazanog na slici 17.49. Vidi se da je $d_y = 32 \text{ cm} < 2a = 36,4 \text{ cm}$.

$$I = \sqrt{\frac{90 - 15 - 0,15 \cdot (0,23 + 5,2) + \frac{2,5 - 1,2}{1,2} \cdot 20}{0,04 \cdot (1,5 + 4,12)}} \cdot 10^3 = 653 \text{ A}$$

Podaci za T_{zi} , T_{kf} , w_D , T_{KD} i R_{efj} uzeti su iz primera 17.3. a $\Delta\theta = \theta_x - \theta_z = 40 - 20 = 20 \text{ K}$ sa dijagrama prikazanog na slici 17.49.

Ako se pretpostavlja da je $2a > d_y > d_x$ sledi:

$$k_x = e \frac{\frac{2\pi \cdot 20}{1,2} + (1 - 0,75) \cdot 0,04 \cdot 653^2 \cdot 10^{-3} \cdot \ln \frac{400}{32} - (0,75 \cdot 0,04 \cdot 653^2 \cdot 10^{-3} + 0,15) \cdot 2 \ln \sqrt{\left(\frac{200}{18,2}\right)^2 + 1}}{0,04 \cdot 653^2 \cdot 10^{-3} + 0,15}$$

$$k_x = 22,2$$

Prečnik granične zone isušivanja srednjeg kabla je:

$$d_x = \frac{4 \cdot 100 \cdot 22,2}{22,2^2 - 1} = 18 \text{ cm}$$

Ispunjen je uslov $2a = 36,4 \text{ cm} > d_y = 32 \text{ cm} > d_x = 18 \text{ cm}$.

Primedba: U ovom primeru T_{kf} je uzeto za tzv. 100% - stalno opterećenje ($m=1$), a razmatra se promenljivo opterećenje ($m=0,85$). Vrednosti su približno iste jer je $\lambda_M = 0$.

17.2.2. GRUPA KABLOVA ISTOG TIPA I PROMENLJIVOG STRUJNOG OPTEREĆENJA, SA ISUŠIVANJEM ZEMLJIŠTA

Višežilni kablovi

Dozvoljeno strujno opterećenje n višežilnih kablova istog tipa i jednakog promenljivog strujnog opterećenja sa pojavom isušivanja zemljišta, u amperima, je:

$$I = \sqrt{\frac{\theta_{pd} - \theta_z - w_D \cdot (T_{KD} + T_{zi} + \Delta T_{zi}) + \frac{\rho_x - \rho_z}{\rho_z} \cdot (\theta_x - \theta_z)}{N \cdot R_{efj} \cdot (T_{kf} + T_{xy} + \Delta T_{xy})}} \cdot 10^3 \quad (17.44.)$$

gde je:

$$\Delta T_{zi} = \frac{\rho_x}{2\pi^2} \sum_{i=1}^n \ln \frac{c_i}{c'_i} \quad [\text{Km/W}], \quad (17.45.)$$

$$\Delta T_{xy} = \frac{\rho_x}{2\pi} \cdot \left[\sum_{i=2}^{n_y} \ln \frac{c_i}{c'_i} + \mu \sum_{i=n_y+1}^n \ln \frac{c_i}{c'_i} + (n_y - 1) \cdot (\mu - 1) \cdot \ln \frac{4h}{d_y} \right] [\text{Km/W}], \quad (17.46.)$$

n - broj kablova,

n_y - broj kablova unutar karakterističnog prečnika d_y ,

- oznake c_i i c'_i date su na slici 17.36.,
- ostale veličine su prema jednačinama (17.16.) i (17.34.)

Jednožilni kablovi

U ovom slučaju važi izraz za dozvoljeno strujno opterećenje (17.44.), s tim da je:

$$\Delta T_{xy} = \frac{\rho_x}{2\pi} \cdot \left[\sum_{i=4}^{n_y} \ln \frac{c_i}{c'_i} + \mu \sum_{i=n_y+1}^n \ln \frac{c_i}{c'_i} + (n_y - 1) \cdot (\mu - 1) \cdot \ln \frac{4h}{d_y} \right] [\text{Km/W}] \quad (17.47.)$$

$$\Delta T_i = \frac{\rho_x}{2\pi^4} \sum_{i=1}^n \ln \frac{c_i}{c'_i} \quad [\text{Km/W}] \quad (17.48.)$$

Širenje zone isušivanja zemljišta

Pod uticajem n kablova zona isušivanja zemljišta se određuje na osnovi izraza:

$$\Delta\theta_x = \theta_x - \theta_z = (\mu \cdot w + w_D) \cdot \frac{\rho_z}{2\pi} \sum_{i=1}^{i=n} \ln \sqrt{\frac{(y+h_i)^2 + (x_i-x)^2}{(y-h_i)^2 + (x_i-x)^2}} \text{ [K]} \quad (17.49.)$$

gde je:

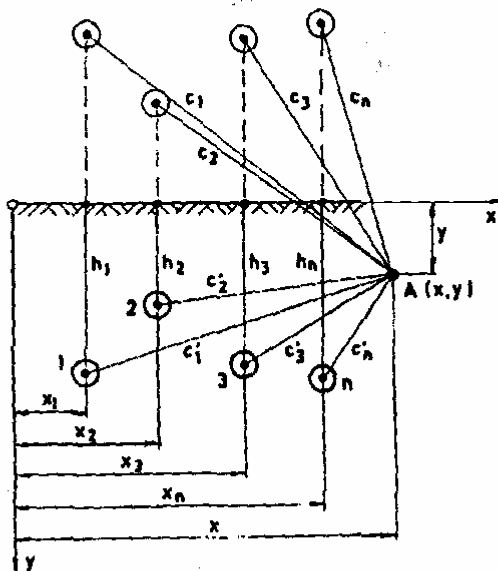
$$w = N \cdot R_{efj} I^2,$$

I - dozvoljena struja za razmatrani slučaj,

w_D - dielektrični gubici,

x, y, h - kao na slici 17.53.

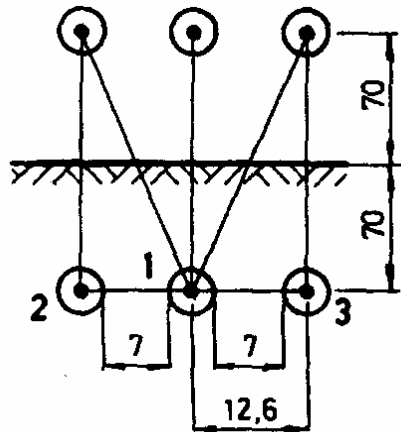
U stvari odredi se najpre granična izoterma isušivanja θ_x na osnovu slike 17.49., pa se onda određuje koordinata x (y se usvaja) za potreban broj tačaka na graničnoj izotermi isušivanja (slika 17.53.).



Sl. 17.53. Zagrevanje tačke A

Primer 17.7. Proračun dozvoljene struje tri kabla IPO 13-A $3 \times 150 \text{ mm}^2$, 6/10 kV, pri promenljivom opterećenju (srednjeg oblika) sa isušivanjem zemljišta.

- $m=0,7$
- kablovi položeni jedan pored drugog, sa međuosnim rastojanjem $a = 0,7 \text{ m}$
- ostali podaci su prema primerima 17.1., 17.2. i 17.5.



$$\Delta T_{xy} = \frac{2,5}{2\pi} \cdot 0,55 \cdot 2 \ln \frac{\sqrt{140^2 + 12,6^2}}{12,6} = 1,05 \text{ Km/W}$$

$$T_{xy} = 1,18 \text{ Km/W (iz primera 17.5.)}$$

Pretpostavka je da je karakterističnim prečnikom obuhvaćen samo jedan kabl (kabl broj 1).

$$I = \sqrt{\frac{65 - 20 + \frac{2,5 - 1}{1} \cdot (45 - 20)}{3 \cdot 0,247 \cdot (0,456 + 1,05 + 1,18)}} \cdot 10^3 \approx 204 \text{ A}$$

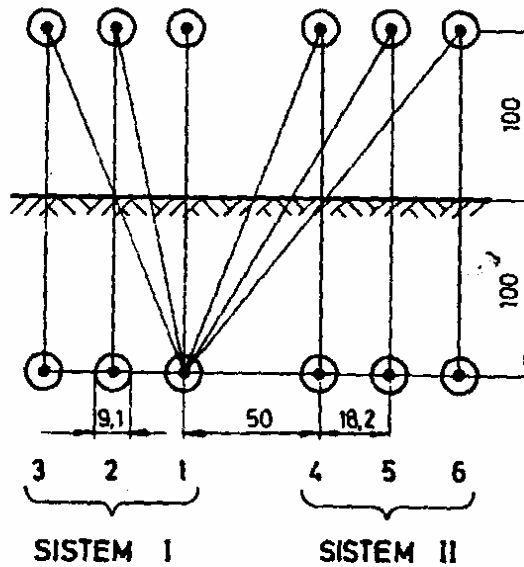
Dielektrični gubici su vrlo mali, bez uticaja na rezultat. Po VDE 0298, Teil 2, dobija se vrednost $I = I_N \cdot k = 259 \cdot 0,8 = 207 \text{ A}$, a ova mala razlika dolazi od odstupanja pri očitavanju vrednosti $\Delta\theta_x = \theta_x - \theta_z$ sa dijagrama prikazanog na slici 17.49.

Primer 17.8. Proračun dozvoljene struje šest jednožilnih kablova 64/110 kV pri promenljivom opterećenju (srednjeg oblika) sa isušivanjem zemljišta.

- Jednožilni kabl: XHE 48-A 1×1000/95 mm² 64/110 kV,
- $m = 0,85$,
- osno rastojanje kablova u jednom sistemu kablova $a = 18,2 \text{ cm}$,
- osno rastojanje sistema kablova $b = 50 \text{ cm}$,
- ostali podaci su kao u primerima 17.3 i 17.6.

Uzimajući da su karakterističnim prečnikom d_y obuhvaćeni samo kablovi jednog sistema:

$$\Delta T_{xy} = \frac{2,5}{2\pi} \left[0,75 \left(\ln \frac{\sqrt{200^2 + 50^2}}{50} + \ln \frac{\sqrt{200^2 + 68,2^2}}{68,2} + \ln \frac{\sqrt{200^2 + 86,4^2}}{86,4} \right) + (3-1) \cdot (0,75-1) \cdot \ln \frac{4 \cdot 100}{32} \right] = 0,52 \text{ Km/W}$$



$$\Delta T_i = \frac{2,5}{2\pi} \left(\ln \frac{\sqrt{200^2 + 50^2}}{50} + \ln \frac{\sqrt{200^2 + 68,2^2}}{68,2} + \ln \frac{\sqrt{200^2 + 86,4^2}}{86,4} \right)$$

$$\Delta T_i = 1,36 \text{ Km/W}$$

$$I = \sqrt{\frac{90 - 15 - 0,15 \cdot (0,23 + 5,2 + 1,36) + \frac{2,5-1}{1} \cdot 20}{0,04 \cdot (1,5 + 4,12 + 0,52)}} \cdot 10^3$$

$$I = 650 \text{ A}$$

I u ovom slučaju su se mogli zanemariti dielektrični gubici, jer je njihov uticaj na rezultat beznačajan.

17.3. KABL U VAZDUHU

Dozvoljeno strujno opterećenje kabla u vazduhu dato je izrazom¹⁾:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta_p \cdot 10^3}{N \cdot R_{eff} \cdot (T_{kd} + T_v)}} \quad [\text{A}] \quad (17.50.)$$

gde je:

$$\Delta\theta_p = \theta_{pd} - \theta_v$$

θ_v - temperatura vazduha (° C),

T_v - toplotni otpor vazduha (Km/W),

ostale oznake su kao u izrazu (17.2.)

Sa kabla koji se nalazi u vazduhu, u horizontalnom položaju, toplota se odvodi prirodnom konvekcijom i zračenjem, bez uticaja spoljnih toplotnih izvora i bez povećanja temperature okoline usled njegovog zagrevanja, pri suvom vazduhu atmosferskog pritiska 1013 hPa (nivo mora).

Izraz za dozvoljeno strujno opterećenje (17.50.) odgovara za stalno opterećenje (tj. $m = 1$), a takođe približno i za tzv. elektrodistributivni dijagram opterećenje, jer je zagrevanje i hlađenje kabla u vazduhu znatno kraće nego u zemlji.

$$T_v = \frac{1}{2r_k \cdot \pi \cdot (f_k \cdot \alpha_k + f_z \cdot \alpha_z)} \quad [\text{Km/W}] \quad (17.51.)$$

gde je:

r_k - spoljašnji poluprečnik kabla (m),

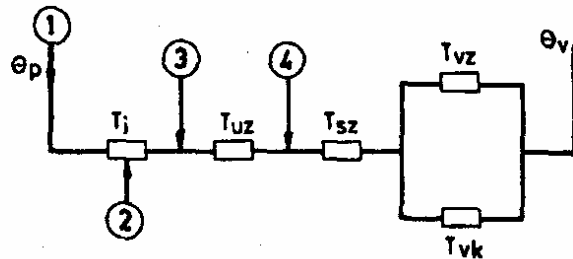
α_k - koeficijent konvekcije ($\text{W/m}^2\text{K}$),

α_z - koeficijent zračenja ($\text{W/m}^2\text{K}$),

f_k - koeficijent rasporeda kablova u slučaju konvekcije,

f_z - koeficijent rasporeda kablova u slučaju zračenja.

¹⁾ Dielektrični gubici nisu uzeti u obzir.



Sl. 17.54. Šema prenošenja toplote sa provodnika na vazduh

1 - Džulovi gubici; 2 - dielektrični gubici; 3 - gubici u metalnom omotaču; 4 - gubici u mehaničkoj zaštiti; T_i - toplotni otpor izolacije; T_{uz} - toplotni otpor unutrašnje zaštite; T_{sz} - toplotni otpor spoljašnje zaštite; T_{vz} - toplotni otpor vazduha usled zračenja; T_{vk} - toplotni otpor vazduha usled konvekcije; θ_p - temperatura provodnika; θ_v - temperatura vazduha

$$\alpha_k = K' \cdot \frac{0,0185}{K \cdot 2r_k} + K'' \cdot 1,08 \cdot \left(\frac{\Delta\theta_a}{K \cdot 2r_k} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (17.52.)$$

gde je:

$\Delta\theta_a$ - temperaturna razlika površine kabla i vazduha: $\Delta\theta_a = \theta_k - \theta_v$,

$$K' = 0,919 + \frac{\theta_{sr}}{369},$$

$$K'' = 1,033 - \frac{\theta_{sr}}{909},$$

$$\theta_{sr} = \frac{\theta_k + \theta_v}{2}.$$

Odvođenje toplote sa kabla zavisi od nadmorske visine:

$$\alpha_k = K' \cdot \frac{0,0185}{K \cdot 2r_k} + K'' \cdot 1,08 \cdot \left(\frac{\Delta\theta_a}{K \cdot 2r_k} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \left(\frac{p}{1013} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (17.53.)$$

gde je p atmosferski pritisak (hPa).

Tab. 17.17. Atmosferski pritisak u zavisnosti od nadmorske visine

Nadmorska visina (m)	0	1000	2000	3000	4000
p (hPa)	1013	899	795	701	616


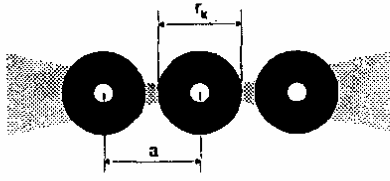
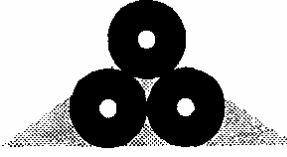

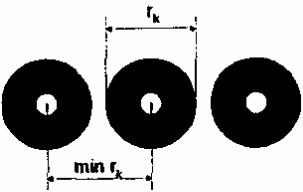
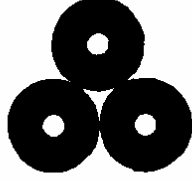
$$\alpha_2 = \frac{K_E \cdot \sigma \cdot ((273 + \theta_k)^4 - (273 + \theta_v)^4)}{\Delta\theta_a \cdot 10^8} \quad (17.54.)$$

gde je $\sigma = 5,67 \text{ W/m}^2\text{K}^4$ - konstanta zračenja crnog tela.

Tab. 17.18. Koeficijent emisije K_E

Materijal	K_E
Asfaltirana juta	1
PVC (crni)	0,95
Crno lakirana metalna površina kabla	0,8 - 0,9

Tab. 17.19. Vrednosti veličina f_z , f_k i K

Zračenje	f_z	
	1	
	$\text{srednji kabl: } 1 - \frac{2 \arctg \frac{2r_k}{2a}}{180^\circ}$ $\text{spoljašnji kabl: } 1 - \frac{\arctg \frac{2r_k}{2a}}{180^\circ}$	
	2/3	
Konvekcija	f_k	K
	1	1
	1	1
	2/3	2/3

Toplotni otpor vazduha zavisi od temperature površine kabla, a takođe i temperatura površine kabla zavisi od otpora vazduha. Do veličine toplotnog otpora vazduha dolazi se iterativnim postupkom.

Postoji veza:

$$\Delta\theta_a = \frac{T_v}{T_{kf} + T_v} \cdot \Delta\theta_p \quad (17.55)$$

Kad dielektrični gubici (w_D) nisu zanemarljivi ovaj izraz glasi:

$$\Delta\theta_a = \frac{\Delta\theta_p - \Delta\theta_D}{T_{kf} + T_v} \cdot T_v + w_D \cdot T_v \quad (17.56.)$$

gde je:

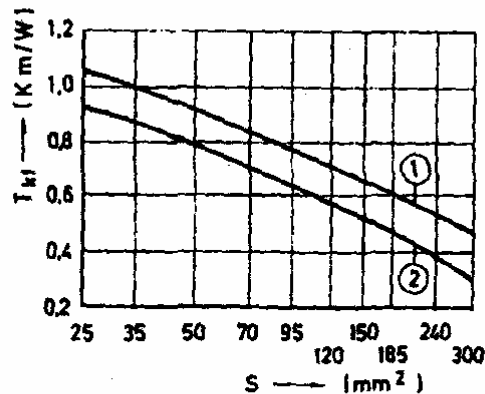
$$\Delta\theta_D = w_D \cdot (T_{KD} + T_v),$$

$$T_{KD} = \frac{T_i}{2} + T_{uz} + T_{sz}$$

Vidi izraze (17.12.) i (17.16.).

Postupak iteracije se sastoji u izračunavanju $\Delta\theta_a$ za pretpostavljenu vrednost T_v , a na osnovu izraza (17.55.). Zatim se izračunava vrednost T_v na osnovu izraza (17.51.). Postupak se ponavlja dok razlika pretpostavljene i izračunate vrednosti za T_v ne bude dovoljno mala. Kod snopa kablova površina hlađenja srednjeg kabla je smanjena na oko 2/3. Stoga će i fiktivni toplotni otpor kabla biti nešto veći od vrednosti koja bi se dobila prema izrazu (17.10). To proizilazi iz manje vrednosti veličine λ_0 (odnos gubitaka u električnoj zaštiti i u provodniku), jer je ($T_{uz} = 0$ i $\lambda_M = 0$):

$$T_{kf} = \frac{T_i}{1 + \lambda_0} + T_{sz} \quad (\text{vidi izraz 17.3.})$$



Sl. 17.55. Fiktivni toplotni otpor jednožilnih kablova u snopu (tip kabla XHE, položen u vazduhu) za razne preseke provodnika, za raspored kablova jedan pored drugog može se koristiti dijagram prikazan na sl. 17.47.
1 - 12/20 kV; 2 - 6/10 kV

Kod jednožičnih kablova u snopu uticaj metalne mase električne zaštite utiče povoljno na odvođenje toplote sa kabla. Ovaj uticaj za standardne preseke električne zaštite (16,25 i 35 mm² Cu) je zanemarljiv. Za veće preseke električne zaštite, 95 mm² i više, ovaj uticaj može biti interesa.

Za jednožične kablove u snopu važi:

$$T_i = f_{\varphi} \cdot \frac{\rho_i}{2\pi} \cdot \ln \frac{d_i}{d_p} \quad (17.57.)$$

$$T_{sz} = f_{\varphi} \cdot \frac{\rho_{sz}}{2\pi} \cdot \frac{d_k}{d_o} \quad (17.58.)$$

gde je:

$$f_{\varphi} = \frac{\pi}{\pi - \varphi}$$

$$\varphi = \frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{180^\circ} \cdot \arcsin \left(\frac{d_p}{2d_k} \right)$$

d_i - prečnik izolacije,

d_p - prečnik provodnika,

d_k - spoljašnji prečnik kablova,

d_o - prečnik preko električne zaštite,

ρ_i - specifični toplotni otpor izolacije (Km/W),

ρ_{sz} - specifični toplotni otpor spoljašnjeg zaštitnog omotača (Km/W),

(d_i , d_p , d_k i d_o u istim jedinicama).

Pri vertikalnom polaganju kablova do većeg izražaja dolazi odvođenje toplote konvekcijom. Ako je dužina vertikalno položenog kabla veća oko 3 puta od prečnika kabla onda dolazi do jačeg odvođenja toplote konvekcijom no kad je položen horizontalno.

Uticaj sunca

Sunce zagreva kabl direktnim zračenjem, te mu povećava temperaturu na:

$$\Delta\theta_s = K_a \cdot \alpha_k \cdot E \cdot T'_v \text{ [K]} \quad (17.59.)$$

gde je:

K_a - koeficijent absorpcije,

α_k - spoljašnji prečnik kabla (mm),

$E = 1 \text{ kW/m}^2$ - jačina sunčevog zračenja u slučaju nepoznavanja tačnih vrednosti ($E_{\max} = 1,35 \text{ kW/m}^2$),

T'_v - toplotni otpor vazduha s obirom na sunčevo zračenje (Km/W).

Tab. 17.20. Koeficijent absorpcije K_a

Materijal	K_a
Asfaltna juta	0,8
Polivinilhlorid	0,6
Polietilen	0,4

Povećanje temperature površine kabla iznosi:

$$\Delta\theta_{as} = \frac{\Delta\theta_p - \Delta\theta_D}{T_{kf} + T'_v} \cdot T'_v + \frac{K_a \cdot d_k \cdot E \cdot T'_v}{T_{kf} + T'_v} \cdot T_{kf} + w_D \cdot T'_v \quad (17.60.)$$

Toplotni otpor vazduha je:

$$T'_v = \frac{1}{2r_k \cdot \pi \cdot (f_k \cdot \alpha_k + f_z \cdot \alpha_z)}$$

U jednačini (17.33.) umesto $\Delta\theta_a$ figuriraće $\Delta\theta_s$.

Zbog uzajamne zavisnosti T'_v i $\Delta\theta_{as}$ i ovde se do njihovih vrednosti dolazi postupkom iteracije. Dozvoljeno strujno opterećenje je dato izrazom:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta_p - \Delta\theta_D - \Delta\theta_s \cdot 10^3}{N \cdot R_{ef} \cdot (T_{kf} + T'_v)}} \text{ [A]} \quad (17.61.)$$

Primer 17.9. Proračun dozvoljene struje kabla IPO 13-A 3x150 6/10 kV položenog u vazduhu.

- Temperatura vazduha $\theta_v = 30^\circ \text{ C}$,
- Nadmorska visina: 0 m,
- Ostali podaci su kao u primeru 17.1.

Posle postupka iteracije sprovednog na računaru, koristeći izra (17.51.), (17.52.), (17.54.) i (17.55.), dobija se:

$$T_v = 0,467 \text{ Km/W} \quad \text{za } \Delta\theta_a = 20,7 \text{ K}$$

Dozvoljena struja je:

$$I = \sqrt{\frac{65 - 30}{3 \cdot 0,247 \cdot (0,32 + 0,467)}} \cdot 10^3 = 245 \text{ A}$$

Ova vrednost se zasniva na proračunu na osnovu IEC 0287. Međutim kad se uzme u obzir novi VDE 287, Teil 2, onda je:

$$T_{kf} = 0,456 \text{ Km/W} \text{ (prema dijagramu na slici 17.46.)}$$

a dozvoljeno strujno opterećenje je tada:

$$I = \sqrt{\frac{65 - 30}{3 \cdot 0,247 \cdot (0,456 + 0,467)}} \cdot 10^3 = 226 \text{ A}$$

Primer 17.10. Proračun dozvoljene struje tri jednožilna kabla 64/110 kV položena jedan pored drugog u vazduhu.

- Jednožilni kabl XHE 48-A 1x1000/95 mm², 64/110 kV,
- Temperatura vazduha $\theta_v = 30^\circ \text{ C}$,
- Međusobno osno rastojanje kablova $a = 18,2 \text{ cm}$,
- Nadmorska visina: 0 m,
- Bez uticaja sunca,
- Ostali podaci su kao u primeru 17.3.

Koristeći podatke za T_i , T_{uz} i T_{sz} iz primera 17.3.:

$$T_k = T_i + T_{uz} + T_{sz} = 0,36 + 0,017 + 0,05 \cong 0,4 \text{ Km/W}$$

Kako nema feromagnetnih materijala ($\lambda_M = 0$) ova se vrednost može približno uzeti za toplotni otpor kabla.

Posle postupka iteracije sprovedenog na računaru koristeći izraze (17.51.), (17.52.), (17.54.) i (17.55.) dobija se:

$$T_v \approx 0,3 \text{ Km/W} \quad \text{za } \Delta\theta_a = 25,7 \text{ K}$$

Dozvoljena struja je:

$$I = \sqrt{\frac{90 - 30}{0,04 \cdot (0,4 + 0,3)} \cdot 10^3} = 1464 \text{ A}$$

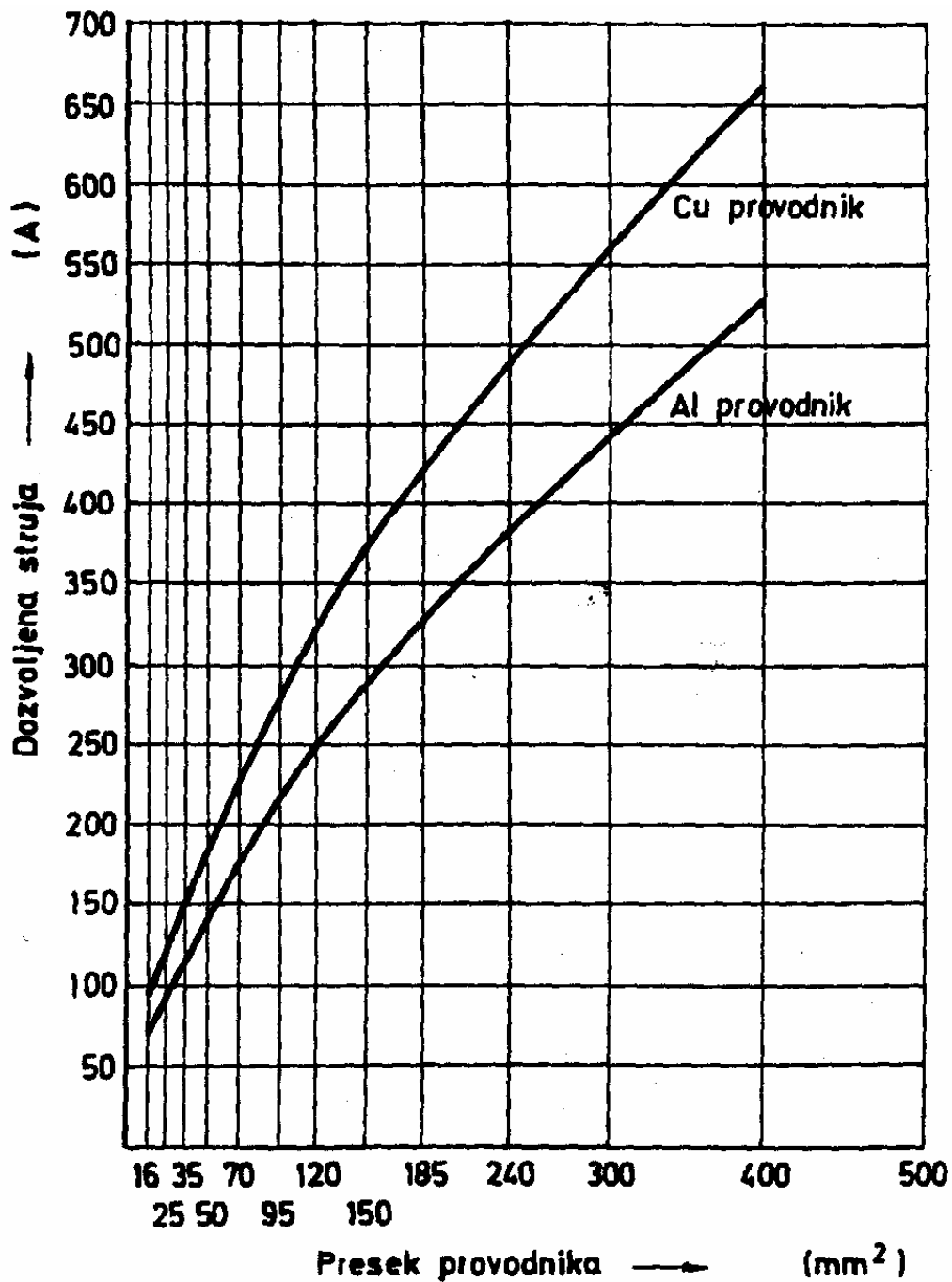
Ako se kablovi dodiruju dozvoljena struja će biti:

$$I = 1464 \cdot 0,8 = 1170 \text{ A}$$

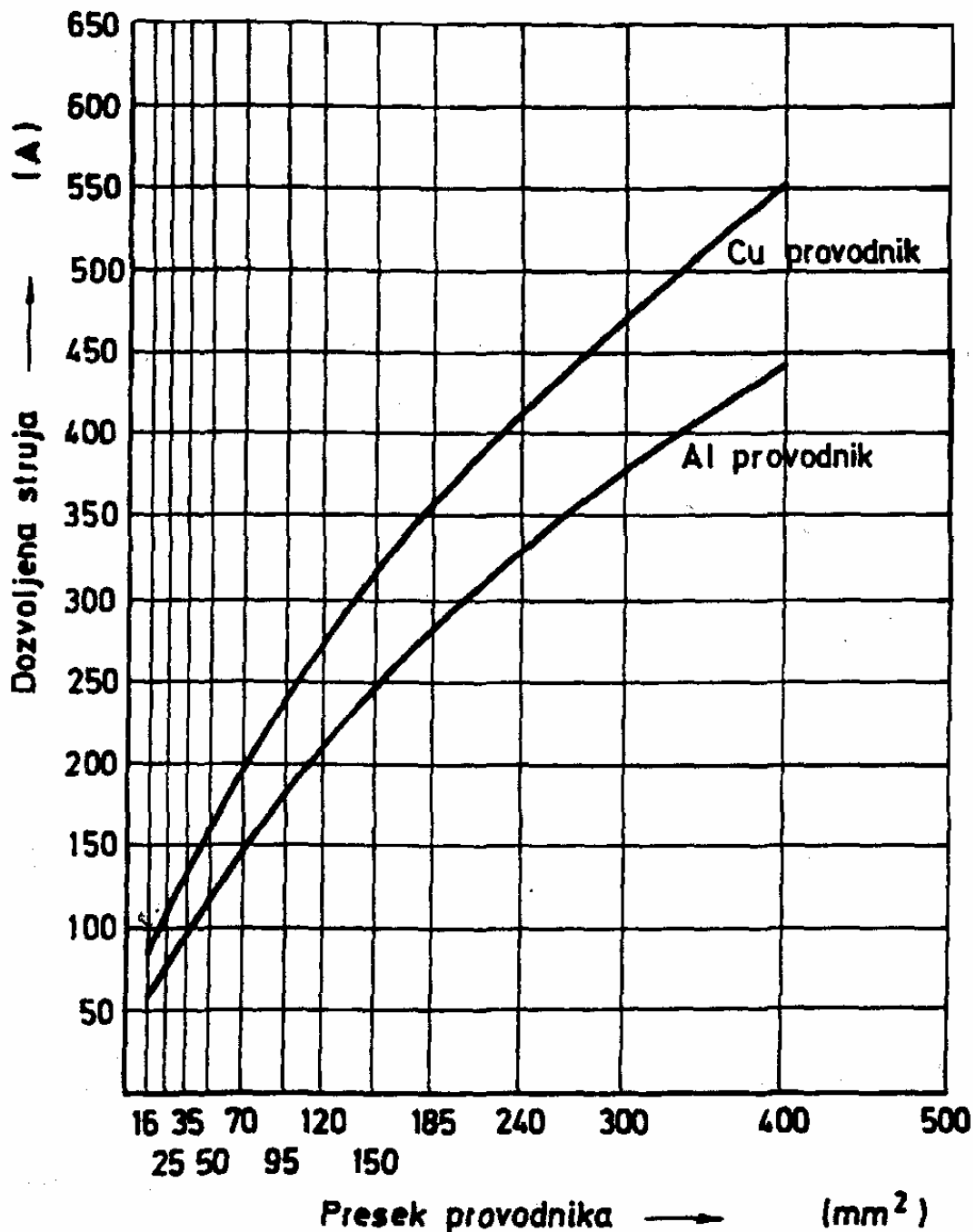
**A. NAZNAČENE STRUJE KABLOVA IZOLOVANIH
IMPREGNISANIM PAPIROM
POLOŽENIH U VAZDUHU
3,6/6; 6/10; 12/20; 20/35 kV**

Napomene:

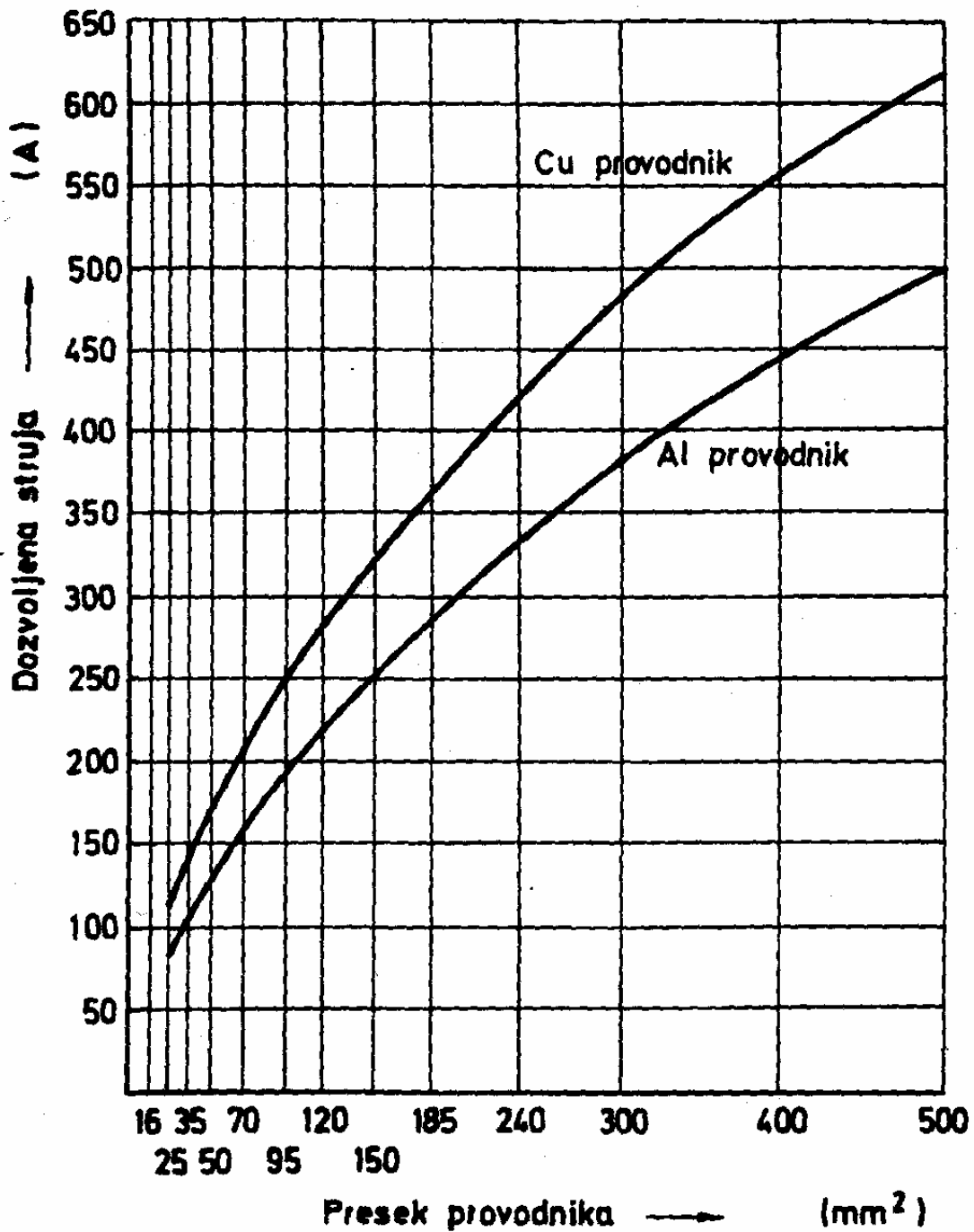
- *Strujna opterećenje se odnose na stalno, tzv. 100 % opterećenje i približno za promenljivo opterećenje*
- *Metalni plaštev kablova su uzemljeni na oba kraja*
- *Kablovi su zaštićeni od direktnog sunčevog zračenja*



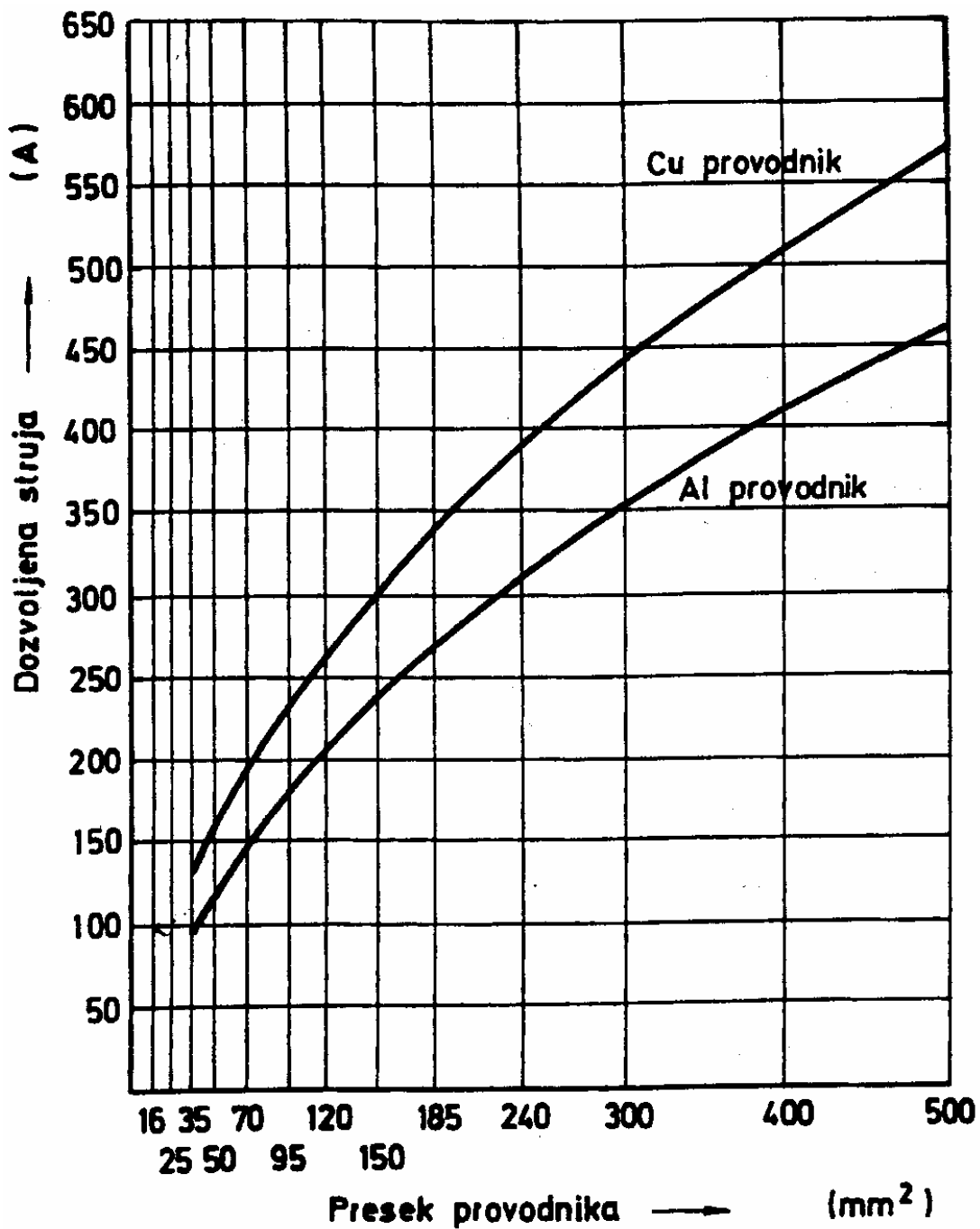
Sl. 17.56. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost)
"pojasnog" kabla: I(N)PO 13-(A), 3x..., 3,5/6 kV
temperatura vazduha: $\theta_v = 30^\circ \text{C}$
(Odnosi se i na "pojasne" kablove sa Al-plaštom)



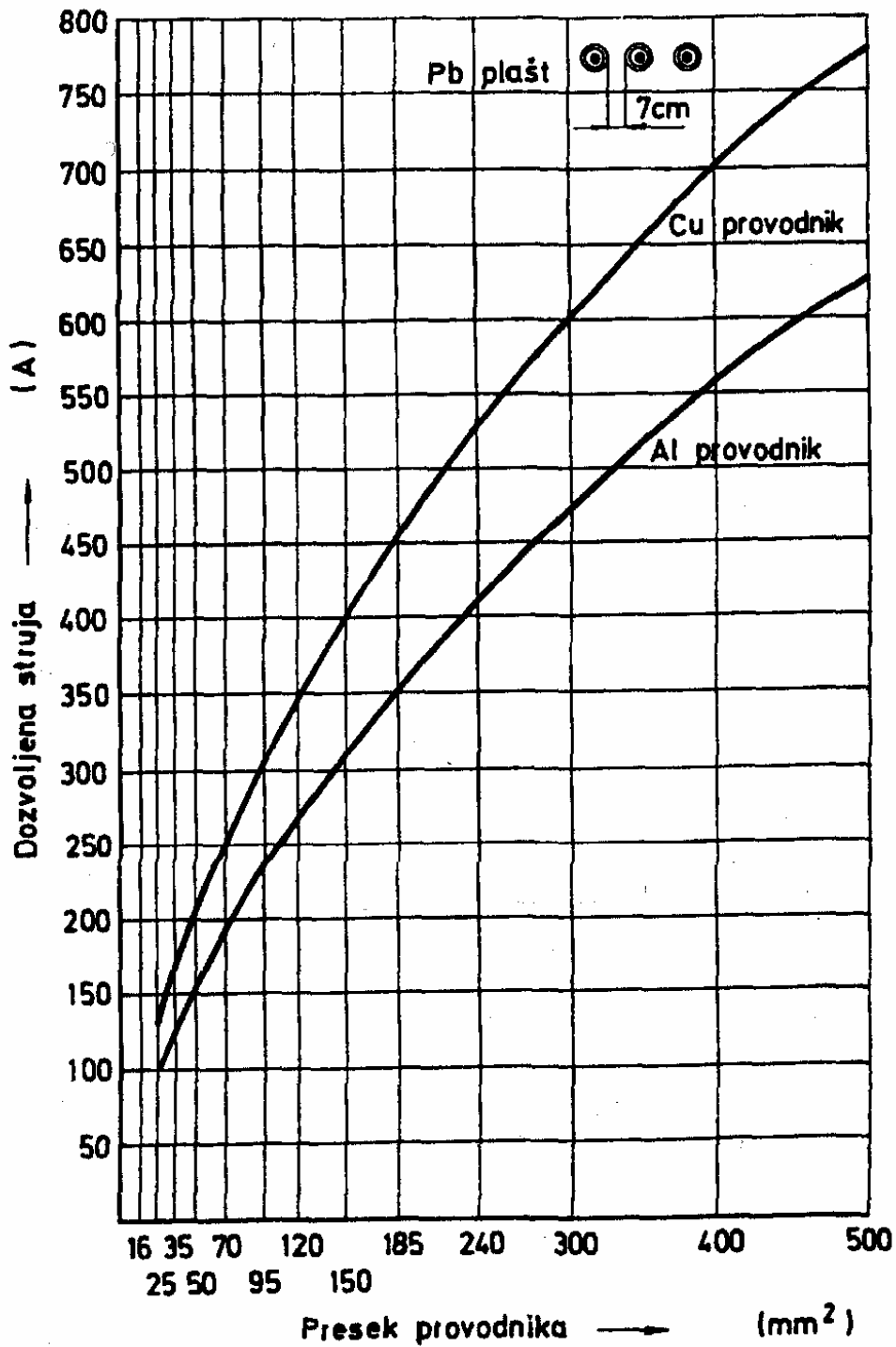
Sl. 17.57. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost)
 "pojasnog" kabla: I(N)PO 13-(A), 3×..., 6/10 kV
 temperatura vazduha: $\theta_v = 30^\circ \text{C}$
 (Odnosi se i na "pojasne" kablove sa Al-plaštom)



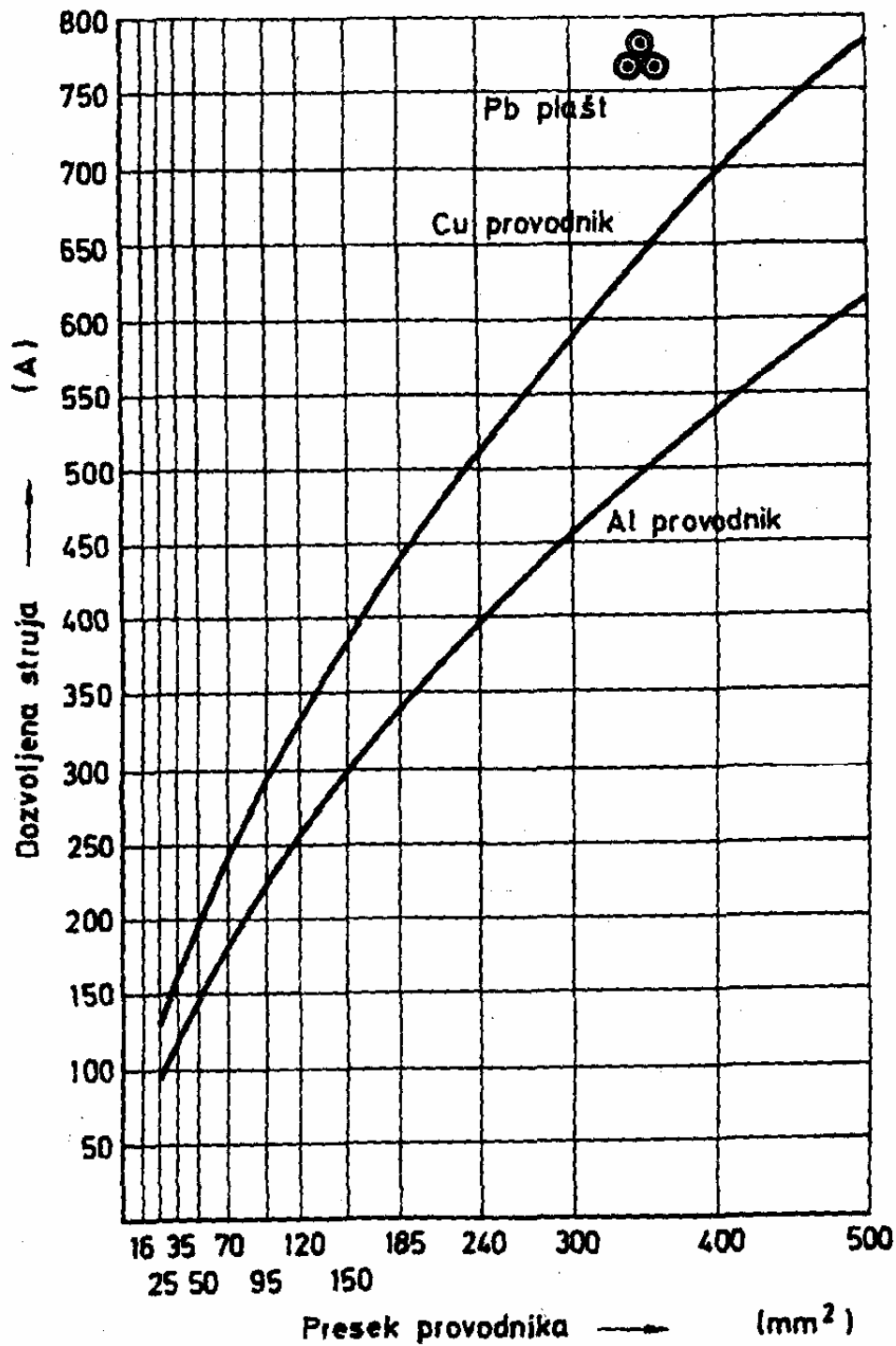
Sl. 17.58. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost) kabla:
 I(N)PZO 13-(A), 3x..., 12/20 kV
 temperatura vazduha: $\theta_v = 30^\circ \text{C}$
 (Korekcionni faktor strujnog opterećenja za kablove sa Al-plaštom prema tabeli 17.3.)



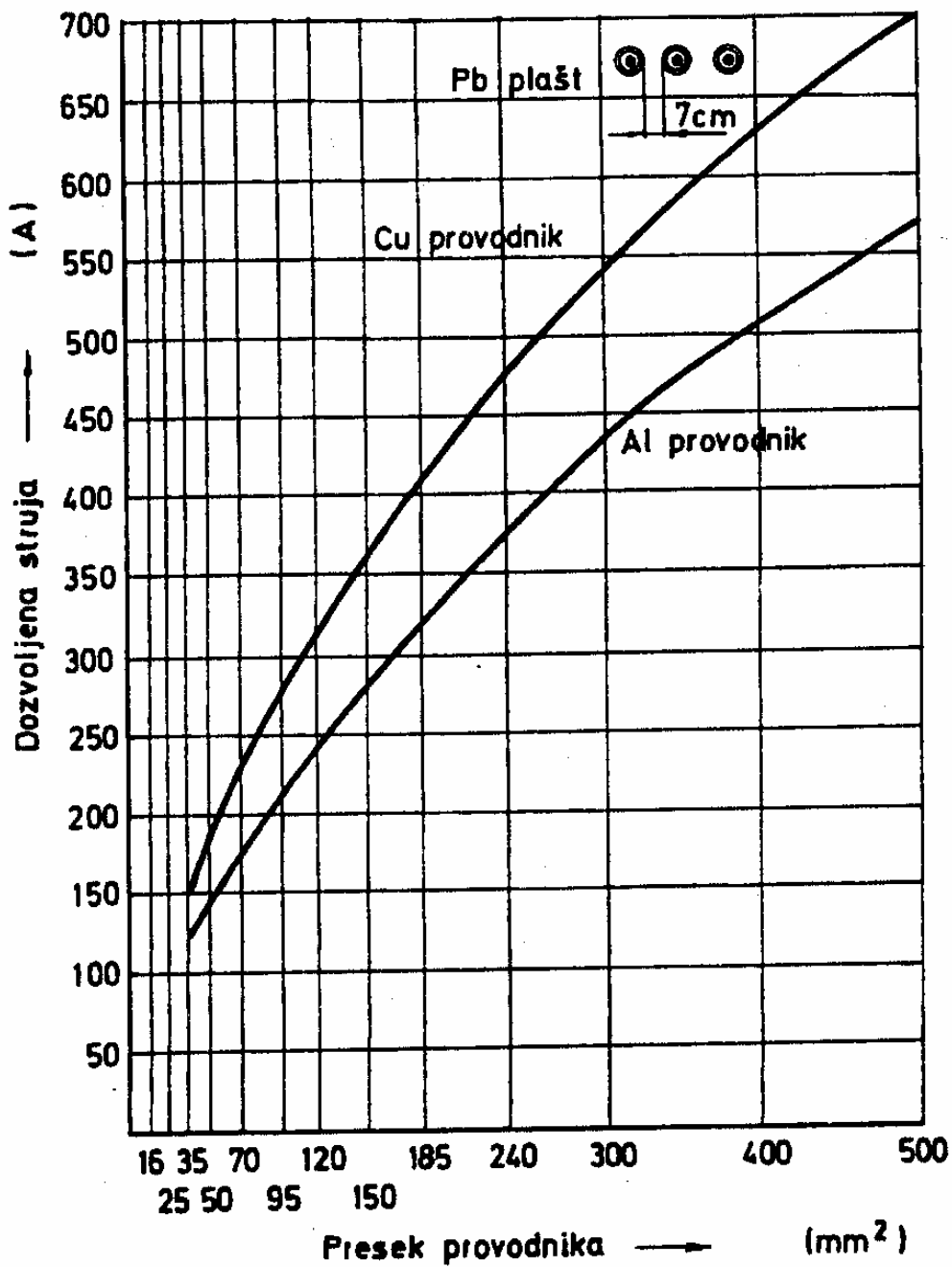
Sl. 17.59. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost) kabla:
 I(N)PZO 13-(A), 3x..., 20/35 kV
 temperatura vazduha: $\theta_v = 30^\circ \text{C}$
 (Korekcionni faktor strujnog opterećenja za kablove sa Al-plaštom prema tabeli 17.3.)



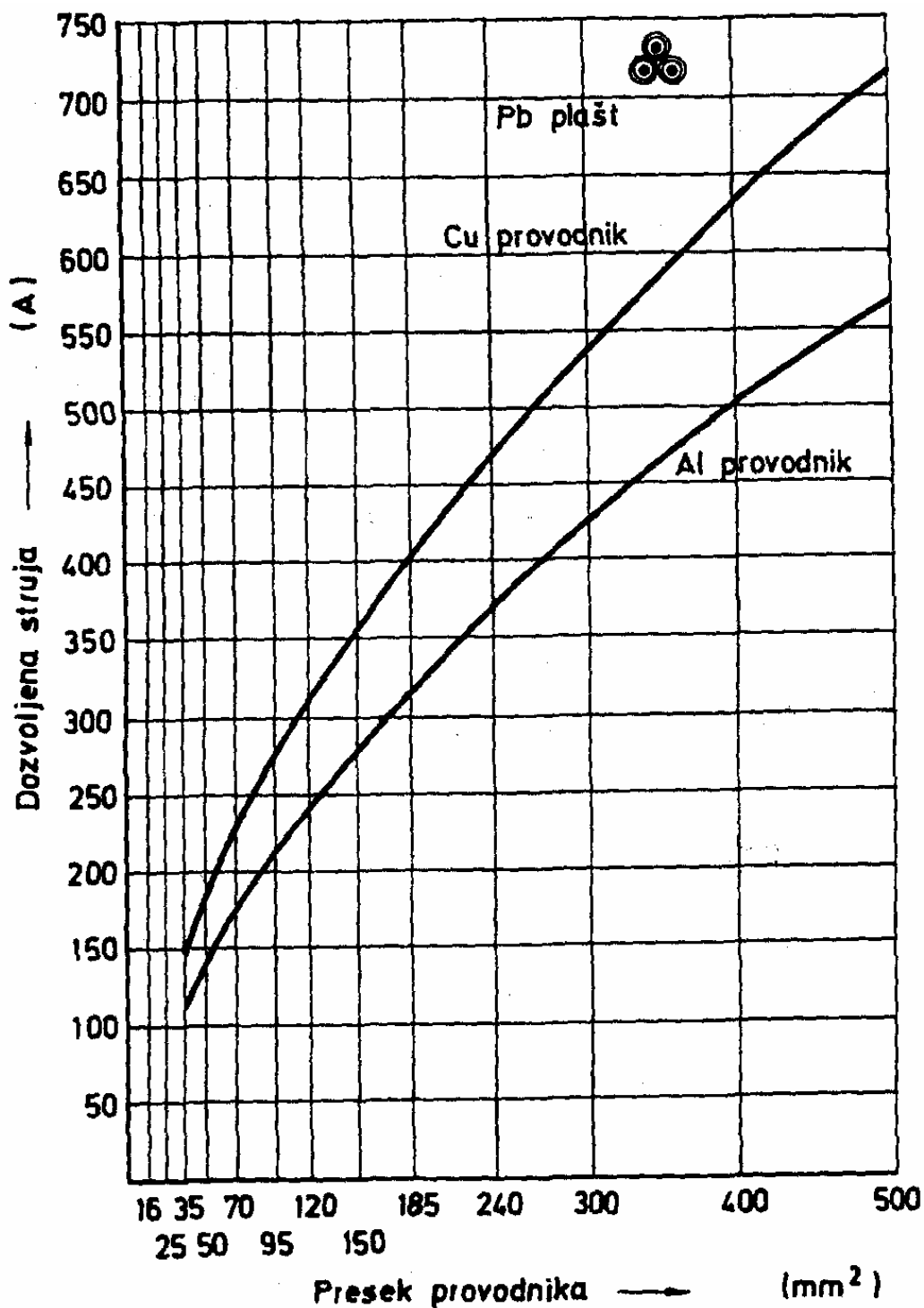
Sl. 17.60. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost) kabla:
 I(N)PHO 04-(A), 1x..., 12/20 kV
 temperatura vazduha: $\theta_v = 30^\circ \text{C}$



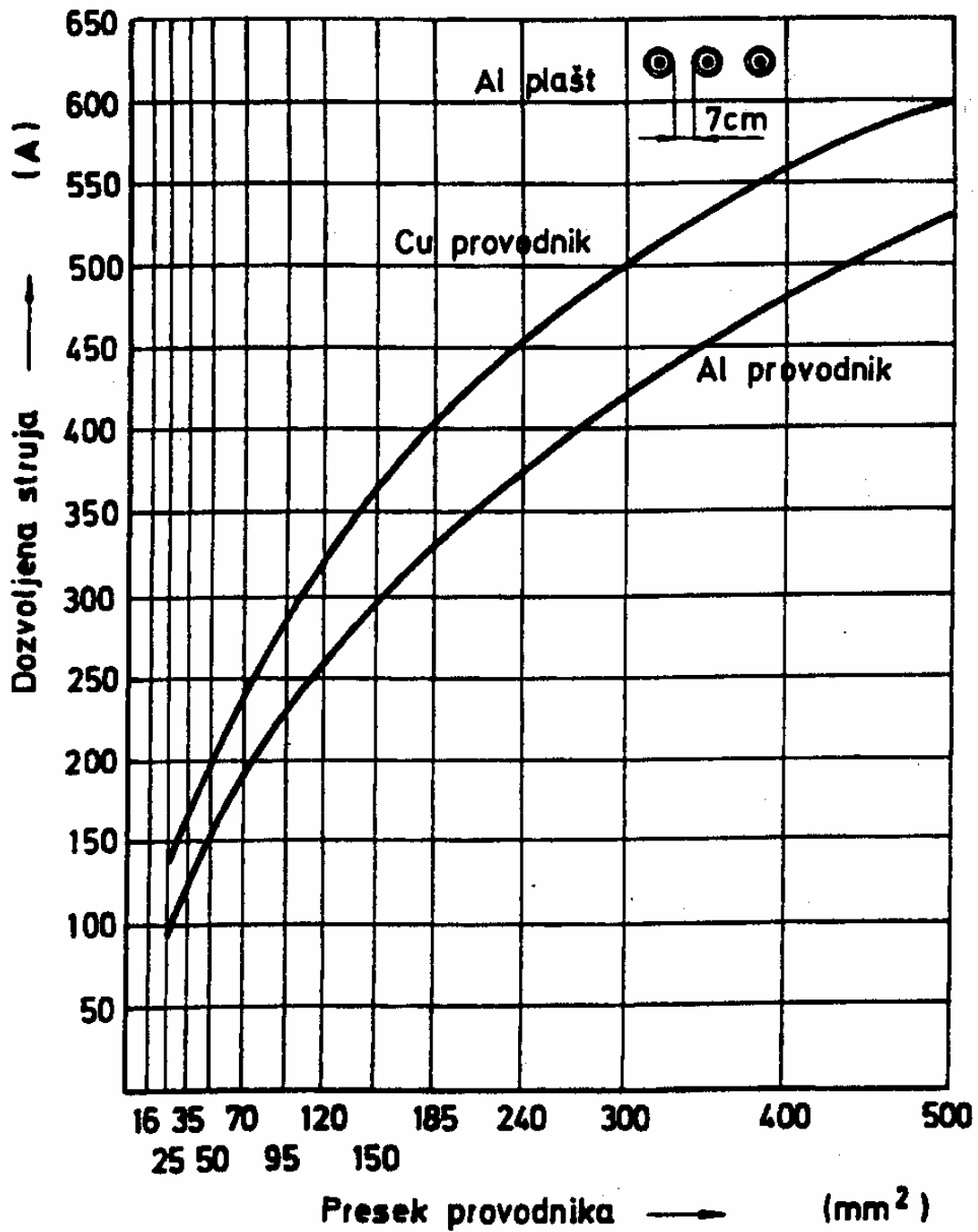
Sl. 17.61. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost) kablova:
 I(N)PHO 04-(A), 1x..., 12/20 kV
 temperatura vazduha: $\theta_v = 30^\circ \text{C}$



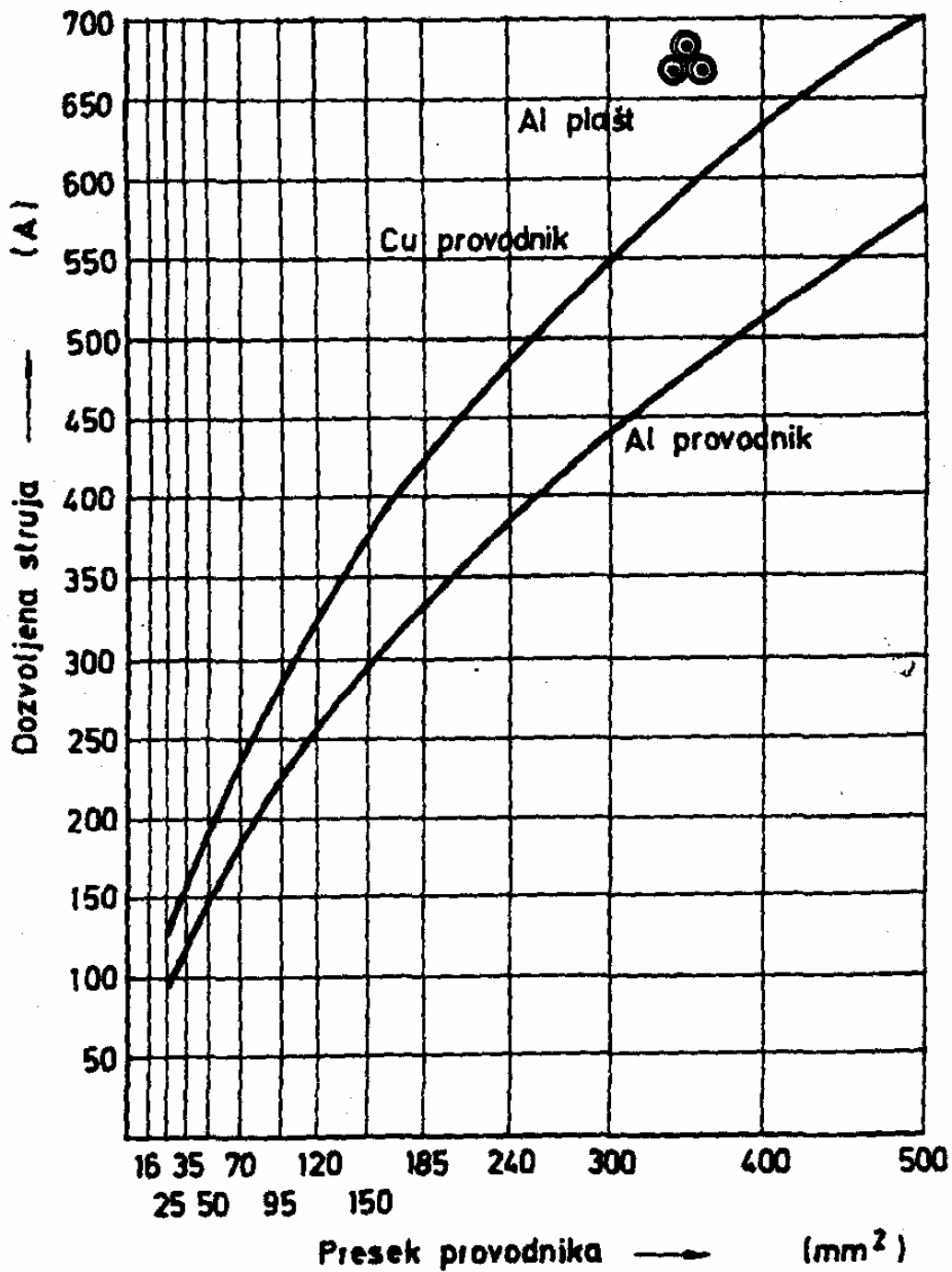
Sl. 17.62. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost) kabla:
 I(N)PHO 04-(A), 1x..., 20/35 kV
 temperatura vazduha: $\theta_v = 30^\circ \text{C}$



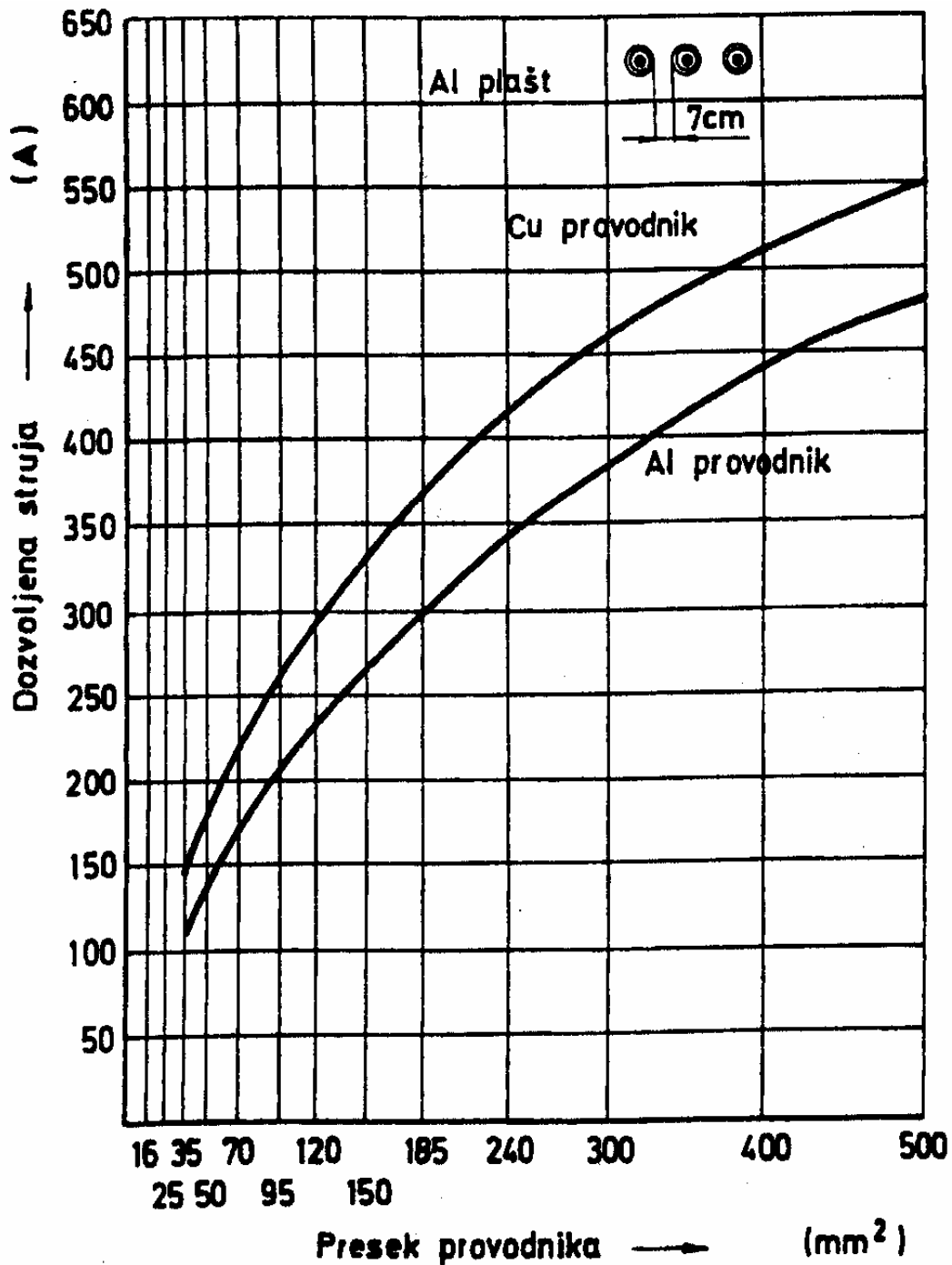
Sl. 17.63. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost) kabla:
 I(N)PHO 04-(A), 1x..., 20/35 kV
 temperatura vazduha: $\theta_v = 30^\circ \text{C}$



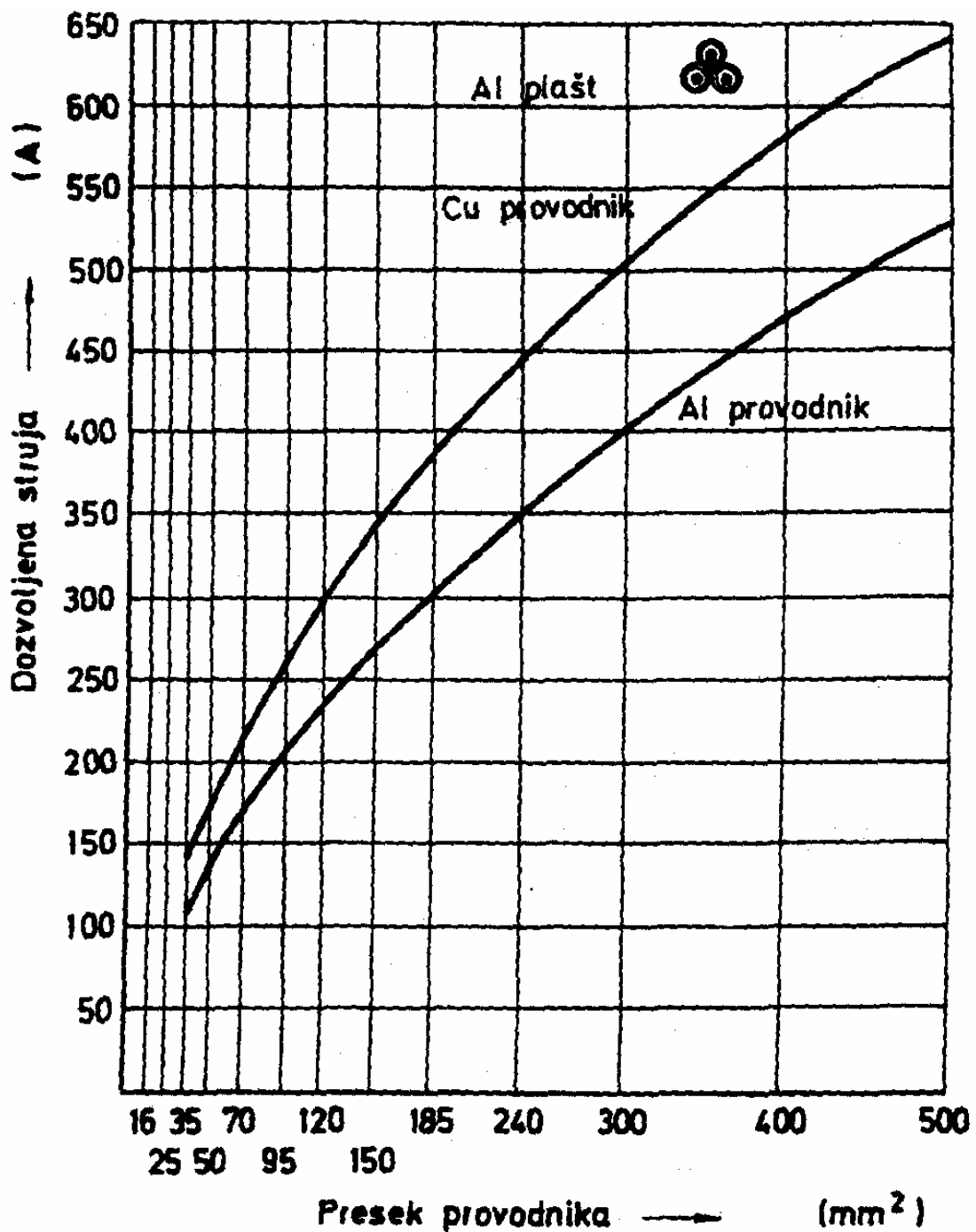
Sl. 17.64. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost) kabla:
 I(N)PHA 04-(A), 1x..., 12/20 kV
 temperatura vazduha: $\theta_v = 30^\circ \text{C}$



Sl. 17.65. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost) kabla:
 I(N)PHA 04-(A), 1x..., 12/20 kV
 temperatura vazduha: $\theta_v = 30^\circ \text{C}$



Sl. 17.66. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost) kabla:
 I(N)PHA 04-(A), 1x..., 20/35 kV
 temperatura vazduha: $\theta_v = 30^\circ \text{C}$

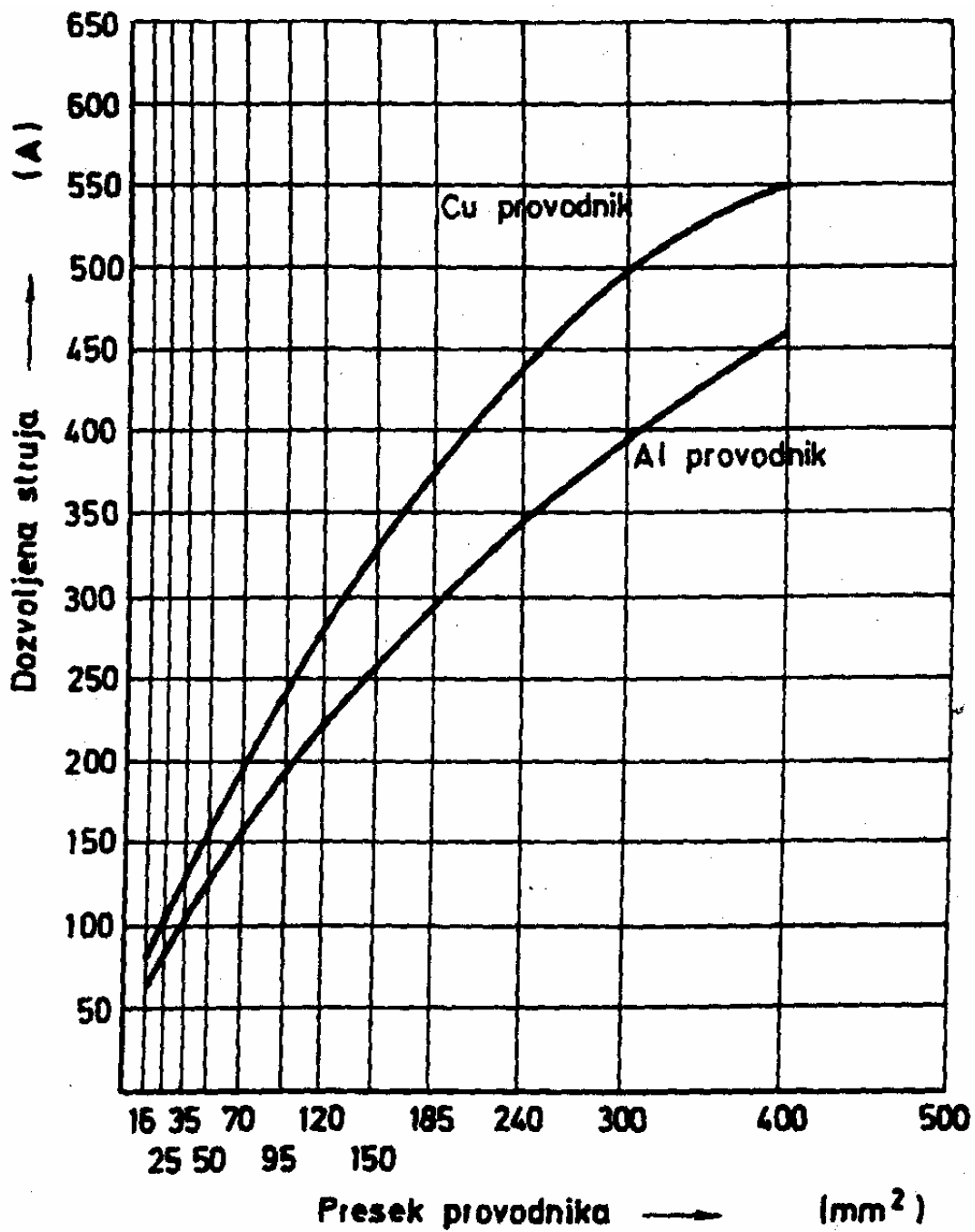


Sl. 17.67. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost) kabela:
 I(N)PHA 04-(A), 1x..., 20/35 kV
 temperatura vazduha: $\theta_v = 30^\circ \text{C}$

**B. NAZNAČENE STRUJE KABLOVA IZOLOVANIH
POLIVINILHLORIDOM (PVC)
POLOŽENIH U VAZDUHU
0,6/1 kV**

Napomene:

- *Strujno opterećenje se odnosi na stalno, tzv. 100% opterećenje i približno na promenljivo opterećenje.*
- *Kablovi su zaštićeni od direktnog sunčevog zračenja.*

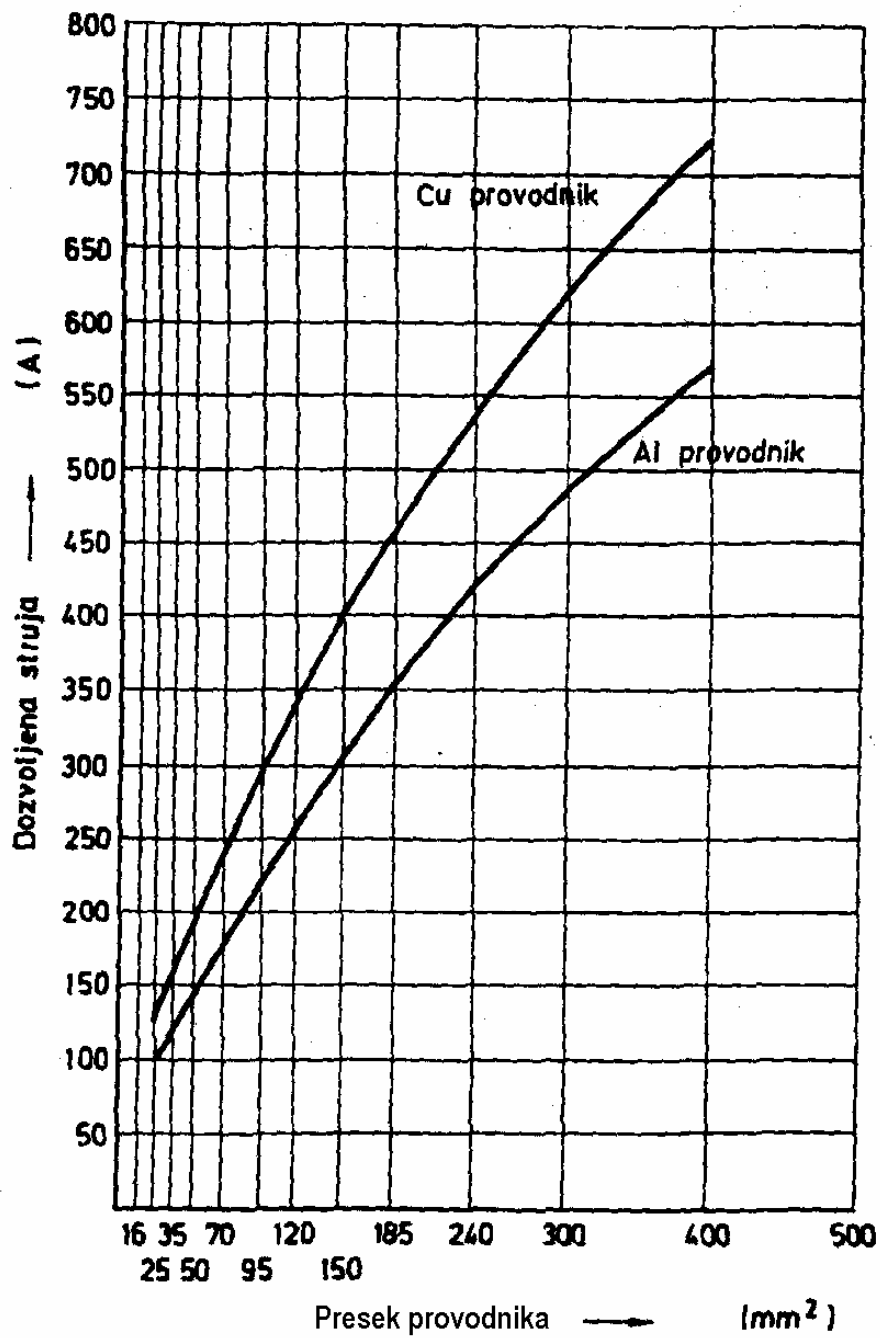


SI. 17.68. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost) kabla:
 PP 00 - (A), 3x... + ..., 0,6/1 kV
 temperatura vazduha $\theta_v = 30^\circ \text{C}$

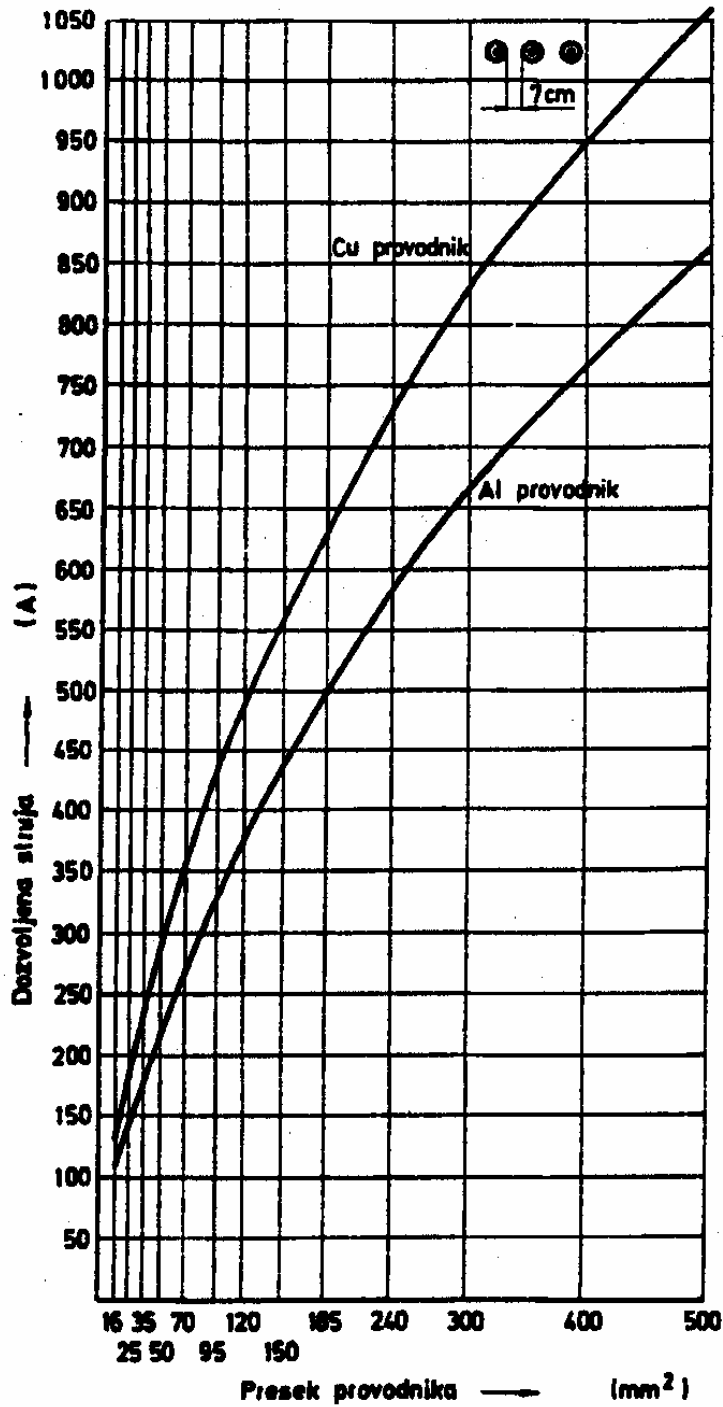
**C. NAZNAČENE STRUJE KABLOVA IZOLOVANIH
UMREŽENIM POLIETILENOM (XPE)
POLOŽENIH U VAZDUHU
0,6/1 kV; 3,6/10 kV; 6/10 kV; 12/20 kV i 20/35 kV**

Napomene:

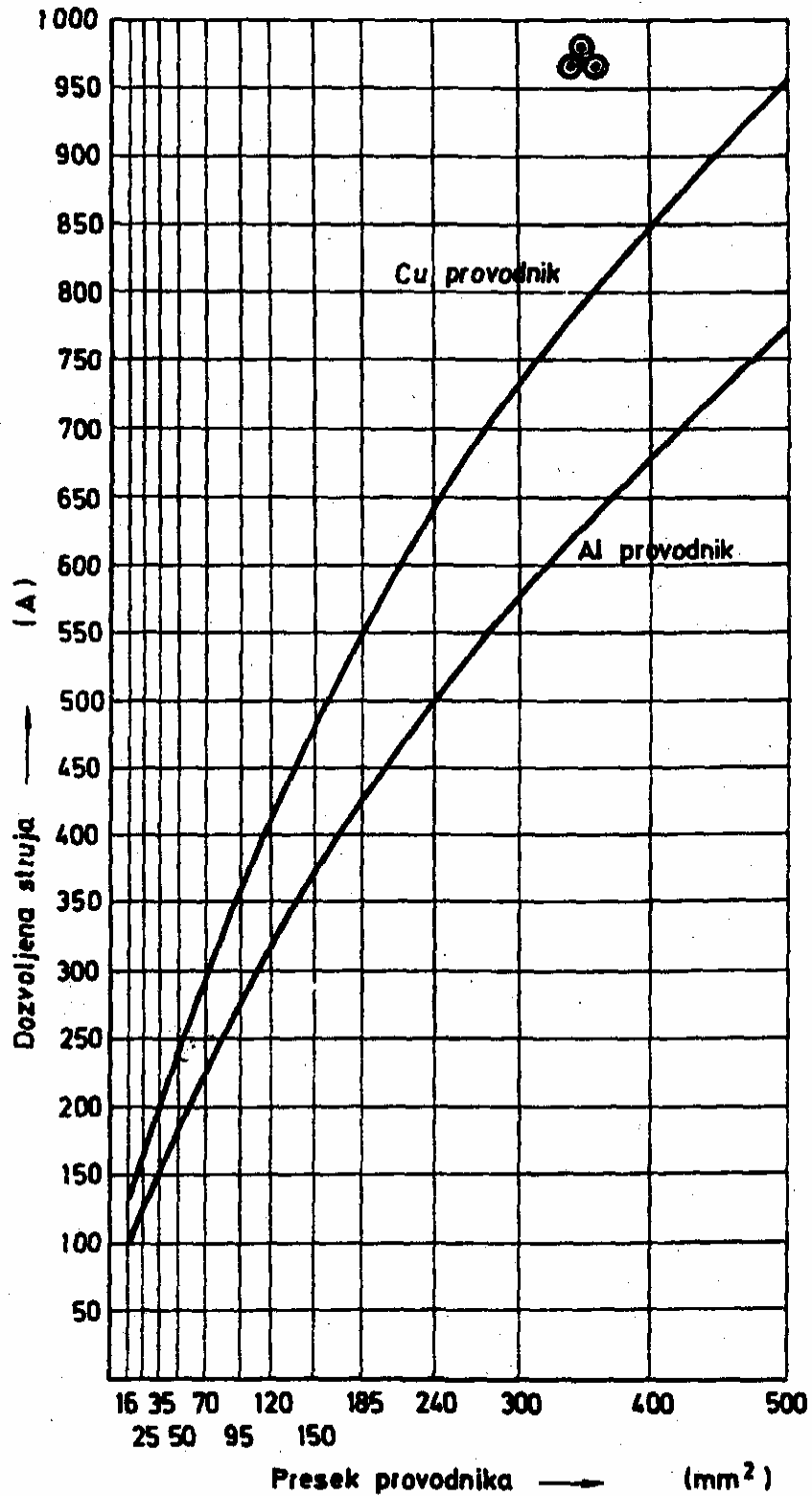
- *Strujno opterećenje se odnosi na stalno, tzv. 100% opterećenje i približno na promenljivo opterećenje.*
- *Električna zaštita kablova uzemljena je na oba kraja.*
- *Kablovi su zaštićeni od direktnog sunčevog zračenja.*
- *Korišćeni su podaci H.P. "Kablovi" - Jagodina.*



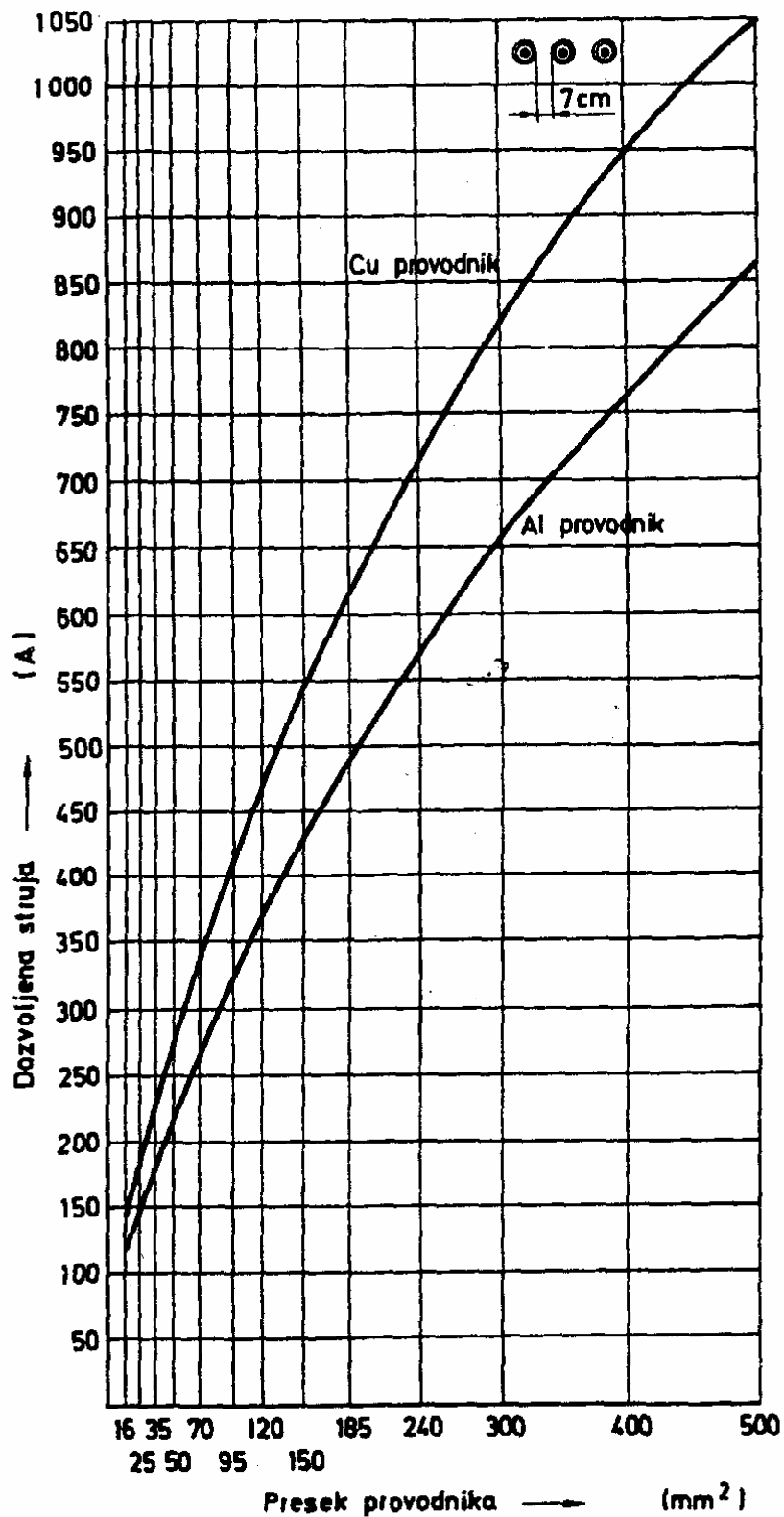
Sl. 17.69. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost) kabla:
XP 00 - (A) 3x...+..., 0,6/1 kV
temperatura vazduha $\theta_v = 30^\circ \text{C}$



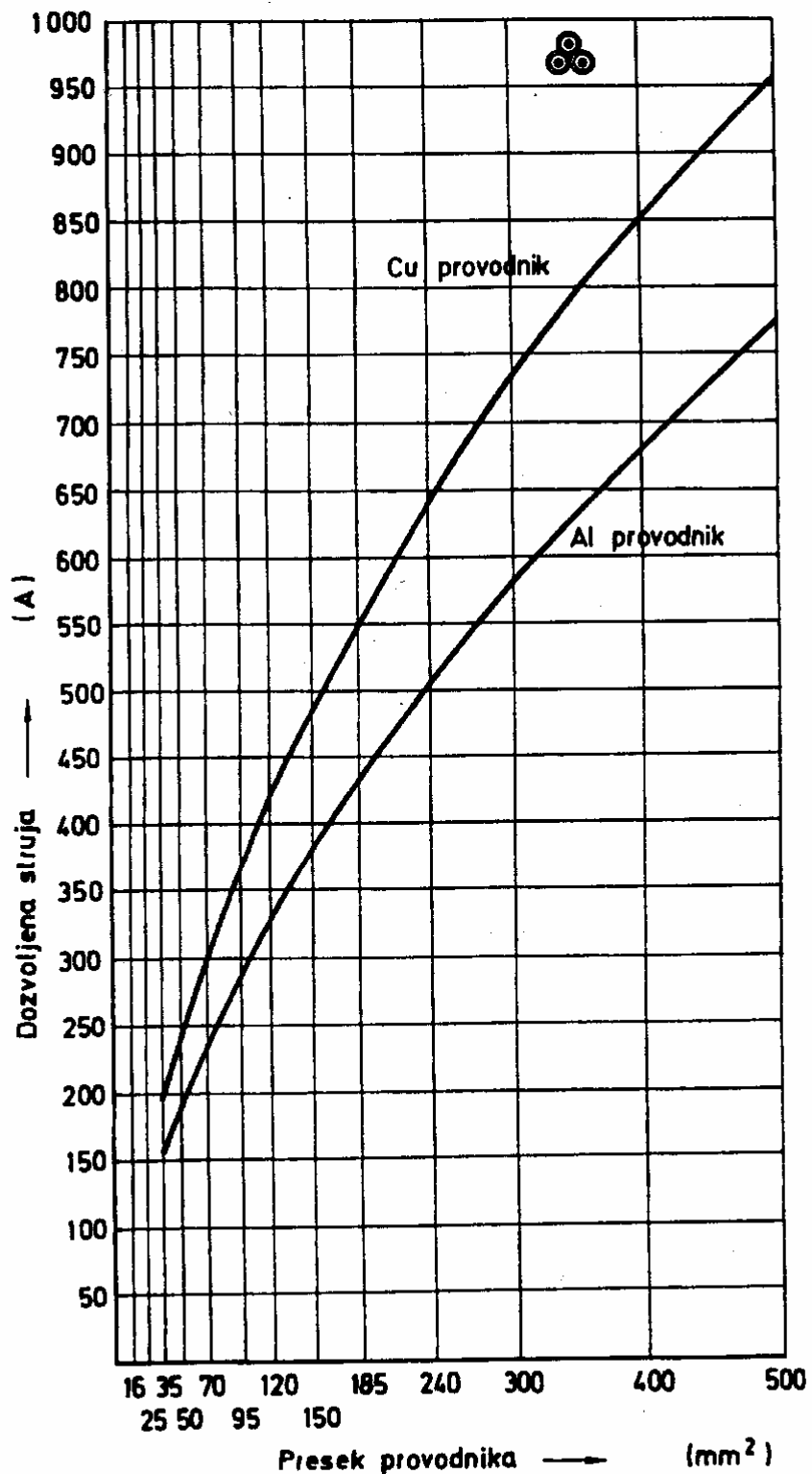
Sl. 17.70. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost) kabla:
 XHE 49 - (A) 1x.../... , 3,6/6 kV
 temperatura vazduha $\theta_v = 30^\circ \text{C}$
 - presek električne zaštite



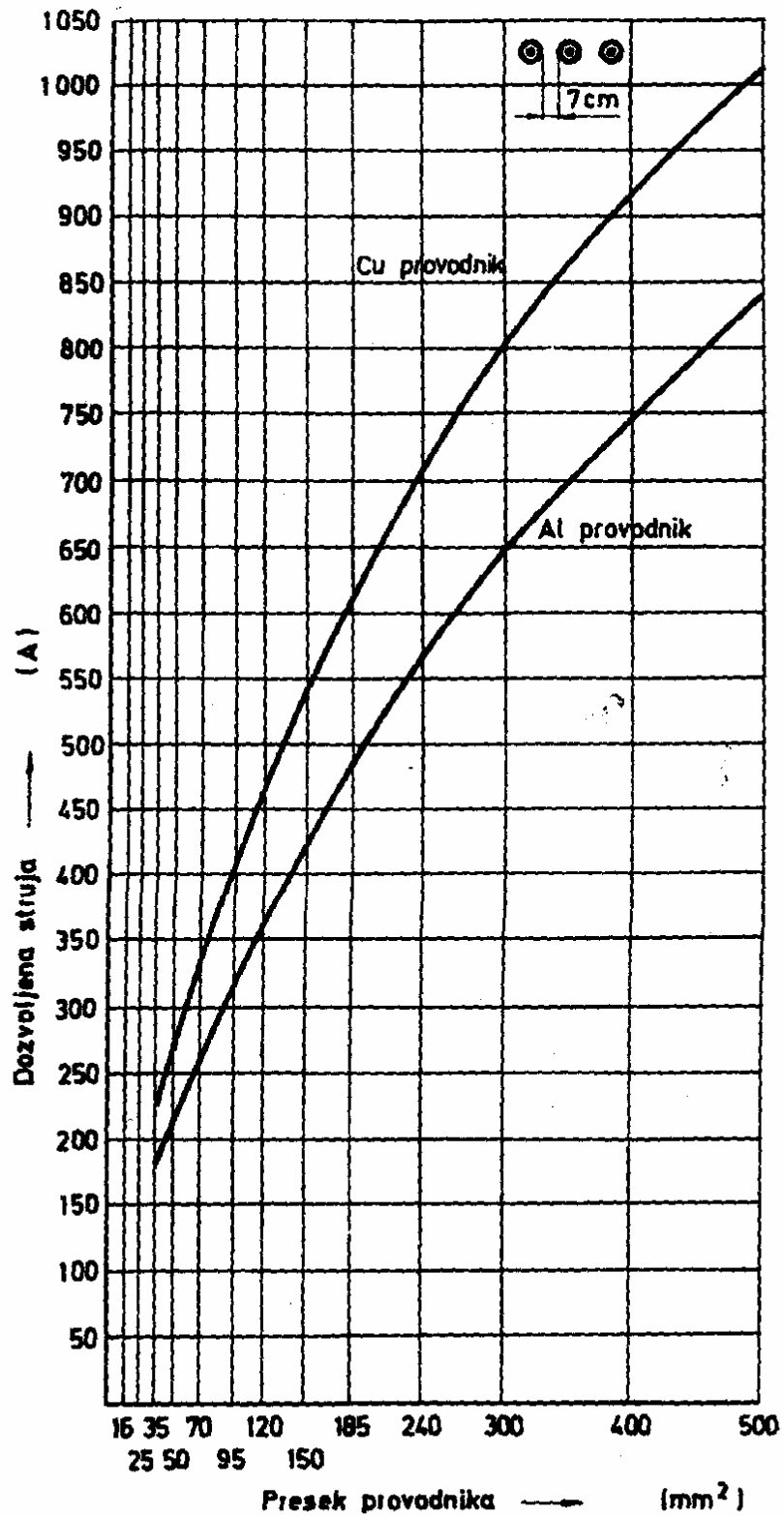
Sl. 17.71. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost) kabla:
 XHE 49 - (A) 1x.../... , 6/10 kV
 temperatura vazduha $\theta_v = 30^\circ \text{C}$
 * - presek električne zaštite



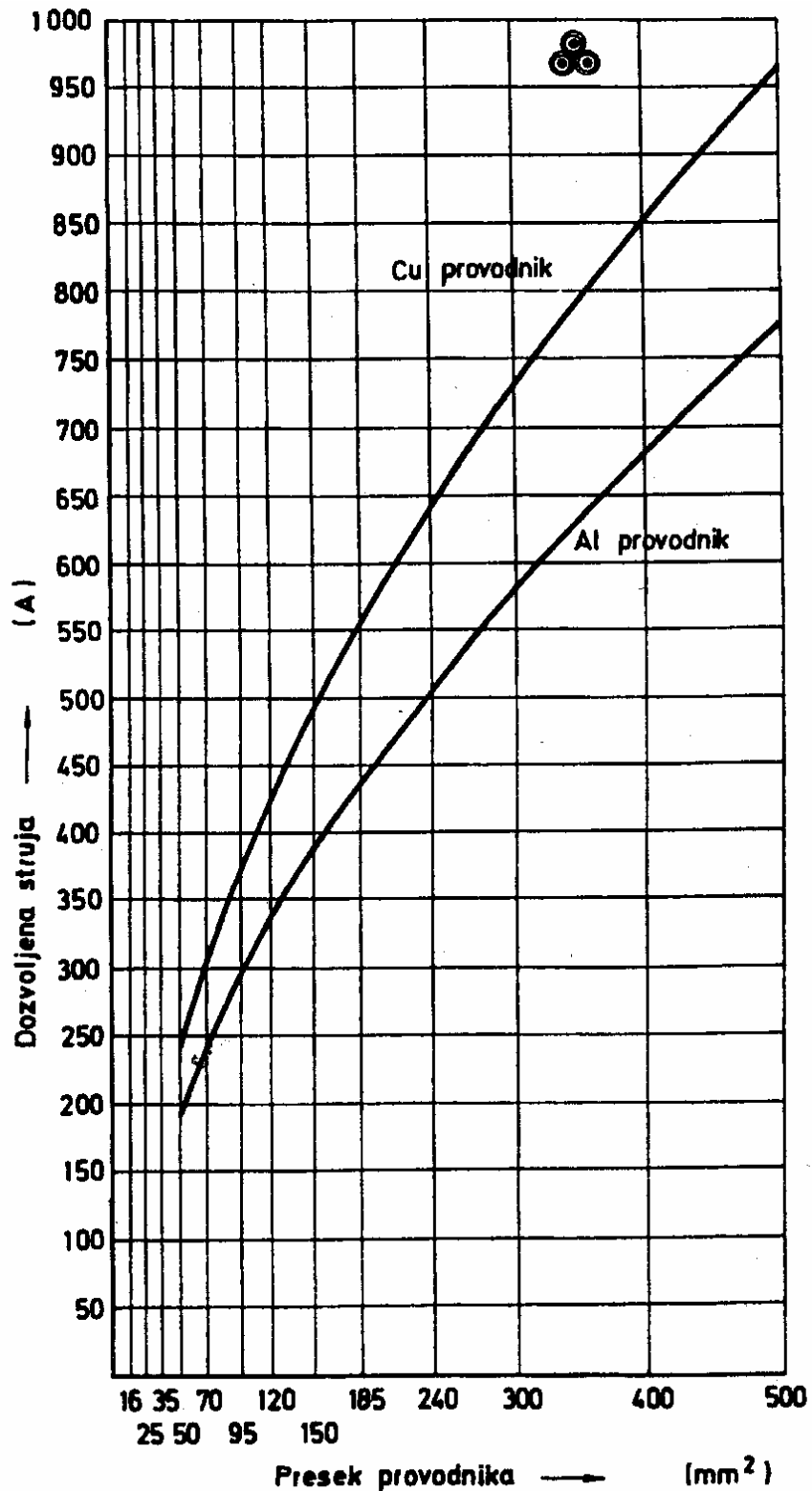
17.72. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost) kabla:
 - XHE 49 - (A) 1x.../..., 6/10 kV
 temperatura vazduha $\theta_v = 30^\circ \text{C}$
 - presek električne zaštite



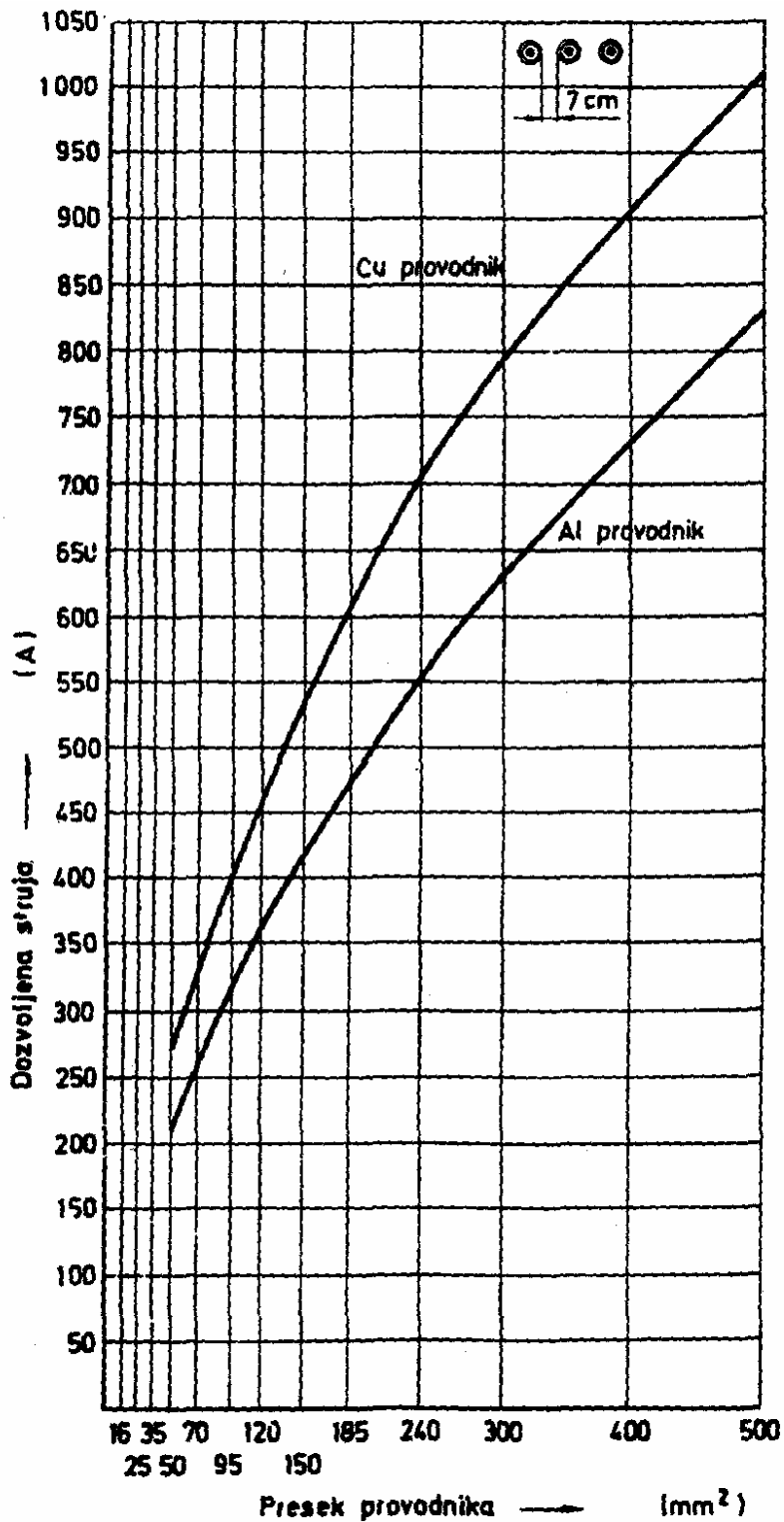
Sl. 17.73. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost) kabla:
 XHE 49 - (A) 1x.../..., 12/20 kV
 temperatura vazduha $\theta_v = 30^\circ \text{C}$
 - presek električne zaštite



SI.17.74. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost) kabla:
 XHE 49 - (A) 1x.../..., 12/20 kV
 temperatura vazduha $\theta_v = 30^\circ \text{C}$
 - presek električne zaštite



Sl. 17.75. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost) kabla:
 XHE 49 - (A) 1x.../..., 20/35 kV
 temperatura vazduha $\theta_v = 30^\circ \text{C}$
 - presek električne zaštite



Slika 17.76. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost) kabla:
 XHE 49 - (A) 1x.../..., 20/35 kV
 temperatura vazduha $\theta_v = 30^\circ \text{C}$
 - presek električne zaštite

Tab. 17.21. Faktor korekcije dozvoljenog strujnog opterećenja kablova za razne temperature vazduha

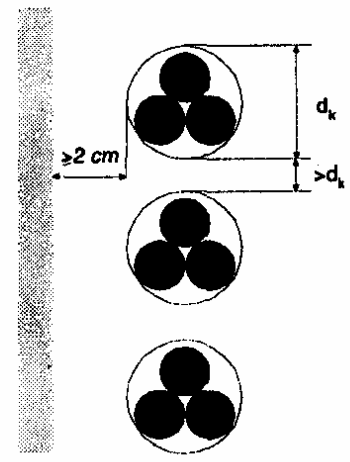
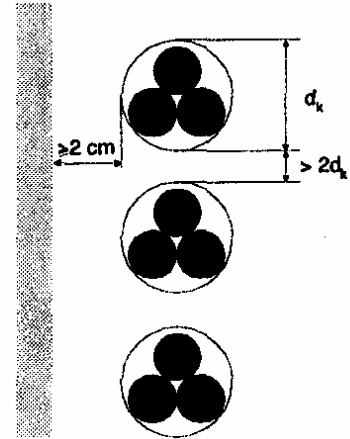
Vrsta kabla	Napon kabla kV	Temperatura vazduha (°C)								
		10	15	20	25	30	35	40	45	50
"Pojasni" kablovi (papirni)	3,6/6	1,04	1,05	1,05	1,05	1,00	0,95	0,89	0,84	0,77
	6/10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,93	0,85	0,76	0,66
Kablovi sa zasebnim metalnim plaštom (jednožilni i trožilni, papirni)	12/20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,93	0,85	0,76	0,66
	20/35	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,91	0,82	0,71	0,57
PVC kablovi	0,6/1	1,22	1,17	1,12	1,06	1,00	0,94	0,87	0,79	0,71
XPE kablovi	do 20/35	1,15	1,12	1,08	1,04	1,00	0,95	0,91	0,86	0,82

Tab. 17.22. Faktor korekcije dozvoljenog strujnog opterećenja višezilnih kablova položenih jedan pored drugog na tlo, police i zidove¹⁾

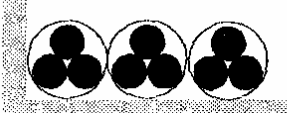
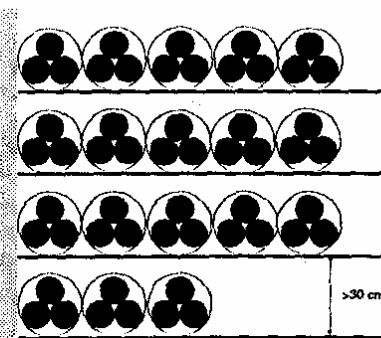
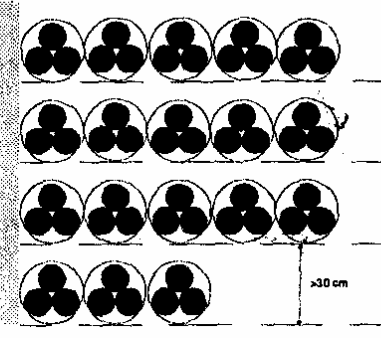
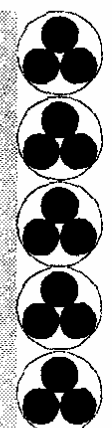
Način polaganja kablova	Međusobni razmak kablova d_k i odstojanje od zida 2 cm					Raspored kablova	
	1	2	3	6	9		
Broj kablova jedan pored drugog	1	2	3	6	9		
Kablovi na tlu	0,95	0,90	0,88	0,85	0,84		
Broj polica							
Kablovi na policama (bez cirkulacije vazduha)	1	0,95	0,90	0,88	0,85	0,84	
	2	0,90	0,85	0,83	0,81	0,80	
	3	0,88	0,83	0,81	0,79	0,78	
	6	0,86	0,81	0,79	0,77	0,76	
Broj polica							
	Kablovi na policama (sa cirkulacijom vazduha)	1	1,00	0,98	0,86	0,93	0,92
		2	1,00	0,95	0,93	0,90	0,89
		3	1,00	0,94	0,92	0,89	0,88
6		1,00	0,93	0,90	0,87	0,86	

¹⁾ Važi i za jednožilne kablove jednosmerne struje.

Tab. 17.21. Nastavak

<p>Broj kablova jedan iznad drugog</p> <p>Kablovi na nosačima ili pričvršćeni za zid</p>	1	2	3	6	9	
<p>Način polaganja za koje nije potrebna korekcija strujnog opterećenja</p>	<p>Broj kablova jedan iznad drugog je proizvoljan</p>					

Tab. 17.22. Faktor korekcije dozvoljenog strujnog opterećenja višezilnih kablova položenih jedan uz drugi na tlo, police i zidove¹⁾

Način polaganja kablova		Kablovi se međusobno dodiruju					Raspored kablova
Broj kablova jedan uz drugi		1	2	3	6	9	
Kablovi na zemlji		0,90	0,84	0,80	0,75	0,73	
Broj policama							
Kablovi na policama (bez cirkulacije vazduha)	1	0,95	0,84	0,80	0,75	0,73	
	2	0,95	0,80	0,76	0,71	0,69	
	3	0,95	0,78	0,74	0,70	0,68	
	6	0,95	0,76	0,72	0,68	0,66	
Broj policama							
Kablovi na policama (sa cirkulacijom vazduha)	1	0,95	0,84	0,80	0,76	0,73	
	2	0,95	0,80	0,76	0,71	0,69	
	3	0,95	0,78	0,74	0,70	0,68	
	6	0,95	0,76	0,72	0,68	0,66	
Broj kablova jedan iznad drugog		1	2	3	6	9	
Kablovi na nosačima ili pričvršćeni za zid		0,95	0,78	0,73	0,68	0,66	

¹⁾ Važi i za jednožilne kablove jednosmerne struje.

Tab. 17.22. Nastavak

<p>Način polaganja za koje nije potrebna korekcija strujnog opterećenja</p>	<p>Broj kablova jedan pored drugog je proizvoljan</p>	
---	---	--

Tab. 17.23. Faktor korekcije dozvoljenog strujnog opterećenja jednožilnih kablova položenih u snopu na tlo, police i zidove

Način polaganja kablova	Međusobni razmak snopova d_k i rastojanje od zida 2 cm			
Broj sistema jedan pored drugog	1	2	3	Raspored kablova
Sistem na tlu	0,95	0,90	0,88	
<p>Broj policama</p> <p>Kablovi na policama (bez cirkulacije vazduha)</p>	<p>1 0,95</p> <p>2 0,90</p> <p>3 0,88</p> <p>6 0,86</p>	<p>0,90</p> <p>0,85</p> <p>0,83</p> <p>0,81</p>	<p>0,88</p> <p>0,83</p> <p>0,81</p> <p>0,79</p>	
<p>Broj policama</p> <p>Kablovi na policama (sa cirkulacijom vazduha)</p>	<p>1 1,00</p> <p>2 1,00</p> <p>3 1,00</p> <p>6 1,00</p>	<p>0,98</p> <p>0,95</p> <p>0,94</p> <p>0,93</p>	<p>0,96</p> <p>0,93</p> <p>0,92</p> <p>0,90</p>	

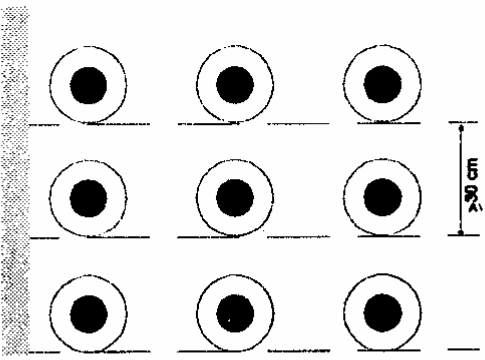
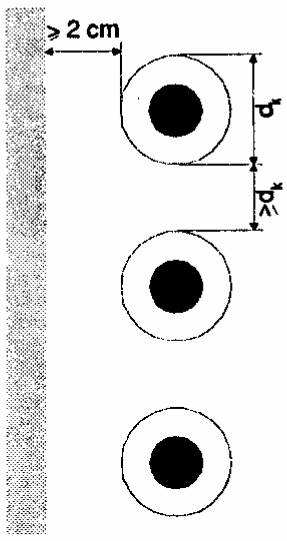
Tab.17.23. Nastavak

Broj sistema jedan iznad drugog	1	2	3	
Sistemi na nosačima ili pričvršćeni za zid	0,89	0,86	0,84	
Način polaganja za koje nije potrebna korekcija strujnog opterećenja				

Tab. 17.24. Faktor korekcije dozvoljenog strujnog opterećenja jednožilnih kablova položenih jedan pored drugog na tlo, police i zidove

Način polaganja kablova	Međusobni razmak kablova d_k i rastojanje od zida 2 cm			Raspored kablova
Broj sistema jedan pored drugog	1	2	3	
Na tlu	0,92	0,89	0,88	
Broj policica				
Kablovi na policama (bez cirkulacije vazduha)	1	0,92	0,89	
	2	0,87	0,84	
	3	0,84	0,82	
	6	0,82	0,80	

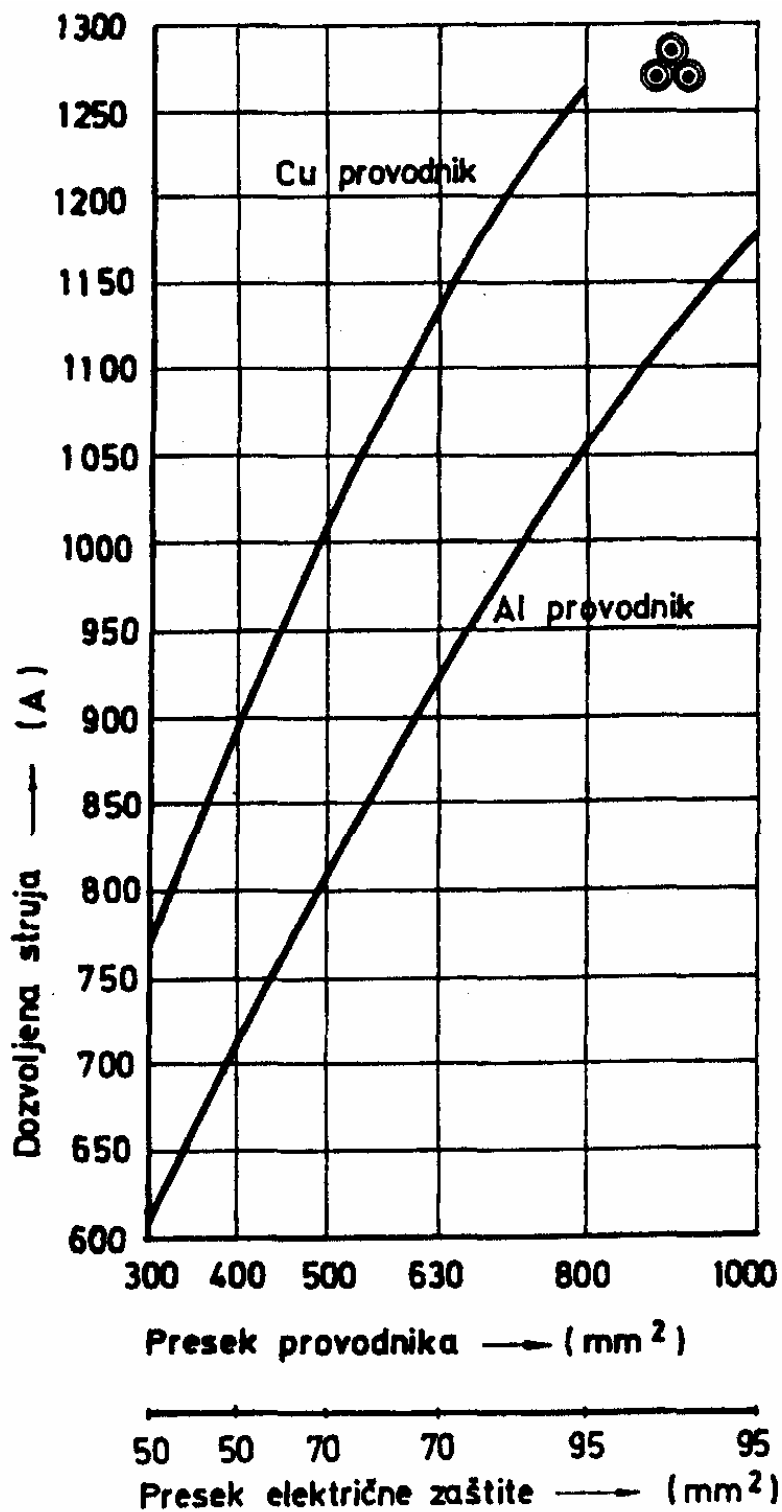
Tab. 17.24. Naslavak

<p>Broj polica</p> <p>Kablovi na policama (sa cirkulacijom vazduha)</p>	<p>1</p> <p>2</p> <p>3</p> <p>6</p>	<p>1,00</p> <p>0,97</p> <p>0,96</p> <p>0,94</p>	<p>0,97</p> <p>0,94</p> <p>0,93</p> <p>0,91</p>	
<p>Jedan iznad drugog</p> <p>Na nosačima</p>	<p>1</p> <p>0,94</p>	<p>2</p> <p>0,91</p>	<p>3</p> <p>0,89</p>	
<p>Način polaganja za koje nije potrebna korekcija strujnog opterećenja</p>				<p>Polaganje u istoj ravni sa odstojanjem većim od $2d_k$</p>

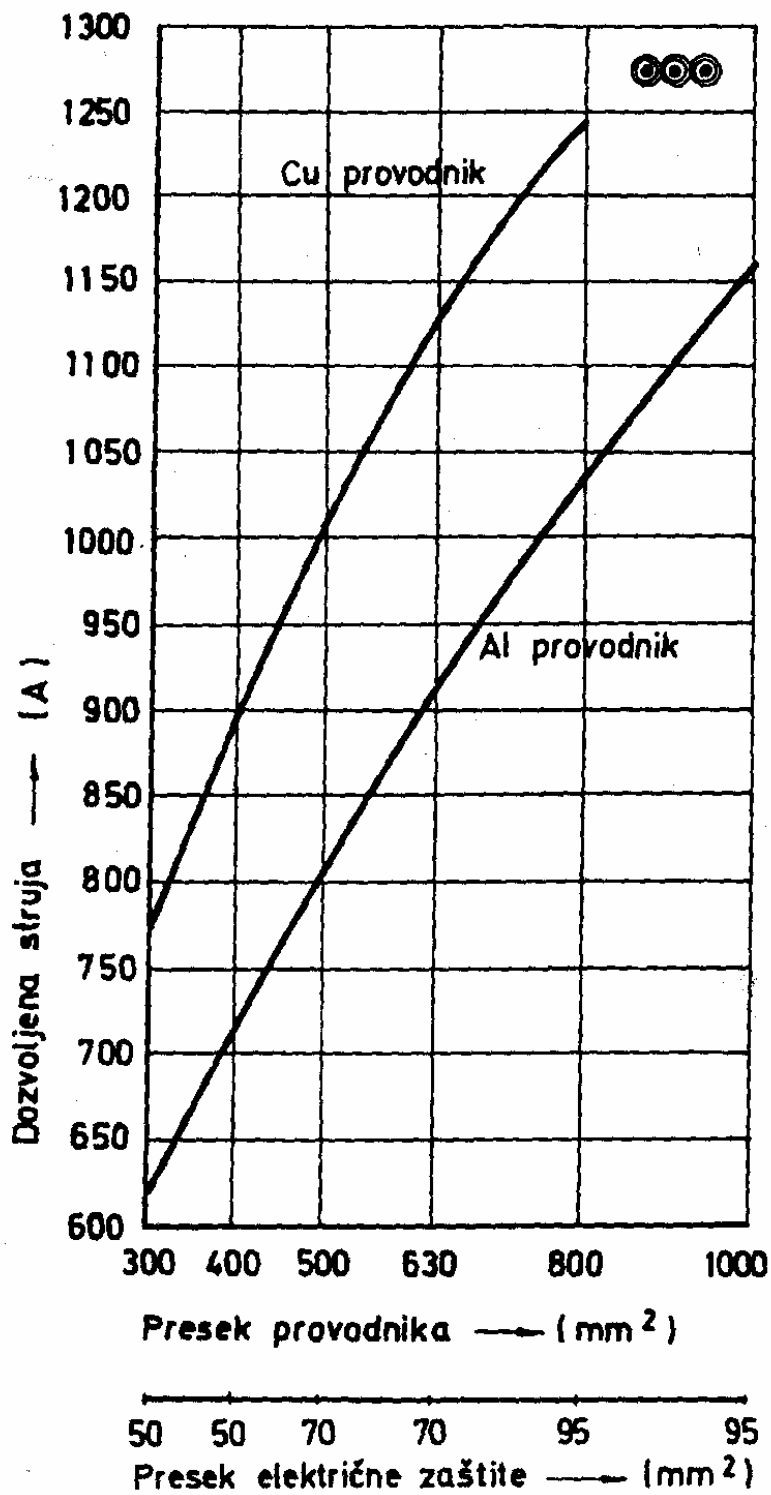
**D. NAZNAČENE STRUJE VISOKONAPONSKIH
KABLOVA IZOLOVANIH UMREŽENIM
POLOETILENOM (XPE) POLOŽENIH U VAZDUHU
64/110 kV**

Napomene:

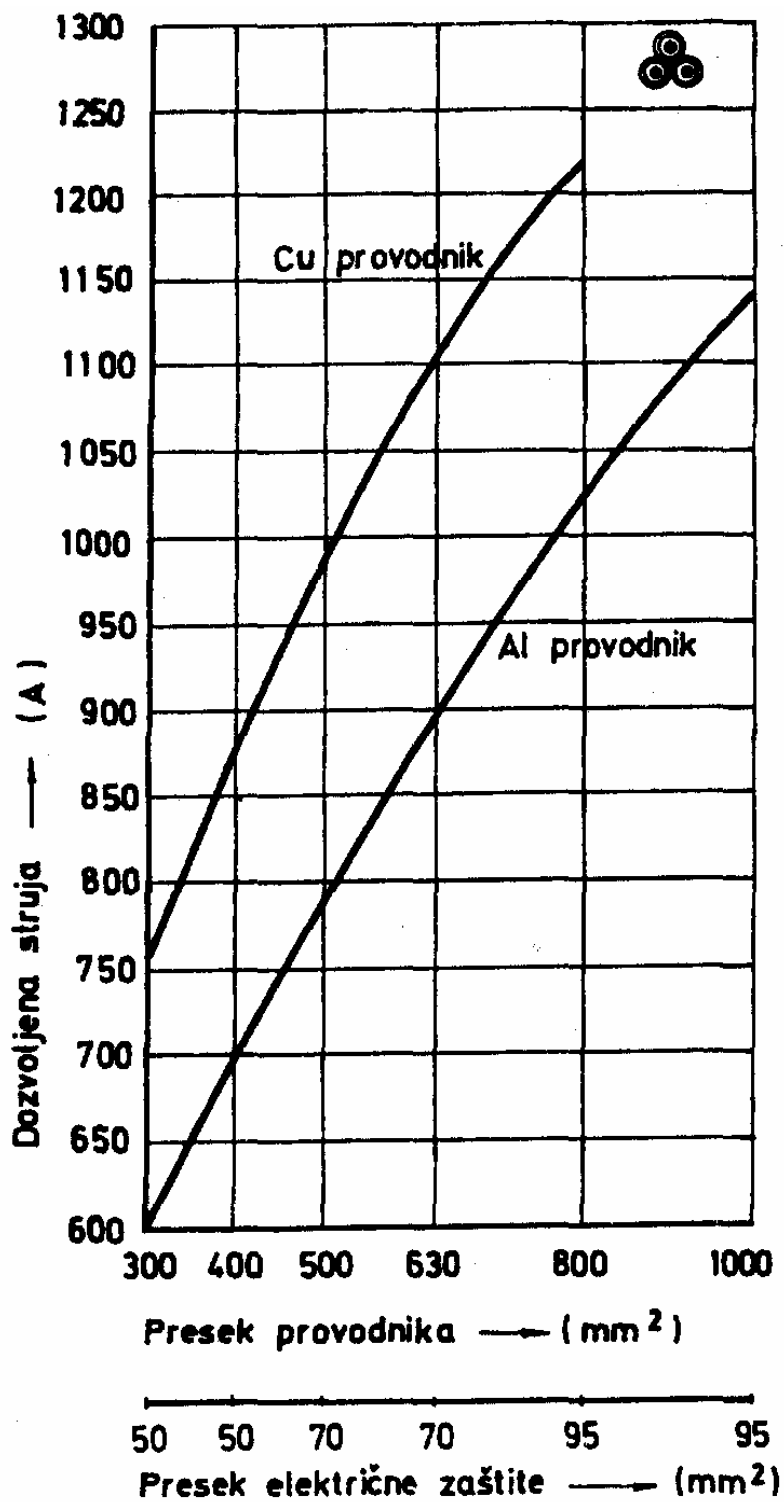
- *Strujno opterećenje se odnosi na stalno tzv. 100% opterećenje i približno na promenljivo opterećenje.*
- *Metalni plaštev i električna zaštita kablova je uzemljena na oba kraja.*
- *Kablovi su zaštićeni od direktnog sunčanog zračenja.*
- *Korišćeni podaci H.P. "Kablovi" - Jagodina.*



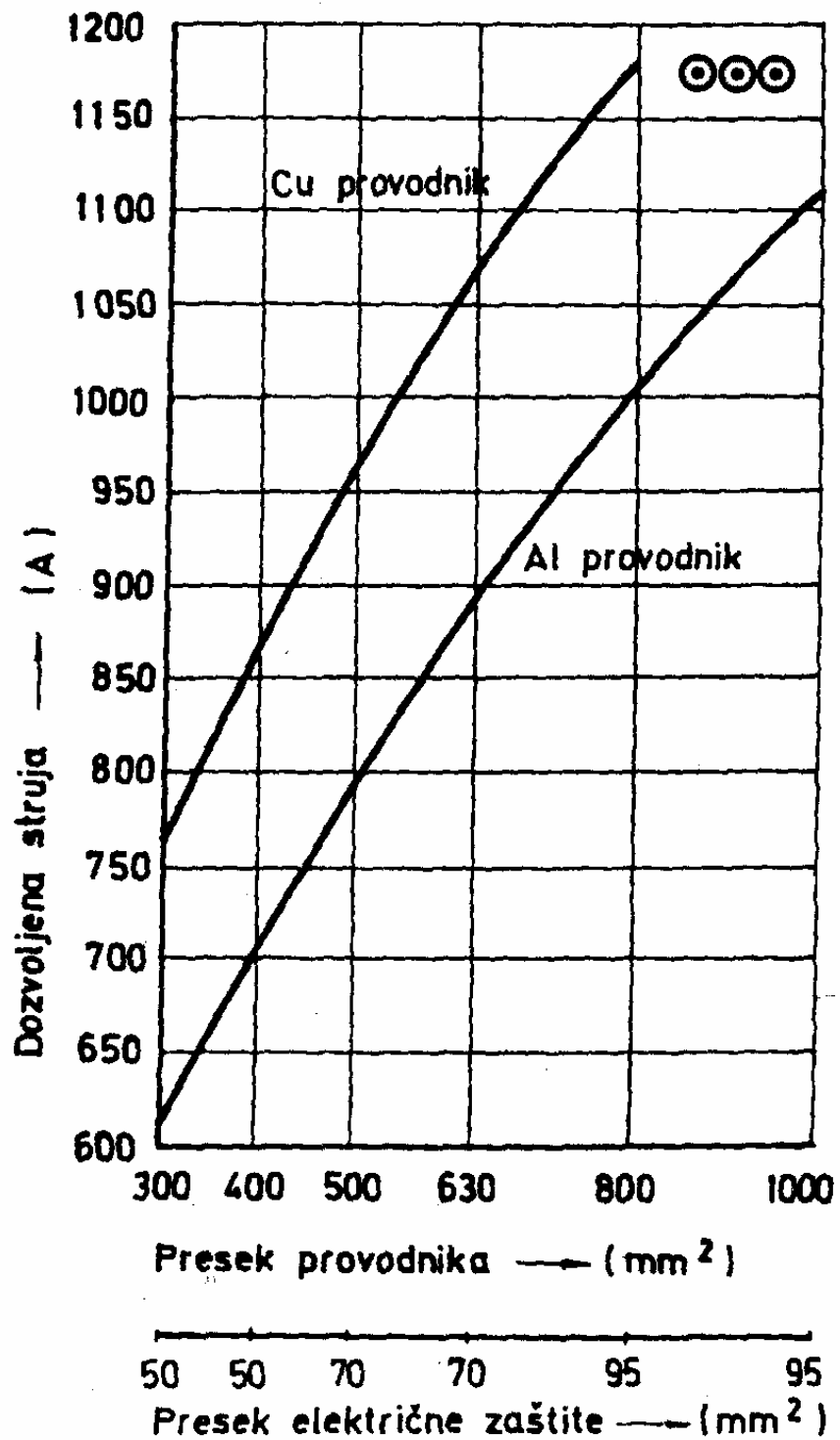
Sl. 17.77. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost) kabela:
 XHE 48-(A) 1x.../..., 64/110 kV
 temperatura vazduha $\theta_v = 25^\circ \text{C}$
 - presek električne zaštite



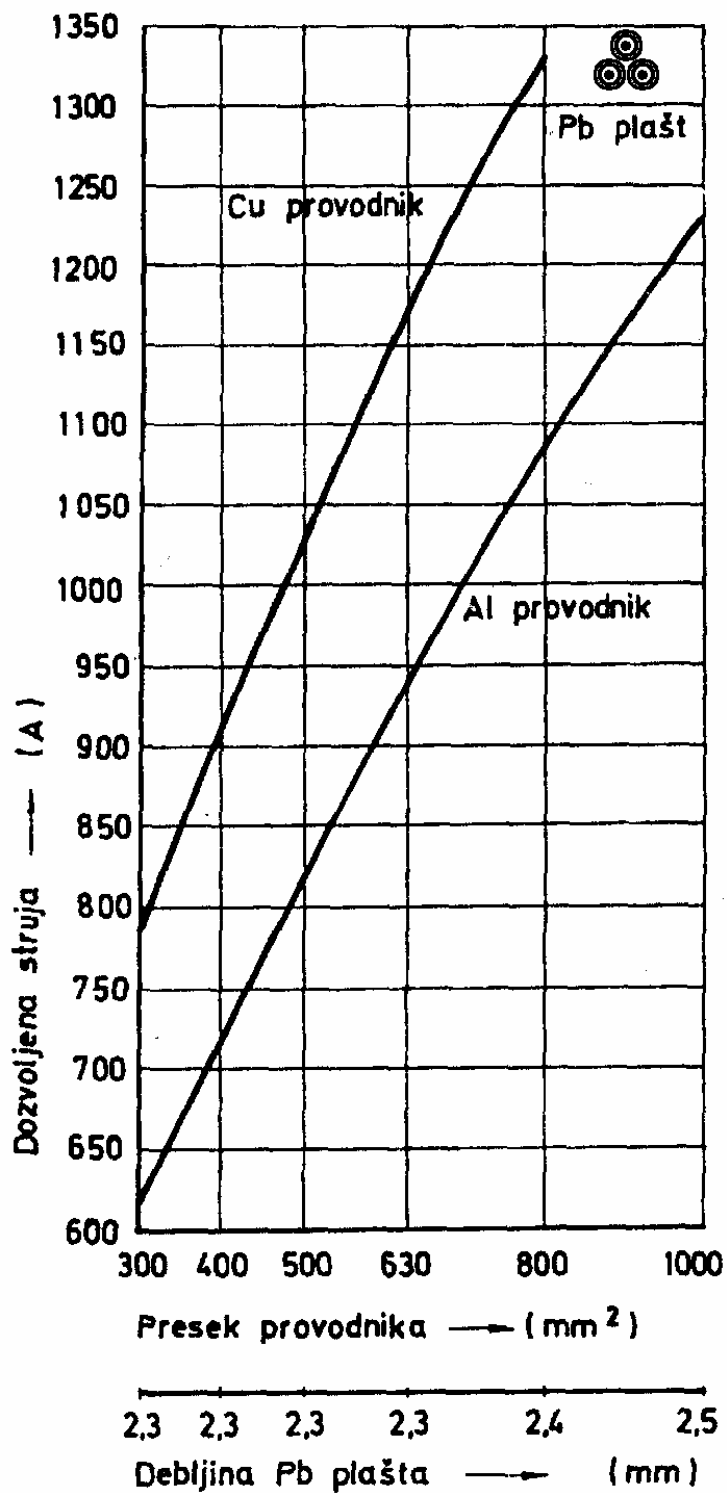
Sl. 17.78. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost) kabla:
 XHE 48-(A) 1x.../... , 64/110 kV
 temperatura vazduha $\theta_v = 25^\circ \text{C}$
 - presek električne zaštite



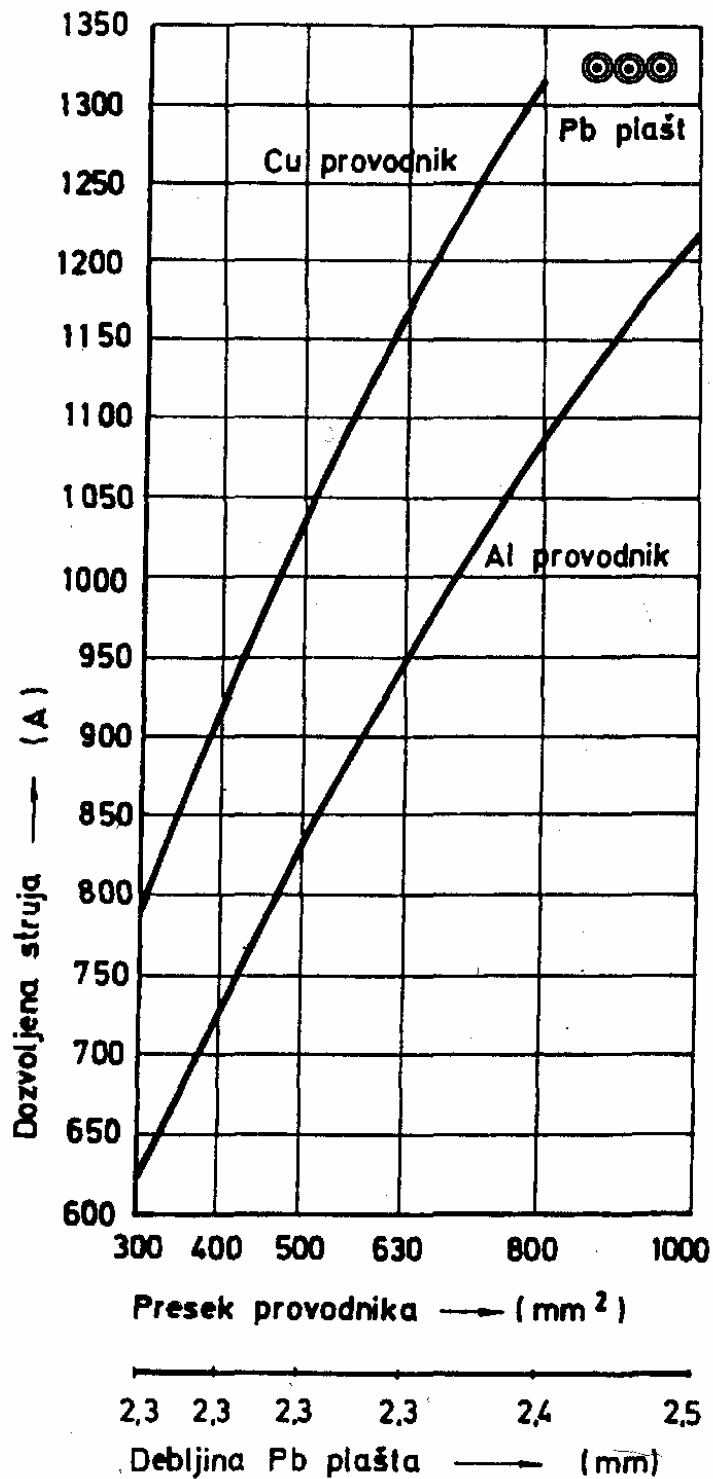
Sl. 17.79. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost) kabla:
 XHE 49-(A) 1x.../... , 64/110 kV
 temperatura vazduha $\theta_v = 25^\circ \text{C}$
 - presek električne zaštite



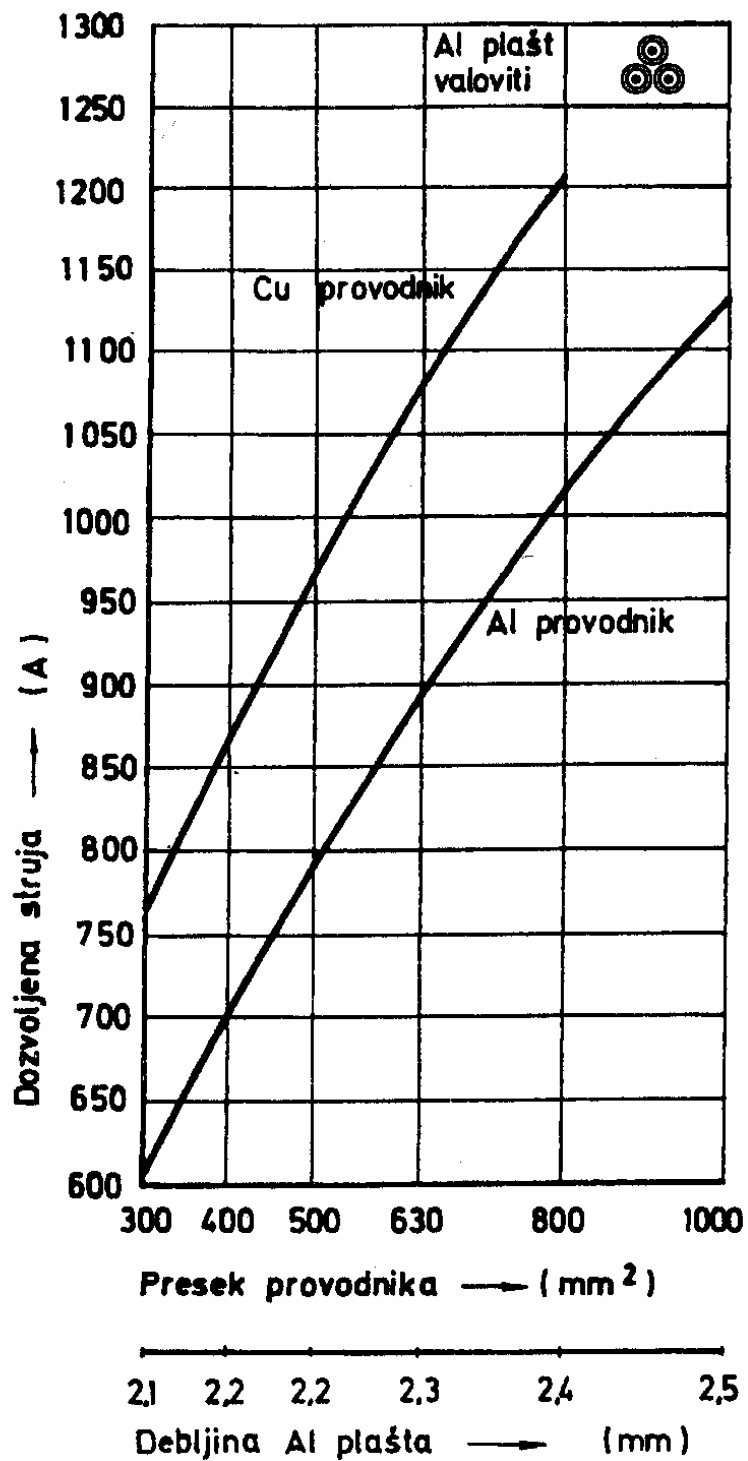
Sl. 17.80. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost) kabla:
 XHE 49-(A) 1x.../..., 64/110 kV
 temperatura vazduha $\theta_v = 25^\circ \text{C}$
 - presek električne zaštite



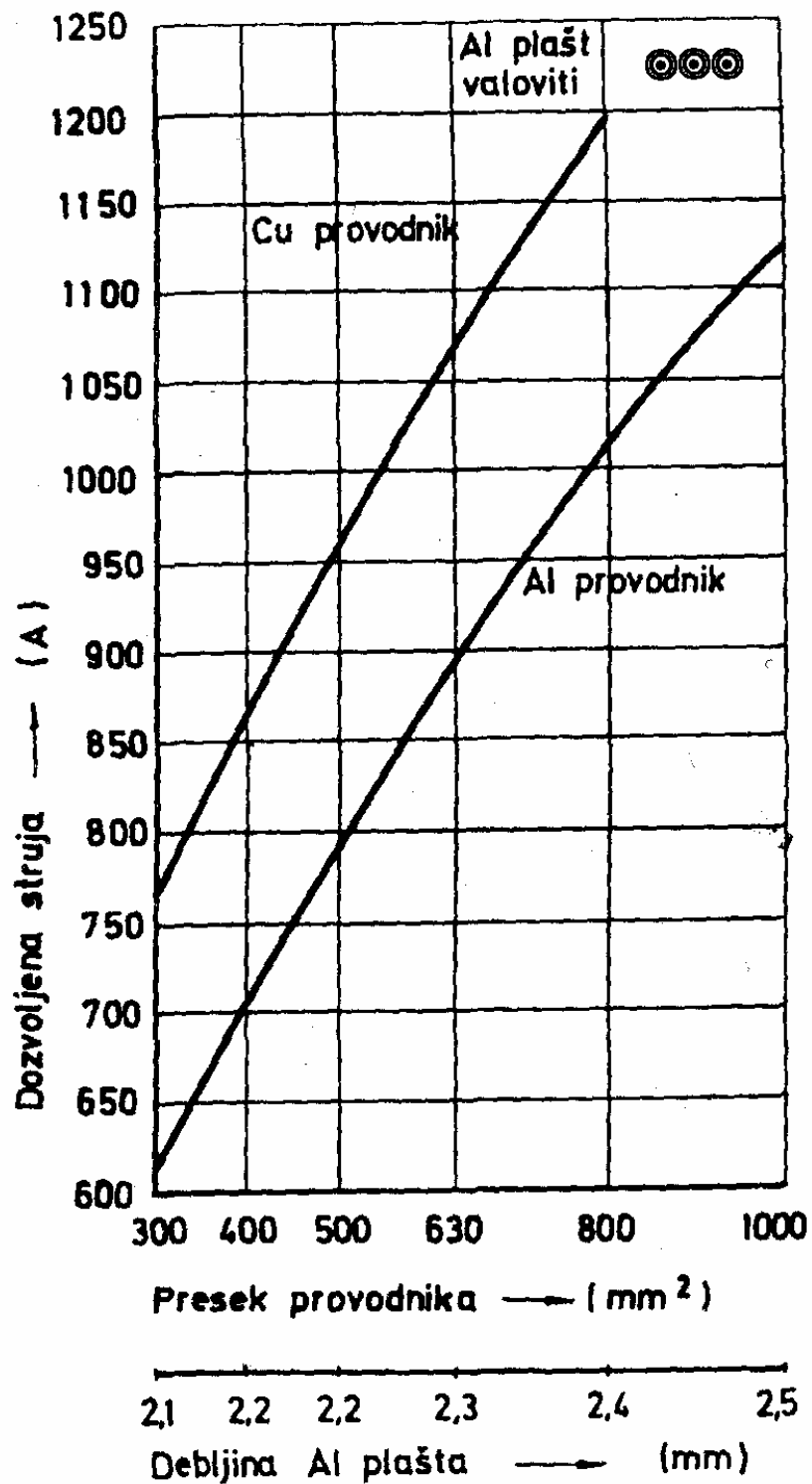
Sl. 17.81. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost) kabla:
 XHO 03-(A) 1x.../... , 64/110 kV
 temperatura vazduha $\theta_v = 25^\circ \text{C}$
 - presek električne zaštite



Sl. 17.82. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost) kabla:
 XHO 03-(A) 1x.../..., 64/110 kV
 temperatura vazduha $\theta_v = 25^\circ \text{C}$
 - presek električne zaštite



Sl. 17.83. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost) kabla:
 XHAv 03-(A) 1x.../... , 64/110 kV
 temperatura vazduha $\theta_v = 25^\circ \text{C}$
 - presek električne zaštite



Sl. 17.84. Dozvoljeno strujno opterećenje (naznačena vrednost) kabla:
 XHAv 03-(A) 1x.../... , 64/110 kV
 temperatura vazduha $\theta_v = 25^\circ \text{C}$
 - presek električne zaštite

17.4. KABL U CEVI

17.4.1. STALNO STRUJNO OPTEREĆENJE ($m=1$) JEDNOG KABLA U CEVI

Dozvoljeno strujno opterećenje jednog kabla pri stalnom opterećenju (faktor opterećenja $m=1$) u cevi dato je izrazom¹⁾:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta_p}{N \cdot R_{\text{eff}} \cdot (T_{\text{kf}} + T_a)} \cdot 10^3} \text{ [A]} \quad (17.62.)$$

gde je:

T_a - toplotni otpor celokupnog ambijenta koji okružuje kabl (Km/W),

$$T_a = T'_a + T''_a + T'''_a$$

T'_a - toplotni otpor vazduha u cevi (Km/W),

T''_a - toplotni otpor cevi (Km/W),

T'''_a - spoljašnji toplotni otpor cevi, tj. ambijenta koji je okružuje (Km/W).

Ostale oznake su kao u izrazu (17.2.)

Uprošćeni izraz toplotnog otpora vazduha u cevi glasi:

$$T'_a = \frac{A}{1 + 0,1 \cdot (B + C \cdot \theta_{\text{sr}})} \text{ [Km/W]} \quad (17.63.)$$

gde je:

θ_{sr} - srednja temperatura vazduha između površine kabla (θ_k) i unutrašnjeg zida cevi (θ_c) ($^{\circ}\text{C}$),

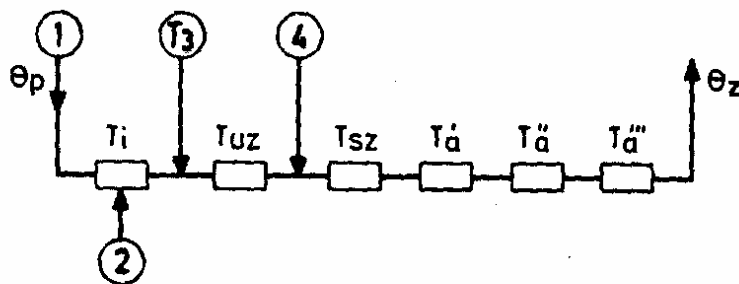
d_k - spoljašnji prečnik kabla (mm).

Ovaj izraz važi za kabl u cevi uz uslov da je $\theta_k - \theta_c \approx 20^{\circ}\text{C}$ i da je spoljašnji prečnik kabla do 100 mm.

Tab. 17.25. Konstante A, B i C

Vrsta cevi	A	B	C
Metalna cev	5,20	1,40	0,0110
Plastična cev u zemljištu ili betonu	5,20	1,10	0,0100
Keramička cev	1,87	0,46	0,0036
Azbestno-cementna cev u betonu	5,20	1,10	0,0110

¹⁾ Dielektrični gubici nisu uzeti u obzir.



Sl. 17.85. Šema prenošenja toplote
sa provodnika kabela u cevi na zemljište

1 - gubici u provodniku; 2 - dielektrični gubici; 3 - gubici u metalnom plaštu;
4 - gubici u mehaničkoj zaštiti; T_i - toplotni otpor izolacije; T_{uz} - toplotni otpor unutrašnje zaštite;
 T_{sz} - toplotni otpor spoljašnje zaštite; T_a - toplotni otpor vazduha u cevi;
 T''_a - toplotni otpor cevi; T'''_a - spoljašnji otpor cevi tj. ambijenta koji okružuje cev (zemljište, beton...); θ_p - temperatura provodnika; θ_z - temperatura ambijenta koji okružuje cev

Toplotni otpor cevi je:

$$T''_a = \frac{\rho_c}{2\pi} \cdot \ln \frac{d_s}{d_u} \text{ [Km/W]} \quad (17.64.)$$

gde je:

- ρ_c - specifični toplotni otpor cevi (Km/W),
- d_u - unutrašnji prečnik cevi,
- d_s - spoljašnji prečnik cevi u istoj jedinici kao d_u .

Toplotni otpor ambijenta koji okružuje cev:

$$T'''_a = \frac{\rho_a}{2\pi} \cdot \ln \frac{4h}{d_s} \text{ [Km/W]} \quad (17.65.)$$

gde je:

- ρ_a - specifični toplotni otpor ambijenta (Km/W),
- h - dubina ukupavanja cevi u istoj jedinici kao i d_s .

Tab. 17.26. Specifični toplotni otpor materijala za cev (ρ_c)

Materijal	ρ_c (Km/W)
PVC	5 - 7
Gvožđe - čelik	$13 \cdot 10^{-3}$
Beton	1 - 1,2

Kako je toplotni otpor vazduha u cevi zavisan od srednje temperature θ_{sr} , a dozvoljena struja od toplotnog otpora tog vazduha, tj. od θ_{sr} to se pri proračunu ovog toplotnog otpora primenjuje postupak iteracije.

Na osnovu izraza:

$$\theta_{sr} = \frac{\theta_p - \theta_z}{T_{kf} + T'_a + T''_a + T'''_a} \cdot \left(\frac{T'_a}{2} + T''_a + T'''_a \right) + \theta_z \quad (17.66.)$$

I predpostavljene vrednosti T'_a izračunava se θ_{sr} . Na osnovu ovako dobijene vrednosti za θ_{sr} računa se T'_a iz izraza (17.63.). Postupak se ponavlja onoliko puta dok razlika između pretpostavljene i izračunate vrednosti za T'_a ne bude dovoljno mala.

Kad dielektrični gubici nisu zanemarljivi onda izraz (17.66.) glasi:

$$\theta_{sr} = \left(\frac{\theta_p - \theta_z - \Delta\theta_D}{T_{kf} + T'_a + T''_a + T'''_a} + w_D \right) \cdot \left(\frac{T'_a}{2} + T''_a + T'''_a \right) + \theta_z \quad (17.67.)$$

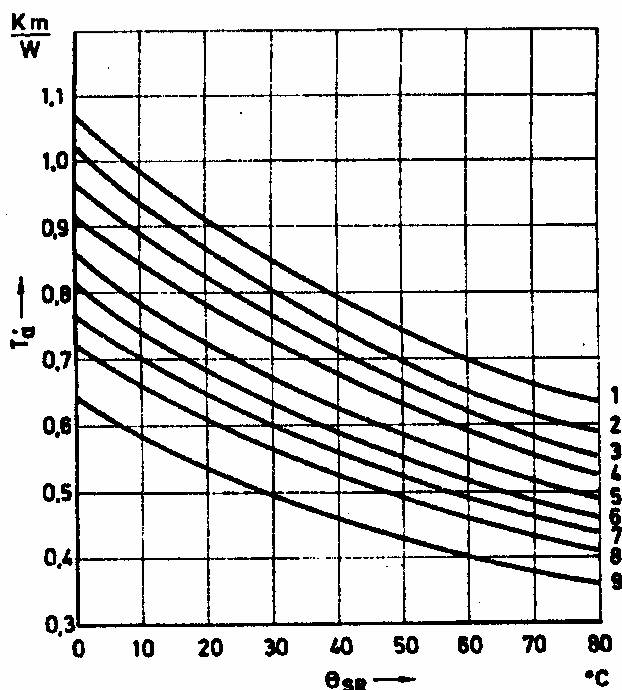
gde je:

w_D - dielektrični gubici,

θ_z - temperatura zemljišta,

$\Delta\theta_D = w_D \cdot (T_{kd} + T'_a + T''_a + T'''_a)$

Za w_D i T_{kd} vidi izraze (17.11.) i (17.16.).



Sl. 17.86. Toplotni otpor vazduha u plastičnoj cevi (T'_a), zavisno od srednje temperature vazduha u cevi (θ_{sr}),

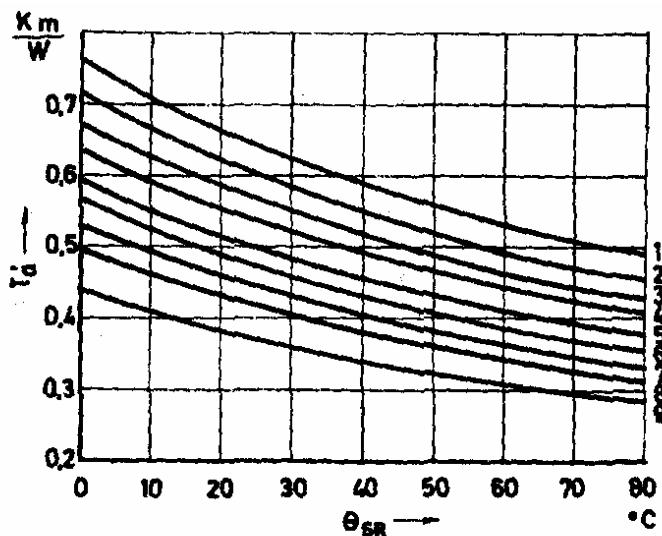
za razne prečnike kabla IPO 13-AS, 10/6 kV

Presek provodnika i spoljašnji prečnik kabla:

1 - $3 \times 50 \text{ mm}^2$, 42 mm; 2 - $3 \times 70 \text{ mm}^2$, 45 mm; 3 - $3 \times 95 \text{ mm}^2$, 48 mm; 4 - $3 \times 120 \text{ mm}^2$, 51 mm;

5 - $3 \times 150 \text{ mm}^2$, 56 mm; 6 - $3 \times 185 \text{ mm}^2$, 59 mm; 7 - $3 \times 240 \text{ mm}^2$, 63 mm;

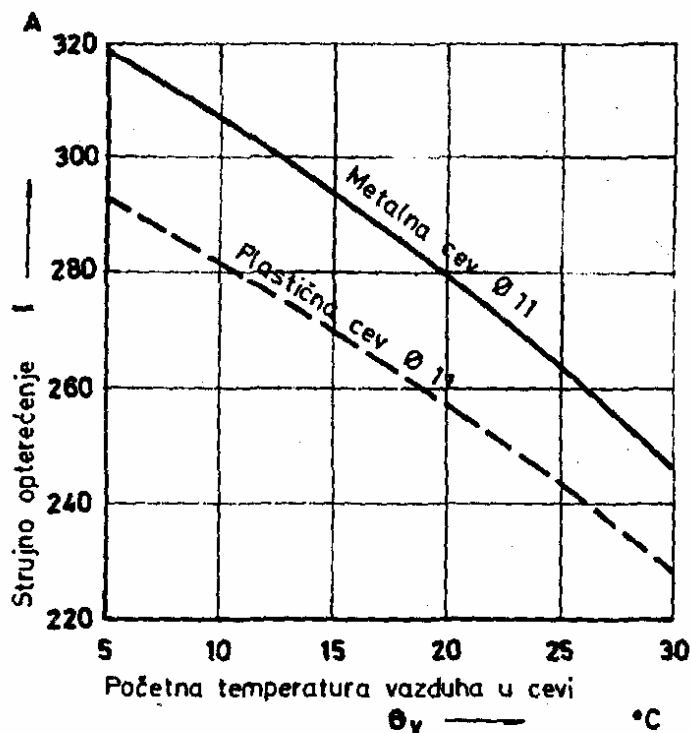
8 - $3 \times 300 \text{ mm}^2$, 68 mm; 9 - $3 \times 400 \text{ mm}^2$, 78 mm.



Sl. 17.87. Toplotni otpor vazduha u metalnoj cevi (T'_a), zavisno od srednje temperature vazduha u cevi (θ_{sr}), za razne prečnike kabla IPO 13-AS, 10/6 kV

Presek provodnika i spoljašnji prečnik kabla:

- 1 - 3x50 mm², 42 mm; 2 - 3x70 mm², 45 mm; 3 - 3x95 mm², 48 mm; 4 - 3x120 mm², 51 mm;
 5 - 3x150 mm², 56 mm; 6 - 3x185 mm², 59 mm; 7 - 3x240 mm², 63 mm;
 8 - 3x300, 68 mm; 9 - 3x400 mm², 78 mm.



Sl. 17.88. Dozvoljeno strujno opterećenje kabla IPO 13-AS 3x240 mm², 6/10 kV u cevi zavisno od početne temperature zemljišta tj. vazduha u cevi (cev 110/100 mm).

17.4.2. GRUPA KABLOVA ISTOG TIPA I STRUJNOG OPTEREĆENJA U CEVIMA (m=1)

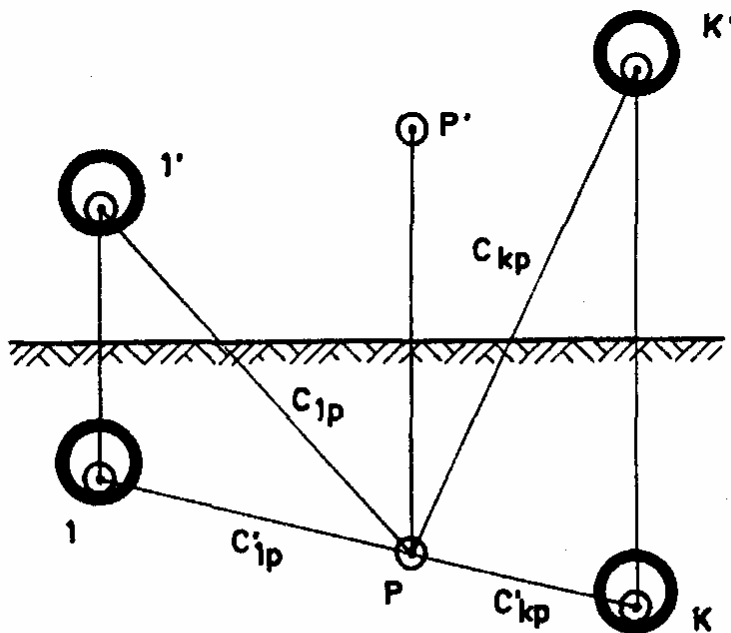
Dozvoljeno strujno opterećenje bilo kog kabla u grupi od k kablova istog tipa i jednakog strujnog opterećenja (faktor opterećenja m=1) dato je izrazom¹⁾:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta_p}{N \cdot R_{\text{ef}} \cdot (T_{\text{kt}} + T_a + \Delta T_a)}} \cdot 10^3 \text{ [A]} \quad (17.68.)$$

gde je ΔT_a dodatni toplotni otpor ambijenta izazvan prisustvom grupe kablova (k-1).

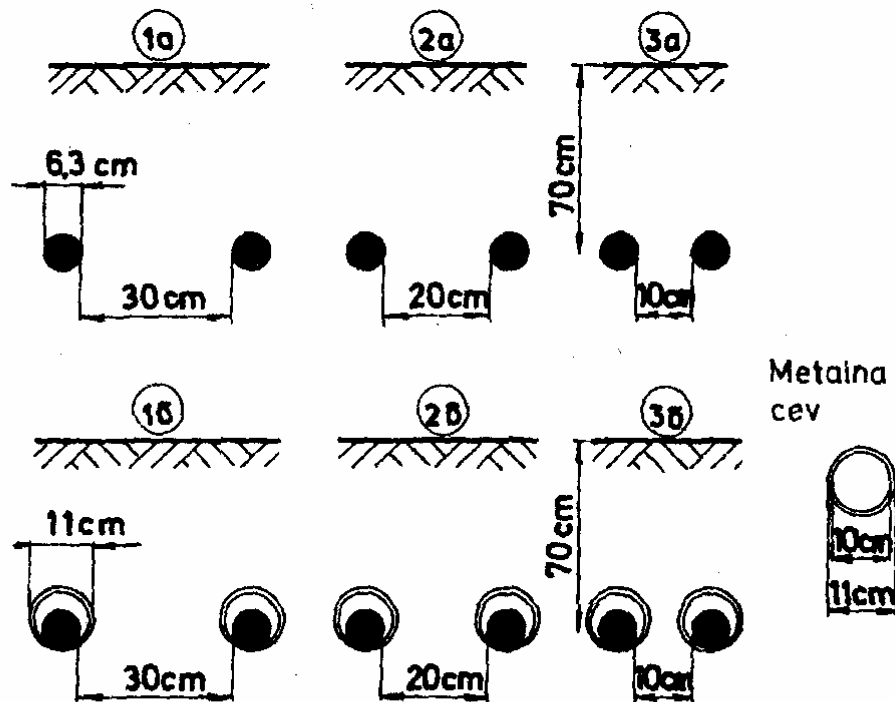
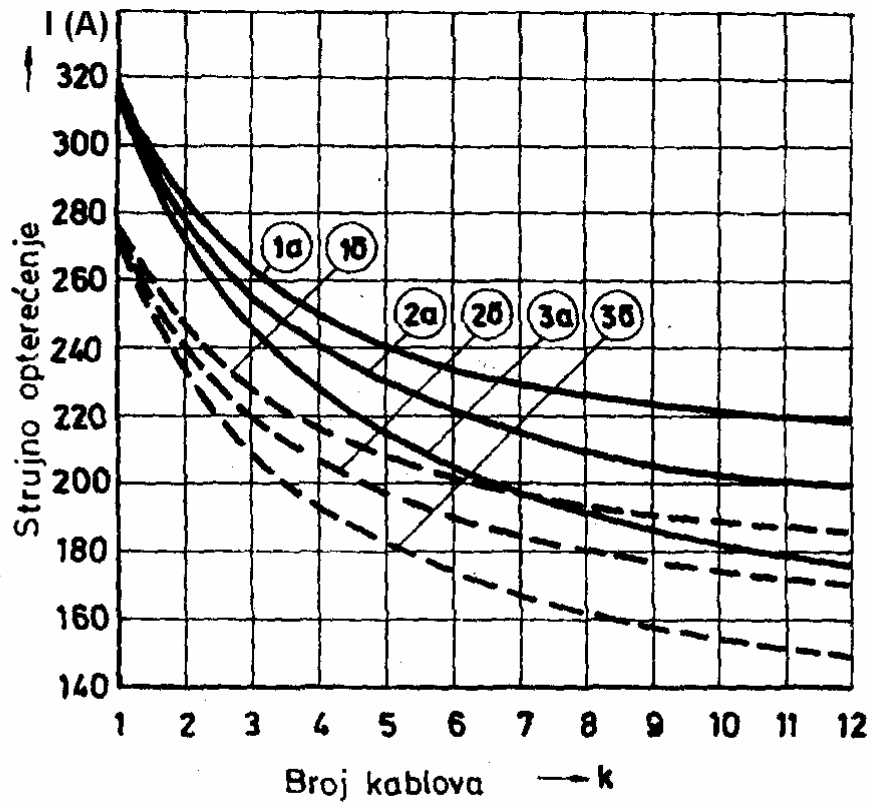
$$\Delta T_a = \frac{z}{2\pi} \cdot \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq p}}^k \ln \frac{C_{ip}}{C'_{ip}} \text{ [Km/W]} \quad (17.69.)$$

Ostale oznake su prema izrazu (17.2.)

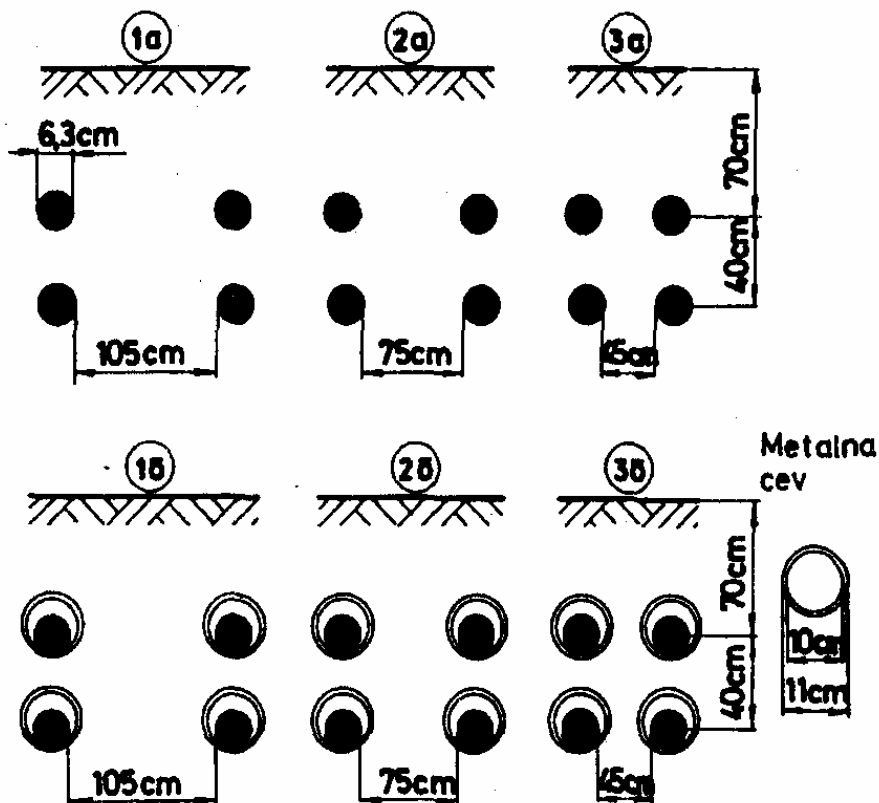
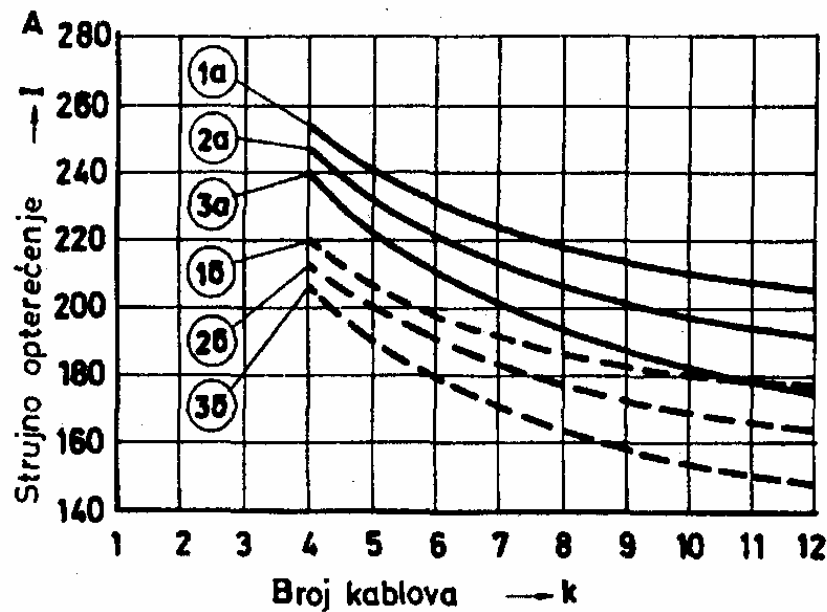


Sl. 17.89. Međusobni toplotni uticaj kablova (p - posmatrani kabl pod uticajem ostalih kablova)

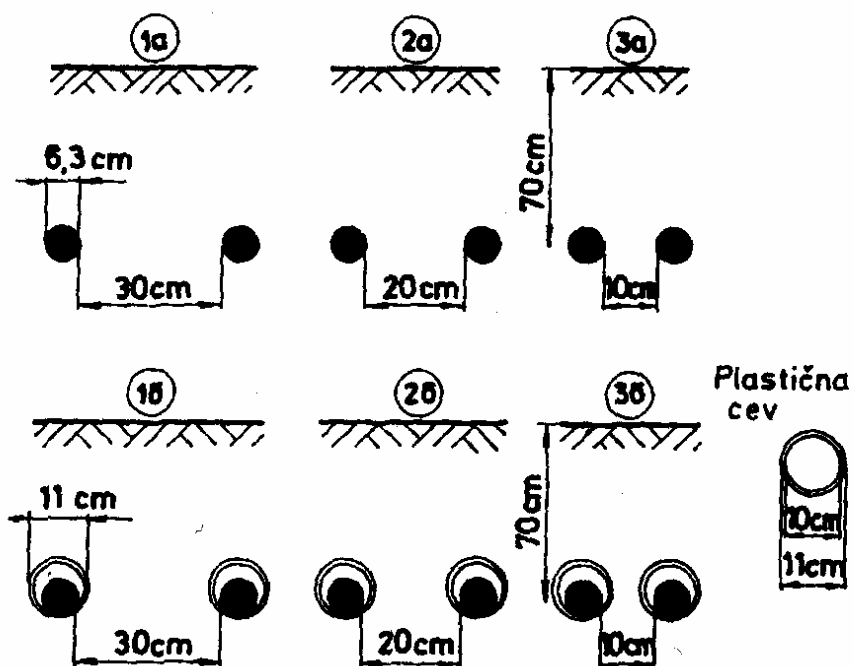
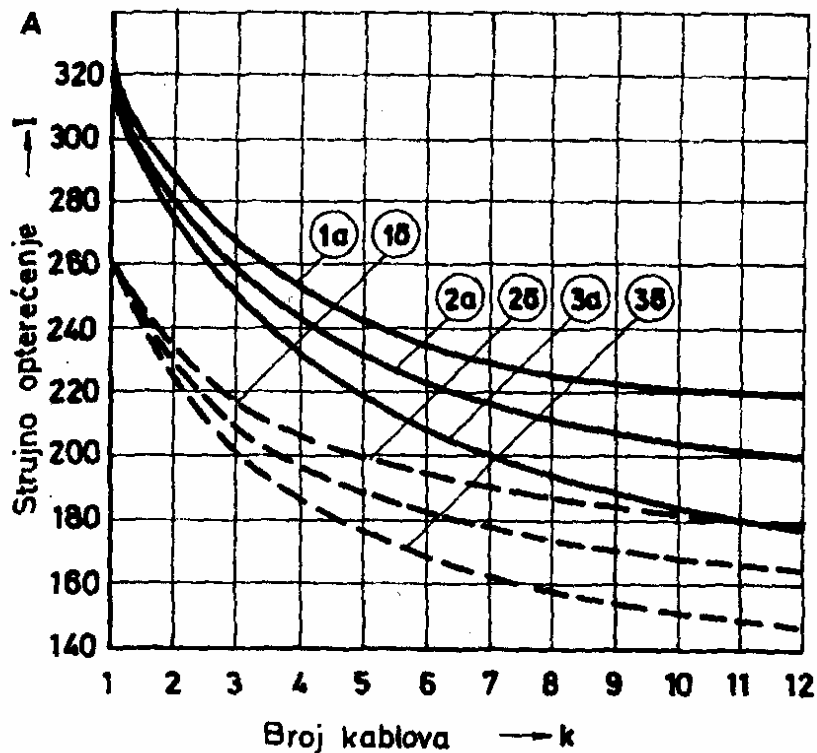
¹⁾ Dielektrični gubici nisu uzeti u obzir.



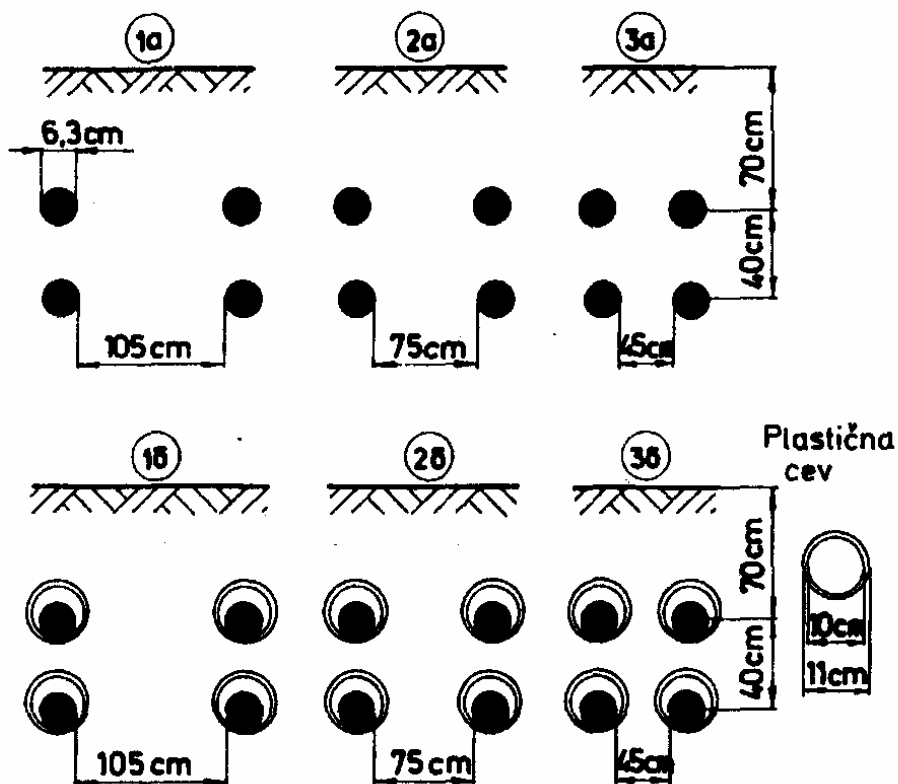
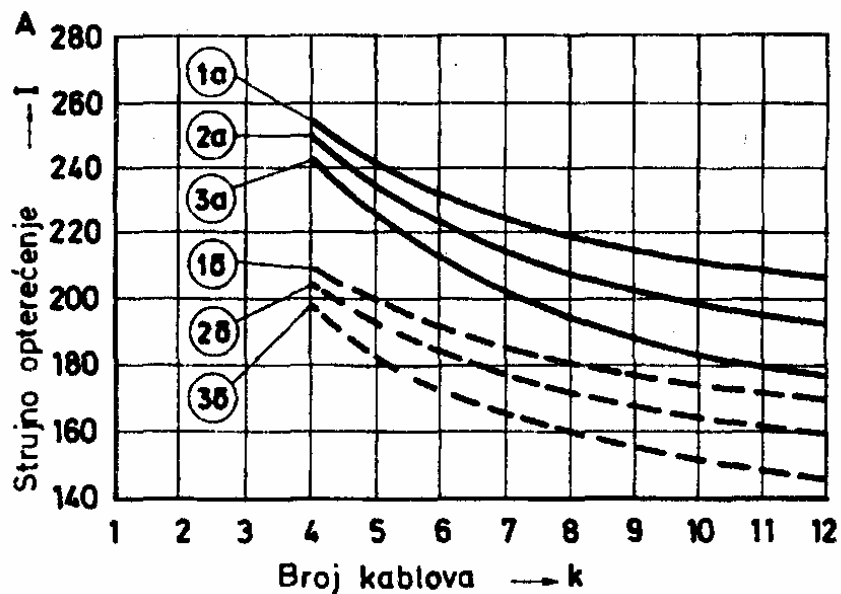
Sl. 17.90. Dozvoljeno strujno opterećenje kablova IPO 13-AS $3 \times 240 \text{ mm}^2$, 6/10 kV u metalnim cevima¹ u zemljištu. Kablovi u jednoj ravni. Temperatura zemljišta $\theta_z = 20^\circ \text{ C}$, specifični toplotni otpor zemljišta $\rho_z = 1 \text{ Km/W}$



Sl. 17.91. Dozvoljeno strujno opterećenje kablova IPO 13-AS $3 \times 240 \text{ mm}^2$, 6/10 kV u metalnim cevima i u zemljištu. Kablovi u dva nivoa (tzv "paket"). Temperatura zemljišta $\theta_z = 20^\circ \text{ C}$, specifični toplotni otpor zemljišta $\rho_z = 1 \text{ Km/W}$



Sl. 17.92. Dozvoljeno strujno opterećenje kablova IPO 13-AS $3 \times 240 \text{ mm}^2$, 6/10 kV u plastičnim cevima i u zemljištu. Kablovi u jednoj ravni. Temperatura zemljišta $\theta_z = 20^\circ \text{ C}$, specifični toplotni otpor zemljišta $\rho_z = 1 \text{ Km/W}$



Sl. 17.93. Dozvoljeno strujno opterećenje kablova IPO 13-AS $3 \times 240 \text{ mm}^2$, 6/10 kV u plastičnim cevima i u zemljištu. Kablovi u dva nivoa (tzv "paket"). Temperatura zemljišta $\theta_z = 20^\circ \text{ C}$, specifični toplotni otpor zemljišta $\rho_z = 1 \text{ Km/W}$

17.4.3. GRUPA KABLOVA ISTOG TIPA U CEVIMA, ISTOG PROMENLJIVOG OPTEREĆENJA, SA ISUŠIVANJEM ZEMLJIŠTA

Dozvoljeno strujno opterećenje, u amperima, dato je sledećim izrazom (17.70.):

$$I = \sqrt{\frac{\theta_{pd} - \theta_z - w_D \cdot (T_{KD} + T'_a + T''_a + T_{zi} + \Delta T_{zi}) + \frac{\rho_x - \rho_z}{\rho_z} \cdot (\theta_x - \theta_z)}{N \cdot R_{efj} \cdot (T_{kf} + T'_a + T''_a + T_{xy} + \Delta T_{xy})}} \cdot 10^3$$

gde je:

$$T_{xy} = \frac{\rho_x}{2\pi} \cdot \left(\ln \frac{4h}{d_c} + (\mu - 1) \cdot \ln \frac{4h}{d_y} \right) \text{ [Km/W]} \quad (17.71.)$$

$$T_{xy} = \frac{\rho_x}{2\pi} \cdot \ln \frac{4h}{d_c} \text{ [Km/W]} \quad (17.72.)$$

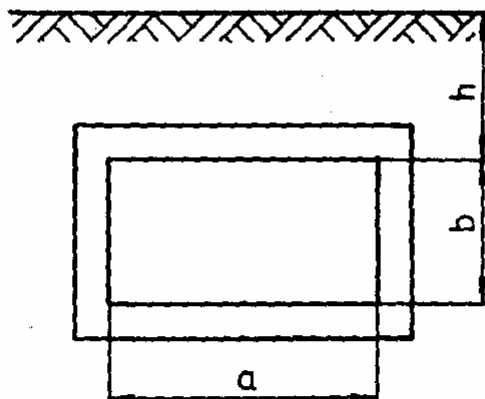
d_c - spoljašnji prečnik cevi u istoj jedinici kao i h .

Ostale veličine su kao u jednačinama (17.16.), (17.45.) i (17.46).

17.5. KABLOVI U KANALIMA

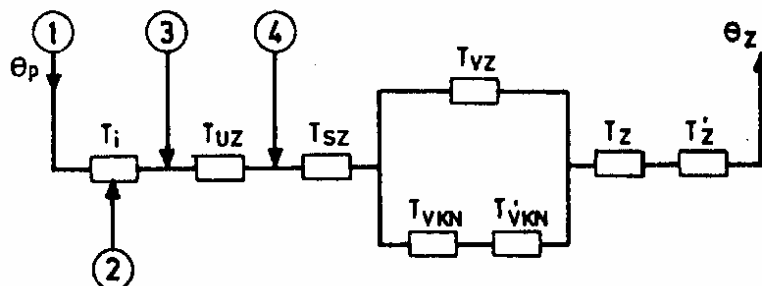
17.5.1. NEPROHODNI KANALI

Pretpostavka je da u kanalu nema prirodne cirkulacije vazduha, jer je uobičajeno da su kanali bar na početku ili na kraju zatvoreni.



Sl. 17.94. Neprohodni kanal u zemlji

Zngrevanje vazduha u kanalu zavisi od veličine kanala ($a \times b$), gubitaka u kablovima, broja kablova, tipa kablova, ali ne od rasporeda kablova u kanalu (kablovi se ne dodiruju).



Sl. 17.95. Šema prenošenja toplote s kabela u kanalu na zemljište

- 1 - gubici u provodniku; 2 - dielektrični gubici; T_i - toplotni otpor izolacije;
 3 - gubici u metalnom plaštu; T_{uz} - toplotni otpor unutrašnje zaštite;
 4 - gubici u mehaničkoj zaštiti; T_{sz} - toplotni otpor spoljašnje zaštite;
 T_{vz} - toplotni otpor vazduha usled zračenja; T_{vkn} - toplotni otpor vazduha usled konvekcije; T'_{vkn} - prelazni toplotni otpor usled konvekcije (na unutrašnje zidove kanala);
 T_z - toplotni otpor zemljišta; T'_z - prelazni toplotni otpor površine zemlje;
 θ_p - temperatura provodnika; θ_z - temperatura zemljišta

Toplotni otpor prema sl. 17.95.:

Toplotni otpor vazduha usled zračenja:

$$T_{vz} = \frac{1}{2r_k \cdot \pi \cdot f_z \cdot \alpha_z} \text{ [Km/W]} \quad (17.73.)$$

Vidi jednačine 17.51. i dalje. Koeficijent emisije $K_E \approx 0,95$.

Toplotni otpor vazduha usled konvekcije:

$$T_{vz} = \frac{1}{2r_k \cdot \pi \cdot f_k \cdot \alpha_k} \text{ [Km/W]} \quad (17.74.)$$

Vidi jednačine 17.51. i dalje.

Prelazni toplotni otpor na unutrašnje zidove kanala konvekcijom:

$$T'_{vkn} = \frac{1}{\alpha'_k \cdot 2(a+b)} \text{ [Km/W]} \quad (17.75.)$$

gde je $\alpha'_k = 7,7 \text{ W/Km}^2$ (Prema DIN 4701: Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden, uzeta srednja vrednost za zidove i zemljište).

Ukupni toplotni otpor kanala je:

$$T_{KN} = \frac{T_{vz} \cdot (T_{VKN} + T'_{VKN})}{T_{VKN} + T'_{VKN} + T_{vz}} \quad [\text{Km/W}] \quad (17.76.)$$

Toplotni otpor zemljišta koje okružuje kanal je¹⁾:

$$T_z = \frac{\rho_z}{\frac{4}{\pi} \left(1 + \ln \left(\frac{b}{h} + 1 \right) + \sqrt{\left(\frac{b}{h} + 1 \right)^2 - \frac{1}{2}} + \frac{a}{h} \right)} \quad [\text{Km/W}] \quad (17.77.)$$

gde je:

ρ_z - specifični toplotni otpor zemljišta (Km/W)
 a, b, h - vidi sliku 17.94.

Toplotni otpor zemljišta i njen prelazni toplotni otpor iznosi:

$$T_z + T'_z = \frac{\rho_z}{\frac{4}{\pi} \left(1 + \ln \left(\frac{b}{h'} + 1 \right) + \sqrt{\left(\frac{b}{h'} + 1 \right)^2 - \frac{1}{2}} + \frac{a}{h'} \right)} \quad [\text{Km/W}] \quad (17.78.)$$

gde je:

$$h' = h + \frac{1}{\alpha \cdot \rho_z}, \quad \alpha = 20 \text{ W/Km}^2$$

Temperatura vazduha u kanalu pri strujno opterećenim kablovima je:

$$\theta_{KN} = \theta_{KNP} + (T_z + T'_z) \sum_{i=1}^{i=n} (w_i + w_{Di}) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (17.79.)$$

gde je:

θ_{KN} - temperatura vazduha u kanalu sa kablovima ($^{\circ}\text{C}$),
 θ_{KNP} - temperatura vazduha u praznom kanalu ($^{\circ}\text{C}$),
 w - strujni gubici u kablju (W/m),
 w_D - dielektrični gubici u kablju (W/m),
 n - broj kablova u kanalu.

¹⁾ Uzeto je da specifični toplotni otpor materijala kanala jednak ρ_z . Na taj način toplotni otpor obuhvata deo od unutrašnjih zidova kanala do površine zemlje.

Problem je u određivanju temperature vazduha u kanalu, jer zavisi od više činilaca: dubine kanala, dimenzija kanala, godišnjeg doba, geografskog područja, zračenja sunca i sl.

Ako se u kanalu nalazi n kablova različitih tipova onda je razlika temperature površine kabla br. 1 (θ_{k1}) i temperature vazduha u kanalu (θ_{KN}):

$$\Delta\theta_{a1} = \theta_{k1} - \theta_{KN}$$

$$\Delta\theta_{a1} = A_i \cdot (T_{KN} + T_z + T'_z) + \theta_z - \theta_{KNP} - (T_z + T'_z) \cdot \sum_{i=1}^{i=n} A_i \quad [A] \quad (17.80.)$$

gde je:

$$A_i = \frac{\theta_{pi} - \theta_z - \Delta\theta_{Di}}{T_{kfi} + T_{KN} + T_z + T'_z},$$

$$\Delta\theta_{Di} = w_{Di} \cdot (T_{ii}/2 + T_{uzi} + T_{szi} + T_{KN} + T_z + T'_z),$$

θ_{k1} - temperatura površine kabla br. 1,

θ_{KN} - temperatura kabla u kanalu.

Postupak proračuna toplotnog otpora kanala T_{KN} se sprovodi na sličan način kao i za toplotni otpor vazduha:

- Predpostavi se vrednost za T_{KN} ,
- Izračuna se $\Delta\theta_{a1}$, prema izrazu (17.80.),
- Na osnovu $\Delta\theta_{a1} = \theta_{k1} - \theta_{KN}$ izračunava se T_{KN} prema izrazu (17.76.)

Ovakav postupak iteracije se nastavlja onoliko puta dok se pretpostavljena i izračunata vrednost za T_{kn} ne približe jedna drugoj na željenu tačnost.

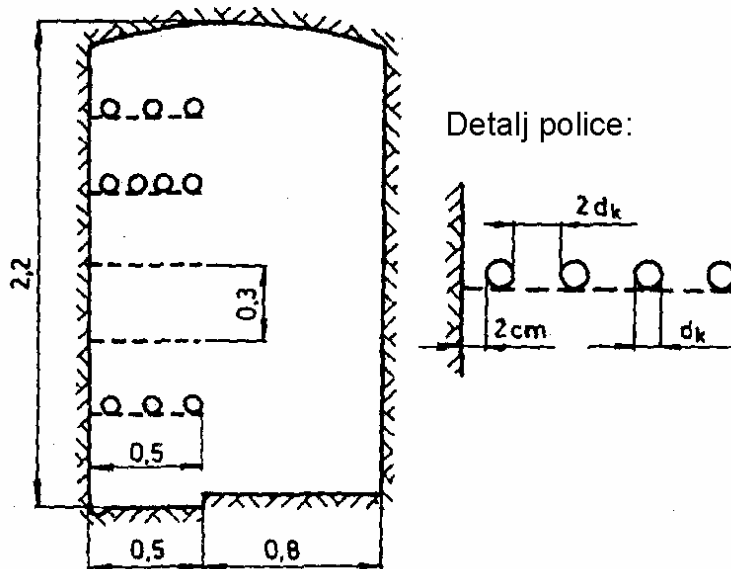
Dozvoljeno strujno opterećenje bilo kog kabla u grupi od n kablova je:

$$I_i = \sqrt{\frac{\theta_{pdi} - \theta_z - \Delta\theta_{Di}}{N \cdot R_{efj} \cdot (T_{kfi} + T_{KN} + T_z + T'_z)}} \cdot 10^3 \quad [A] \quad (17.93.)$$

Oznake veličina su kao u izrazu (17.12.).

17.5.2. PROHODNI KANALI

Uobičajeno je da se kablovi u prohodnim kanalima postavljaju na police sa otvorima za cirkulaciju vazduha, a razmeštaju se tako da nema potrebe za redukcijom strujnog opterećenja.



Sl. 17.96. Prohodni kanal - galerija za kablove

Temperatura vazduha u kanalu je:

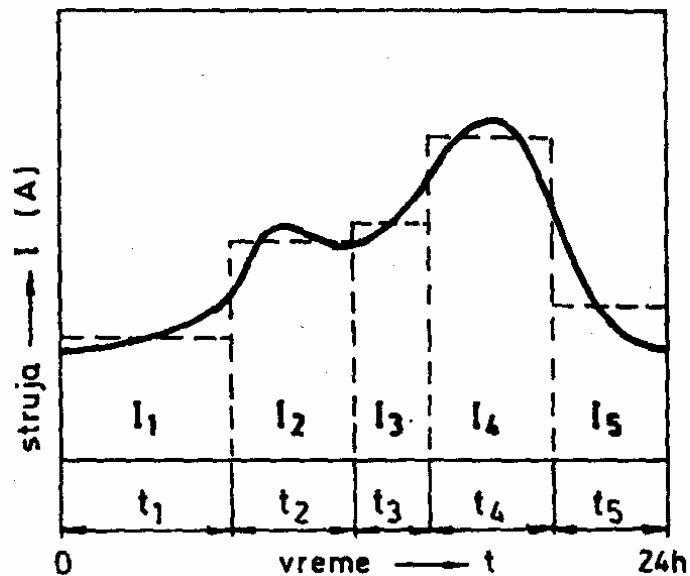
$$\theta_{KN} = \theta_{KNP} + (T_z + T'_z) \cdot \sum_{i=1}^{i=n} (w_i + w_{Di}) \quad [^{\circ}C] \quad (17.82.)$$

Oznake veličina su iste kao u jednačini (17.79.).

Kako je toplotna vremenska konstanta kanala više puta veća od konstante kabla može se pisati:

$$I_{sr} = \sqrt{\frac{\sum I_i^2 \cdot t_i}{24}} = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + \dots + I_k^2 \cdot t_k}{t_1 + t_2 + \dots + t_k}} \quad (17.83.)$$

gde je I_{sr} srednja struja prema dijagramu opterećenja kabla.



Sl. 17.97. Dijagram opterećenja kabla

Broj srednjoj struji odgovaraju gubici:

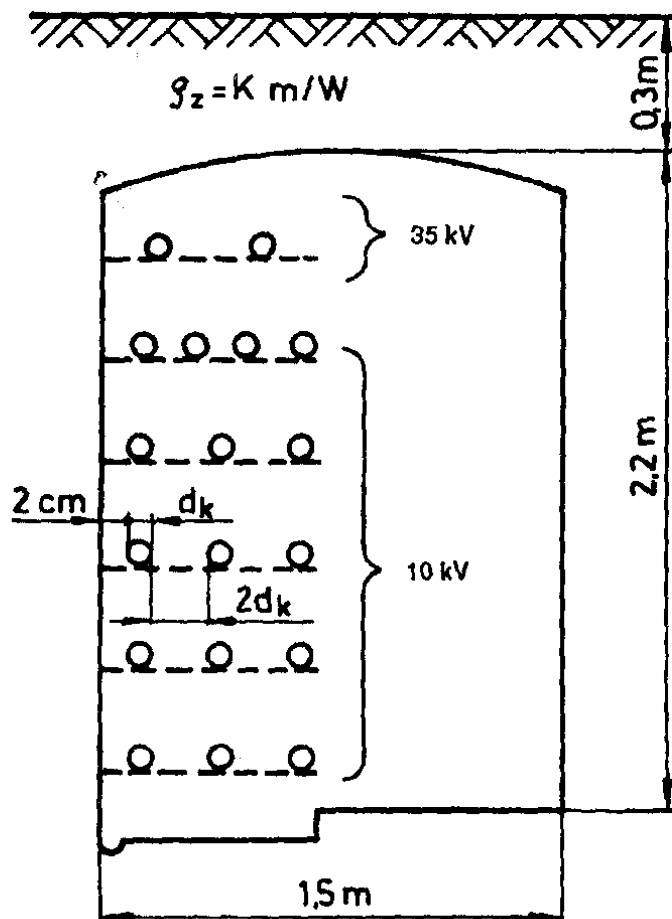
$$W = W_N \cdot \left(\frac{I_{sr}}{I_N} \right)^2 \quad (17.84.)$$

gde je w_N gubici pri naznačenoj struji I_N .

Rad proračuna se sastoji u određivanju ukupnih gubitaka svih kablova, na osnovu srednjih struja, a potom temperature vazduha u kanalu prema jednačini (17.82.). Prethodno se odrede toplotni otpori T_2 i T'_2 prema jednačinama datim u poglavlju 17.5.1. - NEPROHODNI KANALI. Na osnovu temperature vazduha u kanalu određuje se strujno opterećenje kabla pa ako je veće od polazne vrednosti onda nije potrebna veštačka ventilacija kanala.

Primer 17.11. Strujna opteretljivost kablova u prohodnom kanalu
 Kablovi su međusobno razmaknuti za dvostruki prečnik, a od zida je
 cm. Temperatura vazduha u kanalu pri neopterećenim kablovima je 20°
 C. Specifični toplotni otpor zemljišta je $\rho_z = 1 \text{ Km/W}$.

Tip kabla	Jedinica	NPO 13-A 3x240 mm ² 6/10 kV	NPZO 13 3x95 mm ² 20/35 kV
Broj kablova	kom.	16	2
u vazduhu, I_N	A	320	230
u zemlji, I_N	A	325	240
gubici (kabl u zemlji), w_N	W/m	49	39
dozvoljena temperatura, θ_{pd}	° C	65	60
Dijagram opterećenja		5 h, 250 A 10 h, 100 A 9 h, 50 A	5 h, 190 A 10 h, 80 A 9 h, 60 A



Za 10 kV kabl:

$$I_{sr} = \sqrt{\frac{250^2 \cdot 5 + 100^2 \cdot 10 + 50^2 \cdot 9}{24}} = 134 \text{ A}$$

$$w = 49 \cdot \left(\frac{134}{325}\right)^2 = 8,32 \text{ W/m}$$

$$\sum w = 8,32 \cdot 16 = 133 \text{ W/m}$$

Za 35 kV kabl

$$I_{sr} = \sqrt{\frac{190^2 \cdot 5 + 80^2 \cdot 10 + 60^2 \cdot 9}{24}} = 107 \text{ A}$$

$$w = 39 \cdot \left(\frac{107}{240}\right)^2 = 7,75 \text{ W/m}$$

$$\sum w = 7,75 \cdot 2 = 15,5 \text{ W/m}$$

Ukupni gubici kablova 10 i 35 kV su:

$$\sum w = 133 + 15,5 = 148,5 \text{ W/m}$$

$$h' = h + \frac{1}{\alpha \cdot \rho_z} = 0,3 + \frac{1}{20 \cdot 1} = 0,305 \text{ m}$$

Toplotni otpori T_z i T'_z su:

$$T_z + T'_z = \frac{1}{\frac{4}{\pi} \cdot \left(1 + \ln \left(\frac{\frac{2,2}{0,305} + 1}{\sqrt{2}} + \sqrt{\left(\frac{\frac{2,2}{0,305} + 1}{\sqrt{2}} \right)^2 - \frac{1}{2}} \right) \right) + \frac{1,5}{0,305}}$$

$$T_z + T'_z = 0,10 \text{ Km/W}$$

Temperatura vazduha u kanalu je:

$$\theta_{KN} = 20 + 0,10 \cdot 148,5 = 34,85^{\circ} \text{ C}$$

Temperaturni korekcionni faktor za 10 kV kabl:

$$K = \sqrt{\frac{65 - 34,85}{65 - 30}} = 0,92$$

Proizilazi da je dozvoljeno strujno opterećenje 10 kV kabla:

$$I_{\alpha} = 320 \cdot 0,92 = 294 \text{ A} > 250 \text{ A}$$

te nisu potrebne posebne mere (povećanje dimenzija kanala, ukopavanje kanala - manje h ili prinudna ventilacija).

Slično je i sa kablovima 35 kV.

17.6. UTICAJ KABLOVSKE POSTELJICE

ozvoljeno strujno opterećenje n višezilnih kablova istog tipa i jednako pomenljivog strujnog opterećenja sa pojavom isušivanja zemljišta, u kablovskoj posteljici dimenzija $y \times x$ dato je izrazom (17.85.):

$$I = \sqrt{\frac{\theta_{pd} - \theta_z - w_d \cdot (T_{kd} + T_p + \Delta T_p + T'_p) + \frac{\rho_x - \rho_z}{\rho_z} \cdot (\theta_x - \theta_z)}{N \cdot R_{efj} \cdot (T_{kf} + T_{py} + \Delta T_{py} + T'_{py})}} \cdot 10^3 \text{ [A]}$$

gde je:

$$T_p = \frac{\rho_p}{2\pi} \cdot \ln \frac{4h}{d_k} \quad (17.86.)$$

$$\Delta T_p = \frac{\rho_p}{2\pi} \cdot \sum_2^n \ln \frac{c_i}{c'_i} \quad (17.87.)$$

$$T_{py} = \frac{\rho_p}{2\pi} \cdot \left(\ln \frac{4h}{d_k} + (\mu - 1) \cdot \ln \frac{4h}{d_y} \right) \quad (17.88.)$$

$$\Delta T_{py} = \frac{\rho_p}{2\pi} \cdot \left(\sum_2^{n_y} \ln \frac{c_i}{c'_i} + \mu \cdot \sum_{n_y+1}^n \ln \frac{c_i}{c'_i} + (n_y - 1) \cdot (\mu - 1) \cdot \ln \frac{4h}{d_y} \right) \quad (17.89.)$$

$$T'_p = \frac{\rho_x - \rho_p}{2\pi} \cdot \left(n_z \cdot \ln k_p + \sum_{n_z+1}^n \ln \frac{c_i}{c'_i} \right) \quad (17.90.)$$

$$T'_{py} = \frac{\rho_x - \rho_p}{2\pi} \cdot \left(n_z \cdot \ln k_p + \mu \cdot \sum_{n_z+1}^n (\mu - 1) \cdot \ln \frac{4h}{d_y} \right) \quad (17.91.)$$

$$k_p = \frac{2h_p}{\alpha_z} + \sqrt{\left(\frac{2h_p}{d_z} \right)^2 - 1} \quad (17.92.)$$

zamenski prečnik posteljice (prema IEC 287):

$$d_z = 2 \cdot e \left(\frac{4x \cdot y - \pi \cdot x^2}{2y^2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{x^2 + y^2}{x^2} \right) + \ln \frac{x}{2} \right) \quad (17.93.)$$

(važi za $y/x \leq 3$)

ρ_p - specifični toplotni otpor posteljice (Km/W),

n - ukupni broj kablova,

n_y - broj kablova obuhvaćen karakterističnim prečnikom d_y ,

n_z - broj kablova obuhvaćen zamenskim prečnikom d_z .

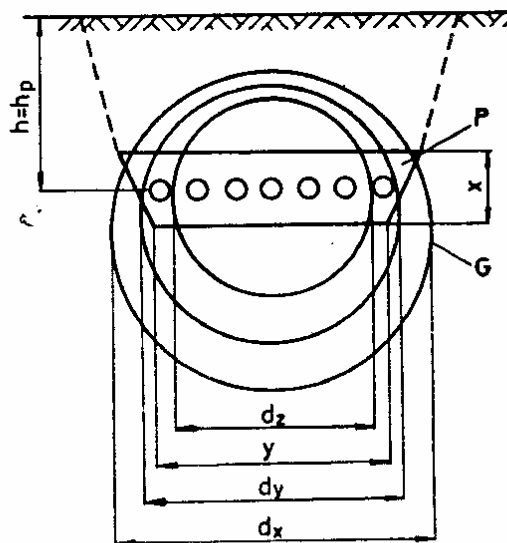
Ovi izrazi važe za $d_x > d_y > d_z$. Izrazi od (17.85.) do (17.91.) su u Km/W. Ostale oznake su kao u izrazu (17.16.).

Za $d_x > d_z > d_y$ menja se:

$$T'_{py} = \mu \cdot T'_p \text{ [Km/W]} \quad (17.105.)$$

Za jednožilne kablove: za $d_x > d_z > d_y$ kao u izrazima (17.90.) i (17.91.).

Za $d_x > d_z > d_y$ kao u izrazima (17.90.) i (17.93.).



Sl. 17.98. Šematski prikaz zone isušivanja (d_x), karakterističnog prečnika (d_y) i zamenskog prečnika (d_z)
P - kablovska posteljica; G - granična zona isušivanja; $d_x > d_y > d_z$

Izraz (17.85.) se može koristiti i za slučaj tzv. betonske blokovice dimenzija $y \times x$ (u ovom slučaju specifični toplotni otpor kablovice je konstantan).

Primer 17.12. Proračun dozvoljene struje pri promenljivoj opterećenju srednjeg oblika sa isušivanjem zemljišta.

- *Kabl IPO 13-AS 3x150 mm², 6/10 kV,*
- *Kabl položen u specijalnu posteljicu (vidi sliku u primeru),*
- *m = 0,7,*
- *ρ_p = 1,2 Km/W (isušeno stanje),*
- *y = x = 40 cm,*
- *h_p = 70 cm.*

Ostali podaci su isti kao u primerima 17.1., 17.2. i 17.5.

Zanemarujući dielektrične gubitke dozvoljeno strujno opterećenje je:

$$I = \sqrt{\frac{\theta_{px} - \theta_z + \frac{\rho_x - \rho_z}{\rho_x} \cdot (\theta_x - \theta_z)}{N \cdot R_{ef} \cdot (T_{kf} + T_{py} + T'_{py})}} \cdot 10^3$$

$$T_{py} = \frac{1,2}{2\pi} \cdot \left(\ln \frac{4 \cdot 70}{5,6} + (0,55 - 1) \cdot \ln \frac{4 \cdot 70}{28,6} \right) = 0,547 \text{ Km/W}$$

$$d_z = 2 \cdot e^{\frac{4 \cdot 40 \cdot 40 - \pi \cdot 40^2}{2 \cdot 40^2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{40^2 + 40^2}{40^2} + \ln \frac{40}{2}} = 43,5 \text{ cm}$$

$$k_p = \frac{2 \cdot 70}{43,5} + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 70}{43,5} \right)^2 - 1} = 6,21$$

$$T'_{py} = \frac{2,5 - 1,2}{2\pi} \cdot \ln 6,21 = 0,37 \text{ Km/W}$$

$$I = \sqrt{\frac{65 - 20 + \frac{2,5 - 1}{1} \cdot (30 - 20)}{3 \cdot 0,247 \cdot (0,456 + 0,547 + 0,37)}} \cdot 10^3 = 242 \text{ A}$$

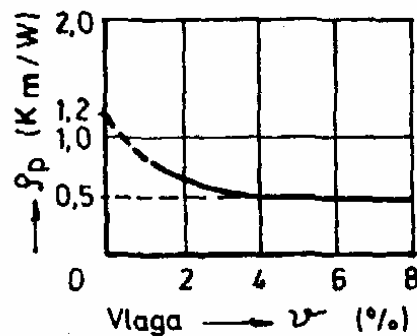
$$d_x = 4h_p \frac{k_x}{k_x^2 - 1}$$

$$k_x = e^{\frac{2\pi \cdot (30-20)}{1 \cdot 0,55 \cdot 3 \cdot 0,247 \cdot 242^2 \cdot 10^{-3}}} = 13,9$$

$$d_x = 4 \cdot 70 \cdot \frac{13,9}{13,9^2 - 1} = 20 \text{ cm}$$

Kako je $d_z = 43,5 > d_x = 20 \text{ cm}$ to nema isušivanja zemljišta zahvaljujući kablovskoj posteljici, pa je potrebno ρ_x zameniti sa ρ_z :

$$T'_{py} = \frac{1-1,2}{2\pi} \cdot \ln 6,21 \approx 0$$



$$I = \sqrt{\frac{\theta_{pd} - \theta_z}{N \cdot R_{ef} \cdot (T_{kf} + T_{py} + T'_{py})}} \cdot 10^3 = \sqrt{\frac{65 - 20}{3 \cdot 0,247 \cdot (0,456 + 0,547)}}$$

$$I = 246 \text{ A}$$

Primenom specijalne posteljice eliminisano je isušivanje zemljišta, te je povećano strujno opterećenje za oko 20 A (vidi primer 17.5. - $I = 226 \text{ A}$).

Primer 17.13. Svi podaci su isti kao i u primeru 17.7. samo što su tri kabla položena u specijalnu posteljicu dimenzija:

$$y \times x = 40 \times 40 \text{ cm}$$

Ostalo je kao u prethodnom primeru.

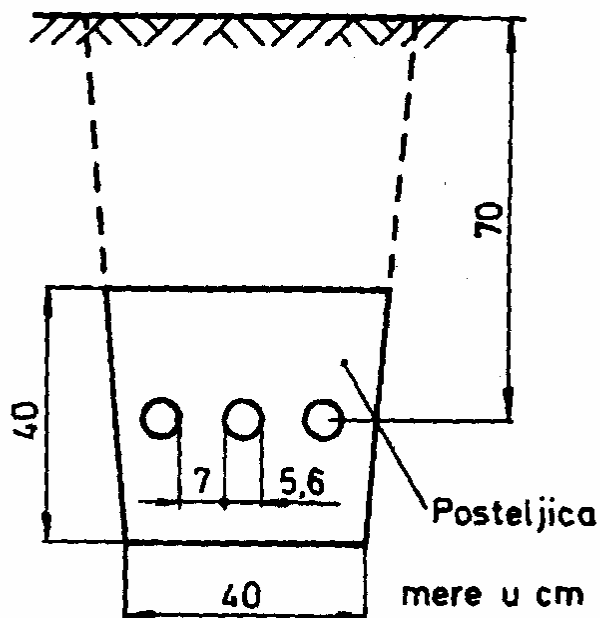
$$\Delta T_{py} = \frac{1,2}{2\pi} \cdot 0,55 \cdot 2 \ln \frac{\sqrt{140^2 + 12,6^2}}{12,6} = 0,504 \text{ Km/W}$$

$$T_{py} = 0,547 \text{ Km/W (iz prethodnog primera)}$$

$$d_z = 2e \left(\frac{4 \cdot 40 \cdot 40 - \pi \cdot 40^2}{2 \cdot 40^2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{40^2 + 40^2}{40^2} + \ln \frac{40}{2} \right) = 43,5 \text{ cm}$$

$$k_p = \frac{2 \cdot 70}{43,5} + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 70}{43,5} \right)^2 - 1} = 6,21$$

Zamenski prečnik obuhvata sva tri kabla.



$$T'_{py} = \frac{2,5 - 1,2}{2\pi} \cdot 3 \ln 6,21 = 1,09 \text{ Km/W}$$

$$I = \sqrt{\frac{65 - 20 + \frac{2,5 - 1}{1} \cdot (45 - 20)}{3 \cdot 0,247 \cdot (0,456 + 0,547 + 0,504 + 1,09)}} = 207 \text{ A}$$

$$k_x = e^{\frac{2\pi \cdot (45 - 20)}{1 \cdot 0,55 \cdot 3 \cdot 0,247 \cdot 207^2 \cdot 10^{-3}}} = 8038$$

$$d_x = 4 \cdot 70 \cdot \frac{8038}{8038^2 - 1} = 0,03 \text{ cm} \approx 0 \text{ cm}$$

Kako je $d_z = 43,5 \text{ cm} > d_x = 0,03 \text{ cm}$ to nema isušivanja zemljišta, pa je potrebno ρ_x zameniti sa ρ_z , a takođe ρ_p sa nižom vrednošću¹⁾ tj. 0,5 Km/W (vidi prethodni primer - sliku):

$$T'_{py} = \frac{1 - 0,5}{2\pi} \cdot 3 \ln 6,21 = 0,436 \text{ Km/W}$$

$$\Delta T'_{py} = \frac{0,5}{2\pi} \cdot 0,55 \cdot 2 \ln \frac{\sqrt{140^2 + 12,6^2}}{12,6} = 0,21 \text{ Km/W}$$

$$T_{py} = \frac{0,5}{2\pi} \cdot \left(\ln \frac{4 \cdot 70}{5,6} + (0,55 - 1) \cdot \ln \frac{4 \cdot 70}{28,6} \right) = 0,228 \text{ Km/W}$$

$$I = \sqrt{\frac{65 - 20}{3 \cdot 0,247 \cdot (0,456 + 0,228 + 0,21 + 0,436)}} \cdot 10^3 = 213 \text{ A}$$

Kablovi bez posteljice imaju dozvoljenu struju od 204 A (primer 17.7.). Ako se želi veća struja treba kablove razmaknuti te smanjiti međusobni toplotni uticaj i povećati masu kablovske posteljice.

¹⁾ Zone isušivanja nema, tj. njome nije obuhvaćena ni posteljica te stoga se uzima $\rho_p = 0,5 \text{ Km/W}$.

18. NUŽNI POGON

Dozvoljeno strujno opterećenje kabla pri nužnom pogonu ili kako se isto naziva havarnim, zasniva se na maksimalno dozvoljenoj temperaturi provodnika koja je veća od maksimalno trajno dozvoljene temperature. Maksimalno dozvoljena temperatura provodnika je u stvari ograničena u trajanju zavisno od vrste izolacije. Ograničenje se običnoražava faktorom starenja izolacije (vidi 7.1.1. STARENJE PAPIRA).

Dozvoljeno strujno opterećenje pri nužnom pogonu dato je izrazom:

$$I_H = I_N \cdot \sqrt{\frac{p^2 \cdot R_1}{R_{\max}} + \frac{R_N}{R_{\max}} \cdot \frac{\left(q - \frac{R_1}{R_N} \cdot p^2 \right)}{\frac{\theta_N(\Delta t)}{\theta_N(\infty)}}} \quad [\text{A}] \quad (18.1.)$$

gde je:

I_N - naznačena struja (A),

R_N - otpor provodnika postignut zagrevanjem strujom I_N na kraju perioda Δt (Ω/km),

Δt - trajanje nužnog pogona (s),

R_{\max} - otpor provodnika postignut zagrevanjem strujom I_H na kraju perioda Δt , a pri temperaturi provodnika θ_{\max} (Ω/km),

$p = I_1/I_N$,

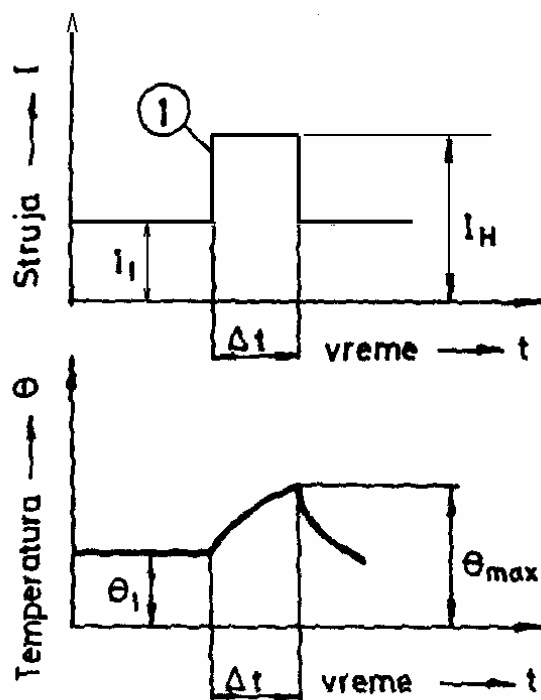
I_1 - stalna struja koja prethodi nužnom pogonu (A),

R_1 - otpor provodnika postignut zagrevanjem strujom I_1 (Ω/km),

$q = \theta_{\max}/\theta_N(\infty)$,

$\theta_N(\infty)$ - temperatura provodnika izazvana strujom I_N u toku dozvoljeno dugog vremena u kome se temperatura može smatrati ustaljenom ($^{\circ}\text{C}$),

$\Delta\theta(\Delta t)$ - porast temperature izazvan primenom "STEP" funkcije amplitude I_H u trajanju Δt (K).



Sl. 18.1: Nužni pogon
 t - "STEP" funkcija trajanja Δt

Zbog obimnosti i relativne složenosti proračun temperature $\theta_N(\Delta t)$ ovdje se ne daje već se korisnik priručnika upućuje na sledeću literaturu:

- IEC 853,
- S.Y. King, N.A. Halfter: *Underground Power Cables*, Longman, London, 1982.,
- B. Lalević, mr M. Tanasković: *Strujna opteretljivost visokonaponskih kablova u nužnom pogonu i koncepcija visokonaponske mreže u gradskom delu konzuma*, "Elektrodistribucija", br. 2, 1993.

Ovaj postupak proračuna važi za vremena:

$$\Delta t > \frac{1}{3} \cdot T \cdot C_T$$

gde je:

- T - ukupni toplotni otpor,
- C_T - ukupni toplotni kapacitet.

Primer 18.1. Proračun dozvoljenog strujnog opterećenja jednožilnog uljnog kabla niskog pritiska $1 \times 500 \text{ mm}^2$, Cu, 110 kV pri nužnom pogonu.

Podaci:

Kabl položen u snopu,

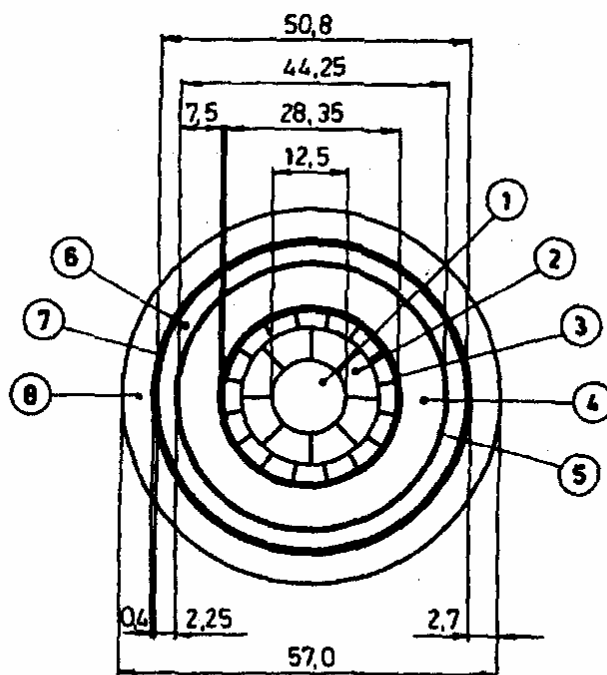
Dubina ukopavanja kabla (osa tri jednožična kabla): $h = 1,3 \text{ m}$,

Olovni omotač uzemljen na oba kraja,

Maksimalna trajno dozvoljena temperatura provodnika: 85° C ,

Maksimalna temperatura provodnika 105° C ,

Specifični toplotni otpor izolacije: 5 Km/W .



**Geometrija jednožilnog uljnog kabla niskog pritiska
 $1 \times 500 \text{ mm}^2$, Cu, 110 kV**

**1 - cev za ulje; 2 - provodnik; 3 - ekran; 4 - dielektrik; 5 - ekran; 6 - olovni omotač;
7 - dve Cu trake; 8 - polietilenski omotač**

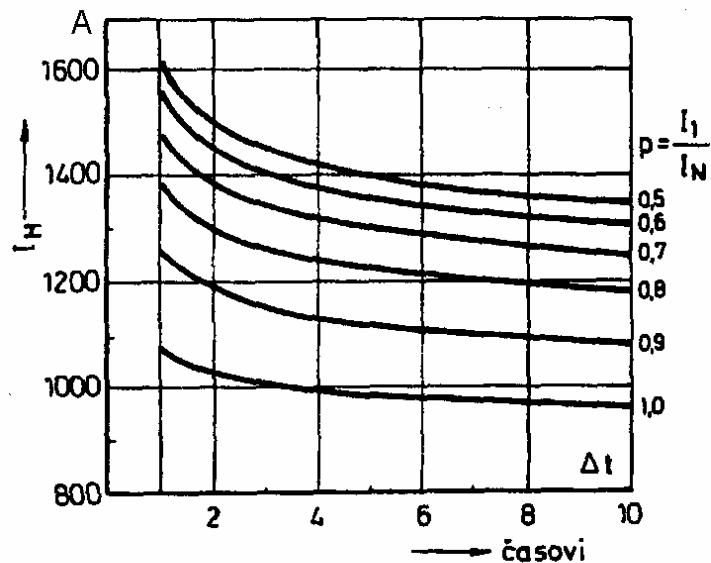
Podaci	Spoljašnji prečnik (mm)	Toplotni otpor (Km/W)	Toplotni kapacitet (J/Km)	Gubici (W/m)
Provodnik	28,35	-	1725,0	22,4
Ulje	12,50	-	187,6	-
Ekran preko provodnika	29,50	0,025	140,0	-
Izolacija	44,25	0,329	1481,7	1,8
Ekran preko izolacije	45,05	0,014	190,0	-
Olovni omotač	50,80	-	497,3	3,4
Spoljašnji omotač (PE)	57,00	0,055	1005,8	-
Ukupno:		0,423	5227,4	27,6

Toplotna vremenska konstanta je:

$$T \cdot C_T = 0,423 \cdot 5227,4 = 0,614 \text{ h}$$

Trajanje procesa toplotnog preopterećenja kabla (nužnog pogona) je:

$$\Delta t > \frac{1}{3} \cdot T \cdot C_T = 0,204 \text{ h}$$



Struja nužnog pogona I_H u zavisnosti od njenog trajanja Δt za odnos prethodnog (I_1) i naznačenog (I_N) strujnog opterećenja

- temperatura zemljišta: $\theta_z = 20^\circ \text{ C}$,
- specifični toplotni otpor zemljišta: $\rho_z = 1,1 \text{ Km/W}$,
- dubina ukopavanja kabla: $h = 1,3 \text{ m}$,
- naznačena struja: $I_N = 669 \text{ A}$

19. TOPLOTNA VREMENSKA KONSTANTA

Pri prolasku stalne struje temperatura provodnika se menja prema obrascu:

$$\theta = \Delta\theta_p \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{k_\theta}}\right) \quad (19.1.)$$

gde je

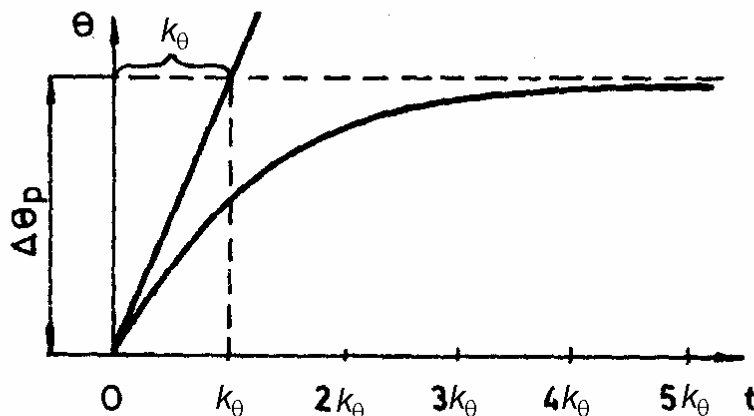
$$\Delta\theta = \theta_p - \theta_a,$$

θ_p - temperatura provodnika,

θ_a - temperatura ambijenta,

t - vreme,

k_θ - toplotna vremenska konstanta.



Sl. 19.1. Temperatura provodnika pri prolasku stalne struje

Tačniji izraz kojim se opisuje ova pojava je redni eksponencijalni izraz za pojedine slojeve kabla. Dati izraz je približan i bolje odgovara za kabl u vazduhu, mada se približno može koristiti i za kabl u zemlji.

Toplotna vremenska konstanta je definisana kao proizvod ukupnog toplotnog otpora i toplotnog kapaciteta:

$$k_\theta = T \cdot C_T \quad (19.2.)$$

Toplotna vremenska konstanta predstavlja vreme, pri čijoj se petostrukojoj vrednosti praktično postiže granična temperatura provodnika.

Ova konstanta je zbog uprošćenog računa manja od stvarne, te se naziva najmanja toplotna vremenska konstanta.

Najmanja toplotna vremenska konstanta može se izračunati i prema izrazu:

$$k_{\theta \min} = \left(\frac{S}{I_N} \right)^2 \cdot \frac{c_v \cdot \vartheta \cdot \Delta\theta_{pn}}{1 + \alpha_{20} \cdot \Delta\theta_{pn}} \quad (19.3.)$$

gde je:

S - presek provodnika (mm²),

I_N - naznačena struja (A),

c_v - specifični toplotni kapacitet provodnika sveden na zapreminu (J/Km³),

ϑ - električna provodnost provodnika (1/Ωm),

α₂₀ - temperaturni koeficijent otpora (1/K),

Δθ_{pn} - dozvoljeni prirast temperature provodnika iznad 30° C (K).

U izrazu za najmanju toplotnu vremensku konstantu uzet je samo toplotni kapacitet provodnika i ukupni toplotni otpor kabla tako da je on pogodan za kratkotrajne režime rada (upuštanje motora i sl.).

Tab. 19.1.

Provodnik	c _v (J/Km ³)	ϑ (1/Ωm)	α ₂₀ (1/K)
Bakar	3,60×10 ⁶	56×10 ⁶	0,0039
Aluminijum	2,48×10 ⁶	34×10 ⁶	0,0040

Vremenske konstante za niskonaponske i sredjenaponske kablove su ispod 1h.

Za tip kabla IPO 13 10kV, najmanja vremenska konstanta se kreće od nekoliko minuta, za male preseke, do pola sata za presek 300 mm².

Vremenska konstanta uljnog kabla niskog pritiska 1×500 mm², 64/110 kV je 1 h 50' ("Pirelli").

20. ZEMLJIŠTE

20.1. TOPLOTNI OTPOR ZEMLJIŠTA

Toplotni otpor zemljišta posmatranog kabla spoljašnjeg prečnika d_k dat je izrazom:

$$T_z = \frac{\rho_z}{2\pi} \cdot \ln \frac{h + \sqrt{h^2 - \frac{d_k^2}{4}}}{\frac{d_k}{2}} \text{ [Km/W]} \quad (20.1.)$$

gde je:

ρ_z - specifični toplotni otpor zemljišta (Km/W),

h - dubina ukopavanja kabla u zemljište (osna dubina) u jedinici kao

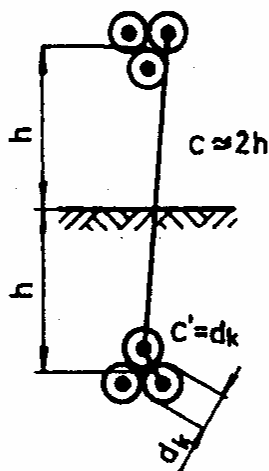
i d_k - spoljašnji prečnik kabla.

Za uobičajene uslove kada je $h \gg d_k$ prethodni prethodni izraz se uprošćava:

$$T_z = \frac{\rho_z}{2\pi} \cdot \ln \frac{4h}{d_k} \text{ [Km/W]} \quad (20.2.)$$

Za tri jednožilna kabla u snopu toplotni otpor zemljišta je:

$$T_z = \frac{\rho_z}{2\pi} \cdot \left(\ln \frac{4h}{d_k} + 2 \ln \frac{2h}{d_k} \right) \text{ [Km/W]} \quad (20.3.)$$

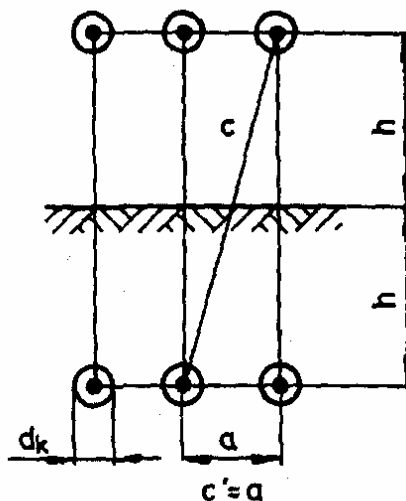


Sl. 20.1. Tri jednožična kabla u snopu

Za tri jednožilna kabla položena u ravni toplotni otpor zemljišta je:

$$T_z = \frac{\rho_z}{2\pi} \cdot \left(\ln \frac{4h}{d_k} + \ln \left(\left(\frac{2h}{a} \right)^2 + 1 \right) \right) [\text{Km/W}] \quad (20.4)$$

gde je a osno rastojanje kablova.



Sl. 20.2. Tri jednožična kabla u ravni

Izrazi 20.3 i 20.4. se dobijaju na osnovu:

$$T_z = \frac{\rho_z}{2\pi} \cdot \ln \frac{c}{c'} [\text{Km/W}] \quad (20.5.)$$

20.2. SPECIFIČNI TOPLOTNI OTPOR ZEMLJIŠTA

Specifični toplotni otpor zemljišta zavisi od:

- hemijskog sastava zemljišta,
- veličina i oblika čestica zemljišta,
- zapreminske gustine zemljišta,
- sadržaja vlage u zemljištu.

Sadržaj kvarca u pesku znatno utiče na smanjenje njegovog specifičnog toplotnog otpora.

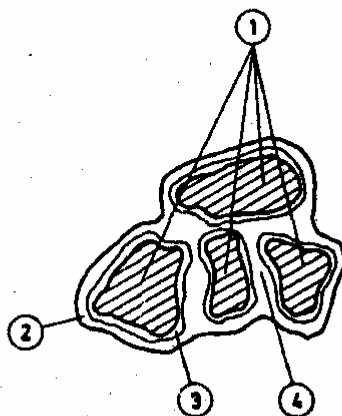
Tab. 20.1. Specifični toplotni otpor i gustina materijala

Materijal	Specifični toplotni otpor (Km/W)	Gustina (u suvom stanju) (kg/m ³)
Zemljište:		
• Normalno suvo,	1,3	1490
• Normalno vlažno,	0,4 - 0,7	1780
• Peskovito suvo,	1,0 - 1,2	1460
• Peskovito vlažno,	0,5 - 0,6	1860
• Glina suva,	1,4	1520
• Glina vlažna,	0,8	1710
• Rečni pesak suv,	3,0	1650
• Rečni pesak normalno vlažan,	0,9 - 1,0	1800
• Rečni pesak zasićen vlagom	0,75	2000
Kvarc	0,11	2640
Granit	0,25 - 0,32	2500 - 3000
Krečnjak	0,78	2500
Peščar	0,54	2200
Šljaka	3,5 - 7,0	300 - 1100
Opeka	1,9	1400 - 1600
Beton	1,2 - 1,3	1800 - 2450
Voda	1,7	1000
Vazduh	40	-
Organski materijali		
• Vlažni,	4	-
• Suvi	7	-

Zemljište ima tri faze:

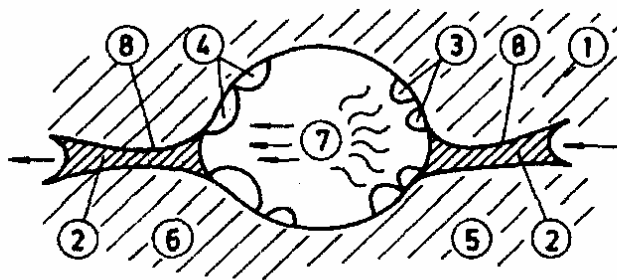
- čvrste čestice,
- vodu i vodenu paru i
- vazduh i druge gasove.

Šupljine u zemljištu ispunjene su vodom, vodenom parom, vazduhom i drugim gasovima. Ovako ispunjene šupljine stvaraju redno-paralelne veze visokog toplotnog otpora. U šupljinama se prenos toplote obavlja konvekcijom i zračenjem.



Sl. 20.3. Slojevi vode u zrnastoj strukturi zemljišta

1 - Finozrnasti delići zemljišta; 2 - Slobodna voda; 3 - Higroskopna voda; 4 - Kapilarna voda



Sl. 20.4. Mehanizam kretanja vode kroz šupljinu u zemljištu

1 - Zemljište; 2 - voda; 3 - Isparavanje vode; 4 - Kondenzovana para;
5 - Toplija strana (do kabla); 6 - Hladnija strana; 7 - Difuzija pare; 8 - Kapilari

Cilj nabijanja zemljišta u kablovskom rovu je da se šupljine smanje i ostvari direktan kontakt između čestica čvrste faze zemljišta. Krupnoća zrna je od velikog uticaja na specifični toplotni otpor. Povoljna je kombinacija više krupnoća zrna.

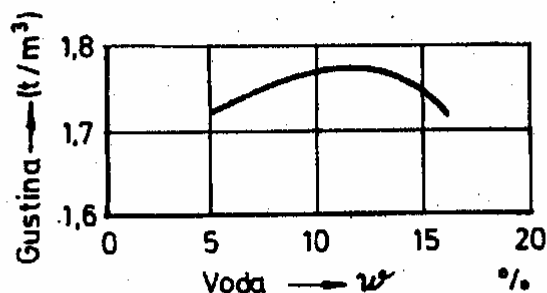
Nemačkim normama DIN 4016 izvršena je podela prema krupnoći čestica:

- Brašnasta struktura
Prečnik čestica od 0,001 do 0,063 mm
(gline, blato, mleveni krečnjak i sl.)
- Peskovita struktura
Prečnik zrna od 0,063 do 2 mm
(pesak i sl.)
- Šljunkovita struktura
Prečnik čestica od 2 do 63 mm
(šljunak)

Kod krupnijih čestica pri manjem sadržaju vode dolazi do prekida konduktivnog prenošenja toplote. Kad je prečnik zrna manji od 0,2 mm počinju u šupljinama da vladaju kapilarne sile. Da bi se postiglo bolje provođenje toplote potrebno je da pore između čestica budu popunjene sitnijim česticama.

Nabijenost materijala - posteljice oko kabla je vrlo značajna za uspešno odvođenje toplote. Mogućnost nabijanja materijala određuje se pomoću PROCTOR uređaja. Pokazuje se, zavisno od materijala, da postoji najpovoljniji sadržaj vlage pri kojoj se postiže njegova najveća sabijenost. Od velikog uticaja na nabijenost je krupnoća čestica. Lako se nabijaju oni materijali koji su slabo vezani tj. ako ne sadrže više od 10% mulja ili gline. Mešavina pesak-šljunak-mulj daje dobre rezultate, jer ne stvara šupljine. Veća sadržina gline ili mulja dovodi do bubrenja i skupljanja materijala zavisno od sadržaja vode i stvaranja šupljina.

Oblik čestica takođe utiče na mogućnost nabijanja. Okruglaste čestice zahtevaju veće nabijanje nego pljosnate čestice (čestice oštrih ivica ne treba koristiti zbog mogućnosti oštećenja spoljašnjeg omotača kablova).



SI. 20. 5. PROCTOR kriva za običan rečni pesak

Ispitivanje pokazuje da kablovsku posteljicu treba nabijati u slojevima od 10 cm (ako se to ručno izvodi) do visine od 30 - 40 cm (ako se izvodi mašinski).

Za ocenu kvaliteta materijala uvodi se nekoliko veličina:

Sadržaj vode:

$$v = \frac{p_v}{p_i}$$

Udeo pora:

$$m = 1 - \frac{p_i}{p_g}$$

gde je:

- p_v - težina vlažnog materijala prema zapremini,
- p_i - težina suvog materijala prema zapremini,
- p_g - težina suvog materijala prema zapremini bez šupljina, (vidi detaljnije DIN 4016).

Kretanje vode u zemljištu može biti:

- izotermičko i
- pod uticajem temperature.

Voda u homogenom zemljištu može teći - kretati se iako je temperatura zemljišta konstanta. Uzrok ovome leži u dejstvu gravitacije, ali više u postojanju kapilarnog potencijala. U peskovitom zemljištu pri malom

sadržaju vode dolazi do njenog prekida, jer voda ne okružuje čestice. Ovaj prekid se teško uspostavlja. Iskustva pokazuju da jedanput isušeno zemljište se vrlo teško vraća u vlažno stanje.

Kretanje vode pod uticajem temperature je znatno brže. Vodena para se kreće u pravcu niže temperature. Međutim, u pojasu zemljišta gde je prethodno bila voda porašće kapilarni potencijal. Ovaj potencijal sad izaziva suprotan tok vode. Pri višim temperaturama ovaj ciklični proces toka vode može biti raskinut.

Isušivanje zemljišta prema metodologiji proračuna strujne opteretljivosti kabla koja je primenjena u VDE 0298, Teil 2 zasniva se na temperaturnoj razlici zavisno od faktora opterećenja (vidi 17.2.1. Uticaj isušivanja zemljišta).

20.3. TEMPERATURA ZEMLJIŠTA

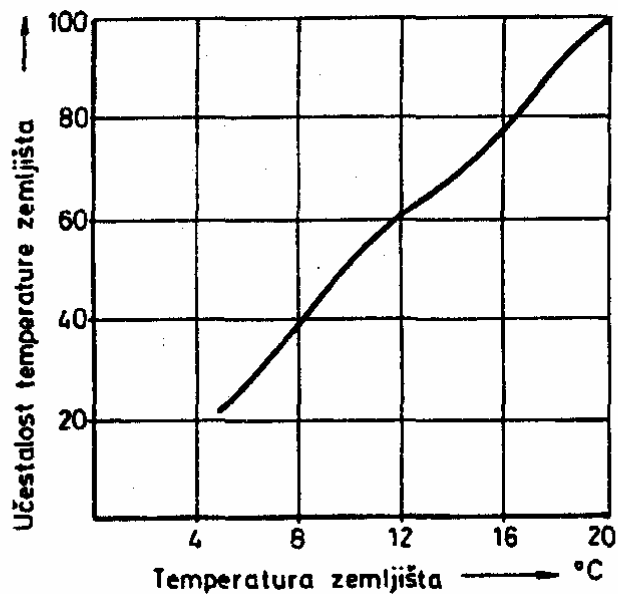
Godišnji hod temperature zemljišta ima približno sinusoidni oblik. Ovaj dinamički sezonski hod ponavlja se iz godine u godinu gotovo identično. Sa dubinom, amplituda tih promena opada. Dnevne promene temperature vazduha praktično ne utiču na temperaturu zemljišta na dubinama većim od 0,3 m. Na dubini uobičajenoj za poćaganje kablova temperatura zemljišta zbog velikog toplotnog kapaciteta zemljišta zaostaje za temperaturom vazduha 15 do 30 dana.

Tab. 20.2. Srednje mesečne temperature (°C) zemljišta i vazduha na teritoriji Beograda

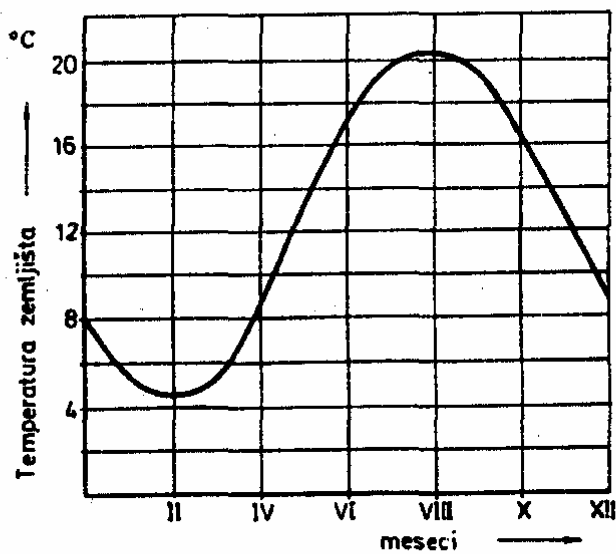
Dubina (cm)	Meseci											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
50	3,0	2,6	5,4	10,4	15,5	19,6	22,6	22,4	19,7	15,0	10,3	5,4
75	4,4	3,5	5,5	9,6	14,2	13,1	21,0	21,5	19,6	15,7	11,5	7,0
Vazduha	-0,3	0,3	6,3	11,8	16,9	20,7	23,0	21,5	17,9	12,7	7,7	1,1

Tab. 20.3. Apsolutne ekstremne temperature (°C) zemljišta na teritoriji Beograda

Dubina (cm)	Ekstremne temperature	Meseci											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
75	max	7,1	7,3	10,5	15,3	19,4	23,6	25,5	25,6	23,9	20,1	15,1	10,5
75	min	1,8	0,6	0,6	1,7	9,2	13,6	17,0	13,3	14,5	11,7	7,4	3,7



Sl. 20.6. Učestalost pojedinih temperatura zemljišta (dubina 75 cm) na području Beograda



Sl. 20.7. Sezonski hod temperature zemljišta na dubini 1 m za teritoriju Beograda tokom 13 godina (1927. - 1940.)

Tab. 20.4. Ekstremne temperature (°C) zemljišta na teritoriji Beograda (period od 10 godina)

Dubina (m)	Ekstremne temperature	Meseci											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1,2	max	9,4	8,3	8,8	13,2	16,1	19,9	22,0	22,9	21,7	19,7	17,1	12,8
1,2	min	3,3	3,1	3,4	4,0	9,6	14,4	17,5	18,8	17,3	13,5	9,3	6,1

Tab. 20.5. Temperature zemljišta u nekim delovima sveta

Zemlja - Kontinent	Temperatura (° C)
Afrika	28
Amerika	20
Australija	25 - 27
Kina	25
Indija	25
Egipat	25
Turska	20
Velika Britanija	15

20.4. KABLOVSKA POSTELJICA

Sa gledišta odvođenja toplote teži se da specifični toplotni otpor posteljice što manje zavisi od sadržaja vode.

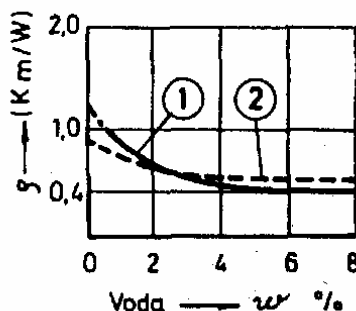
Uglavnom se koriste sledeće kablovske posteljice:

- Mešavina peska i šljunka,
- Mešavina peska i šljunka sa dodatkom mlevenog krečnjaka i
- Mešavina peska i cementa i sl.

U "Elektrodistribuciji - Beograd" za kablovsku posteljicu 110 kV kablova se koristi pesak i šljunak sa visokim sadržajem kvarca (tzv. pesak "Moravac"). Uobičajeno je postalo da se koristi sledeća mešavina:

- prečnik čestica 0 - 4 mm oko 60 - 70%
- prečnik čestica 4 - 8 mm oko 15 - 20%
- prečnik čestica 8 - 16 mm oko 15 - 20%

U Nemačkoj se obično koristi mešavina peska i šljunka 50 : 50, s tim da čestice peska ne budu većeg prečnika od 2,4 mm. Gustina suve mešavine je 1,6 t/m³. Ova mešavina daje bolje rezultate. Uobičajeno je da se mešavina isporučuje sa 10% sadržaja vode.



Sl. 20.8. Specifični toplotni otpor mešavine peska i šljunka u zavisnosti od sadržaja vode

- 1 - Mešavina koja se koristi u "Elektrodistribuciji - Beograd"
 2 - Mešavina koja se koristi u Nemačkoj

Primenom posteljice koja se koristi u "Elektrodistribuciji - Beograd" postignuti su vrlo dobri rezultati (eksperimentalna ispitivanja pokazuju da se s njom može sniziti temperatura kabla za 20 - 30%).

S dodavanjem mlevenog krečnjaka postiču se još bolji rezultati. Mešavina peska, šljunka i mlevenog krečnjaka (pesak : šljunak 42,5 : 42,5% sa 15% mlevenog krečnjaka) daje odlične rezultate (specifični toplotni otpor u suvom stanju 0,7 Km/W).

U Engleskoj je raširena primena kablovske posteljice sa dodatkom cementa. Zapreminski odnos peska i cementa je 14 : 1, a težinski 20 : 1. Težinski odnos vode i cementa 2 : 1.

20.5. MERENJE SPECIFIČNOG TOPLOTNOG OTPORA

Specifični toplotni otpor zemljišta se obavezno meri na trasi visokonaponskih vodova i to obično u vlažnom i suvom periodu. Međutim, samo ovaj podatak je nedovoljan, pa treba izmeriti još i vlažnost i gustinu zemljišta.

Za srednjenaponske i niskonaponske vodove obično se koriste arhivske vrednosti ako ih ima. Za naše područje kao i za srednju Evropu može se uzeti vrednost od 1 Km/W pod pretpostavkom da na trasi kablovskog voda nema šuta, organske truleži, močvara, drveća i sl. Vrednost specifičnog toplotnog otpora mogu podići i susedni toplotni izvori: toplovod i postojeći kablovi.

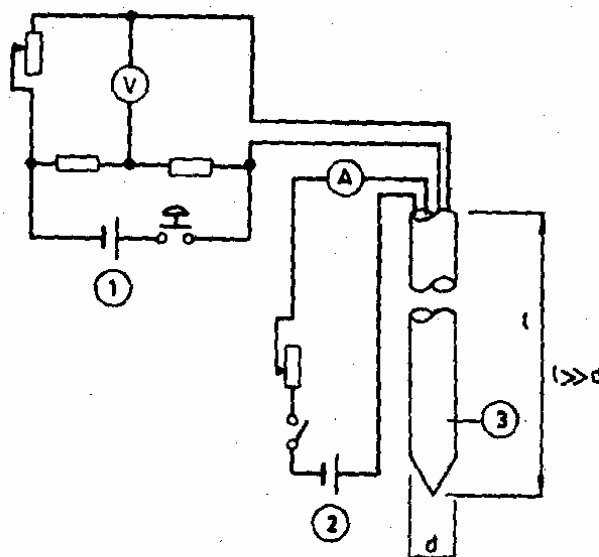
Za merenje specifičnog toplotnog otpora zemljišta koristi se metoda zasnovana na prelaznom toplotnom procesu za razliku od stacionarnih metoda koje su dugotrajne i skupe.

Merenje se zasniva na izrazu:

$$\rho_z = \frac{4\pi \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{Q \cdot \ln \frac{t_2}{t_1}} \quad (20.6.)$$

gde je:

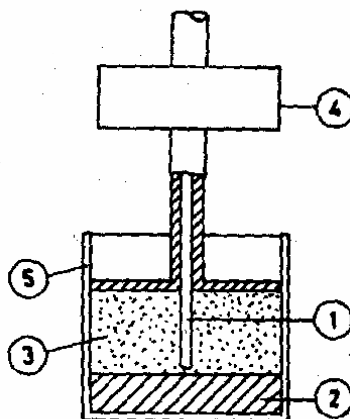
- t_1 i t_2 - vreme na početku i na kraju mernog intervala,
- θ_1 i θ_2 - temperatura zemljišta izmerena sondom na početku i na kraju mernog intervala,
- Q - količina toplote koja se odaje po jedinici dužine merne sonde



Sl. 20.9. Principijelna šema sondažnog instrumenta za merenje specifičnog toplotnog otpora zemljišta

1 - merni most za temperaturu; 2 - električno kolo za grejanje sonde; 3 - sonda

Merenje specifičnog toplotnog otpora uzorka zemljišta i materijala za kablovsku posteljicu obavlja se i u laboratoriji.



Sl. 20.10. Principijelna šema uređaja za laboratorijsko merenje specifičnog toplotnog otpora uzorka

1 - sonda; 2 - izolacija; 3 - uzorak; 4 - teg za sabijanje materijala; 5 - cilindrični uređaji

Na osnovu ovih merenja dobija se promena specifičnog toplotnog otpora uzorka u funkciji sadržaja vode, za razne gustine materijala. Potpuno isušivanje materijala se postiže pri grejanju na oko 105°C . Zavisno od vrste zemljišta (bez šut, mulja, organske truleži i sl.) i njegove gustine njegov specifični toplotni otpor u isušenom stanju se kreće od 1,5 do 3,0 Km/W. Prema nemačkim propisima uzima se 2,5 Km/W (VDE 0289, Teil 2).

22. GUBICI

Električne gubitke u kablju čine:

- Gubici u provodnicima,
- Gubici u metalnim plaštevima,
- Gubici u metalnoj mehaničkoj zaštiti i
- Dielektrični gubici.

22.1. GUBICI U PROVODNICIMA

Podužni gubici u trofaznom sistemu glase:

$$w_{pj} = 3R_{nj} \cdot I \cdot 10^{-3} \text{ [W/m]} \quad (22.1.)$$

gde je:

R_{nj} - električni (naizmjenični) otpor koji se suprotstavlja protoku naizmjenične struje (Ω/km),
 I - struja (A).

Veze između pojedinih otpora provodnika dati su jednačinama (12.1.), (12.2.), (12.3.) i (12.4.).

Neki proizvođači kablova za niskonaponske i srednjenaponske kablove daju ukupne gubitke u provodnicima, metalnim plaštevima i mehaničkoj zaštiti za naznačenu struju, koristeći tzv. efektivni električni otpor provodnika (vidi tabele 12.4. i 12.5.), tj.:

$$w_{uj} = 3R_{efj} \cdot I_N^2 \cdot 10^{-3} \text{ [W/m]} \quad (22.2.)$$

gde je:

w_{uj} - ukupni gubici, bez dielektričnih (W/m),
 R_{efj} - efektivni električni otpor provodnika (Ω/km),
 I_N - naznačena struja (A).

22.2. GUBICI U METALNOM PLAŠTU

Gubitke u metalnom plaštu prouzrokuju:

- Cirkulacione i
- Vihorne struje.

Gubici usled cirkulacionih struja postoje samo kod jednožilnih kablova. Ove struje teku duž metalnog plašta i zatvaraju se preko zemlje. Kad je ovo kolo otvoreno bar na jednom kraju (neuzemljeno) cirkulacionih gubitaka nema. Međutim, na otvorenom kraju može se javiti povišeni napon.

Cirkulacioni gubici su veći ukoliko su kablovi više razmaknuti.

Faktor gubitaka metalnog plašta je:

$$\lambda_0 = \lambda'_0 + \lambda''_0$$

gde je:

λ'_0 - faktor gubitaka metalnog plašta usled cirkulacione struje,

λ''_0 - faktor gubitaka metalnog plašta usled vihornih struja.

U većini slučajeva (plaštevima od nemagnetnih materijala) gubici usled vihornih struja se mogu zanemariti.

Faktor gubitaka predstavlja odnos gubitaka u metalnom plaštu i provodniku (za kablove u snopu):

$$\lambda'_0 = \frac{w_0}{w_p} = \frac{1}{R_p} \cdot \frac{\omega \cdot M_p}{\frac{R_0}{\omega \cdot M_p} + \frac{\omega \cdot M_p}{R_0}} = \frac{R_0}{R_p} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_0}{X_0}\right)^2} \quad (22.3.)$$

gde je:

w_0 - gubici u metalnom plaštu,

w_p - gubici u provodniku,

R_p - električni otpor provodnika,

R_0 - električni otpor metalnog plašta,

M_p - koeficijent međusobne induktivnosti kola provodnika i kola metalnog plašta (vidi sl. 12.3.)

Za specifični električni otpor Cu i Al vidi tab. 6.1.;

Za specifični električni otpor Pb i Al vidi tab. 9.1.

Faktor gubitaka za kablove postavljene u horizontalnoj ravni izračunava se prema:

$$\lambda'_0 = \frac{R_0}{2R_p} \cdot \left(\frac{A^2}{R_0^2 + A^2} + \frac{B^2}{R_0^2 + B^2} \right) \quad (22.4.)$$

gde je:

$$A = \omega \cdot M_A - \frac{\omega \cdot M_B}{3},$$

$$B = \omega \cdot M_A + \omega \cdot M_B,$$

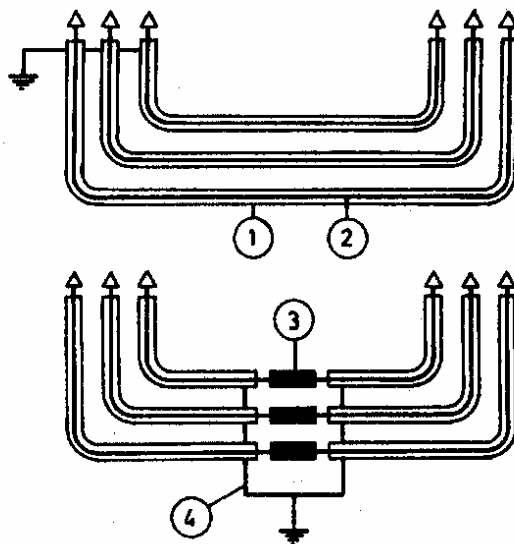
$$M_{13} = 0,138 + 0,2 \cdot \ln \frac{a}{r_{sr}} = M_A + M_B \text{ (međusobna induktivnost}$$

faze 1 i 3),

a - osno rastojanje kablova,

r_{sr} - srednji poluprečnik metalnog plašta.

Za smanjenje cirkulacionih gubitaka se koristi uglavnom transpozicija metalnih omotača tzv. "Crossbonding". Gubici usled cirkulacionih struja mogu se eliminisati ako samo jedan kraj metalnog omotača bude uzemljen. U Nemačkoj postoji raširena praksa da se metalni omotači jednožilnih kablova uzemljuju samo na jednom kraju ako se pri normalnom pogonu ne javlja veći napon prema zemlji od 42 V.



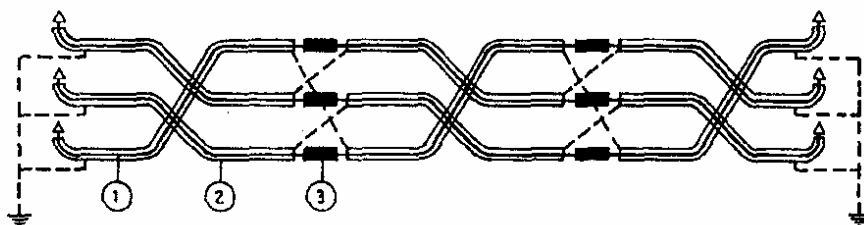
Sl. 22.1. Primeri prekida toka cirkulacione struje uzemljenjem na jednom mestu

1 - metalni plašt; 2 - provodnik; 3 - kablovske spojnice sa prekinutim metalnim plaštom; 4 - uzemljenje.

Ovakav način je zbog visine napona ograničen na dužine od oko 1 km. Znatno viši naponi na metalnom omotaču se mogu javiti pri jedнопolnim kratkim spojevima.

Polaganje u tzv. poretku "deteline" sa gledišta gubitaka je povoljnije, ali se zbog blizine jednožilnih kablova mora računati na međusobno zagrevanje i time na smanjenje strujnog opterećenja. Za veće preseke metalnog omotača i više napona je povoljnije polagati kablove u ravni uz primenu transpozicije metalnih omotača ("Crossbonding").

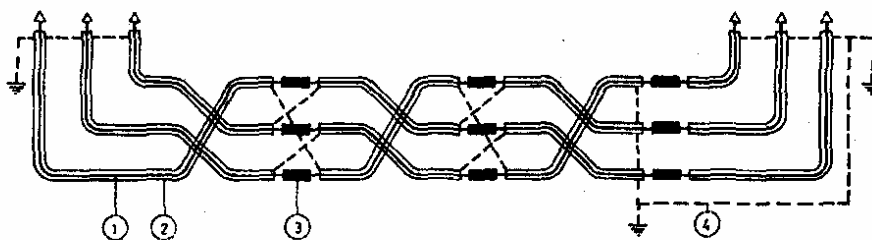
U praksi je gotovo nemoguće da se transpozicijom metalnih omotača postigne poništavanje induktivnih napona. Često deonice nisu istih dužina, a takođe na nekim mestima se mora odstupiti od usvojenog poredka polaganja kablova. Na to vrlo mnogo utiču skućeni prostori i brojne podzemne instalacije.



Sl. 22.2. Transpozicija metalnih omotača ("Crossbonding")

1 - provodnik; 2 - metalni plašt; 3 - kablovske spojnice s prekinutim metalnim plaštovima

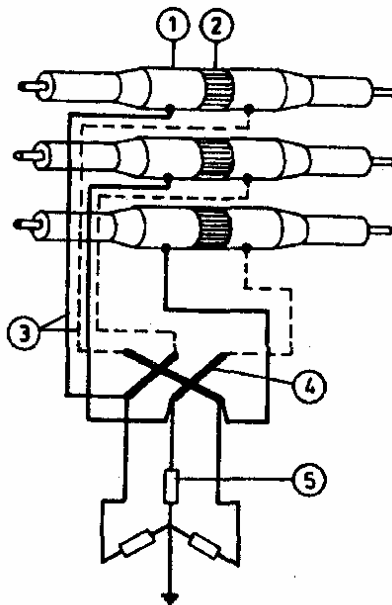
Često broj deonica nije deljiv sa brojem 3 pa se transpozicija metalnih omotača ne može sprovesti dosledno. Jedna deonica onda ostaje netransponovana i uzemljena je samo na jednom kraju.



Sl. 22.3. Delimična transpozicija kablovskog voda

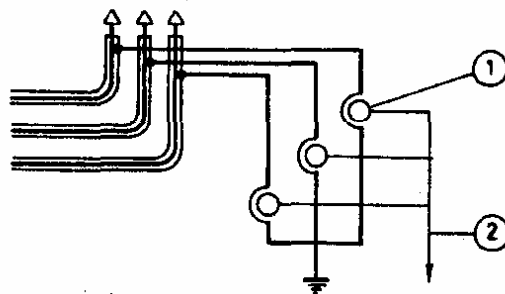
1 - provodnik kabla; 2 - metalni plašt; 3 - kablovska spojnica sa prekinutim metalnim plaštovima; 4 - veza za tok jedнопolne struje kratkog spoja

Pri jedнопolnim kratkim spojevima, atmosferskim pražnjenjima i delovanju prekidača javljaju se prenaponi koji mogu ugroziti spoljašnji izolacioni plašt, te se primenjuju nelinearni otpori čija se vrednost menja, tj. opada pri porastu napona. Da bi se nadzirala ispravnost ovih otpornika u provodnik za uzemljenje metalnog plašta ugrađuju se strujni transformatori.



Sl. 22.4. Priklučenje nelinearnih otpora

1 - kablovske spojnice; 2 - izolacioni umetak u kablovskoj spojnici; 3 - koaksijalni kabl;
4 - kratkospojni mostovi; 5 - nelinearni otpornici



Sl. 22.5. Kontrola struje u metalnom plaštu

1 - strujni transformator; 2 - veza ka mestu nadgledanja

22.3. GUBICI U METALNOJ MEHANIČKOJ ZAŠTITI KABLA

Faktor gubitaka u metalnoj mehaničkoj zaštiti kabla izražava se sa dva faktora gubitka:

$$\lambda_M = \lambda'_M + \lambda''_M \quad (22.5.)$$

gde je:

λ'_M - faktor gubitaka usled histerezisa,
 λ''_M - faktor gubitaka usled vihornih struja.

Ako je metalna zaštita kabla uzemljena na oba kraja onda postoje uopšteno gledano i gubici usled cirkulacione struje, međutim oni se mogu zanemariti.

Gubici usled histerezisa zavise od kvadrata maksimalne indukcije, učestanosti, Schteinmetz-ovog koeficijenta i mase feromagnetnog materijala. U stvari, gubici usled histerezisa su manji ukoliko je petlja histerezisa uža.

Gubici usled vihornih struja srazmerni su kvadratima maksimalne indukcije i debljini feromagnetnog materijala, a obrnuto srazmerni njegovom specifičnom električnom otporu.

Kod trožilnih kablova, gde se obično koristi metalna zaštita od čeličnih traka ili žica, gubici usled magnetisanja se u većini slučajeva mogu zanemariti.

Kod jednožilnih kablova, ako imaju mehaničku zaštitu, ona mora biti nemagnetna pa se gubici u njoj računaju u sklopu gubitaka u metalnom plaštu.

22.4. DIELEKTRIČNI GUBICI

Dielektrični gubici u kablovima za trofazni simetričan sistem dati su izrazom:

$$w_D = U^2 \cdot C_{1p} \cdot \omega \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot 10^{-3} \text{ [W/m]} \quad (22.6.)$$

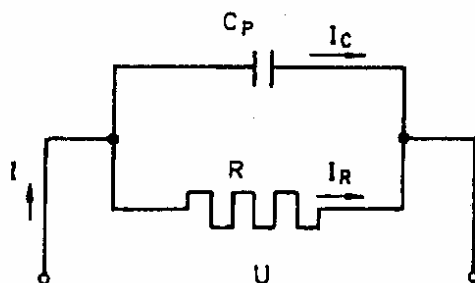
gde je:

U - međufazni napon (kV),

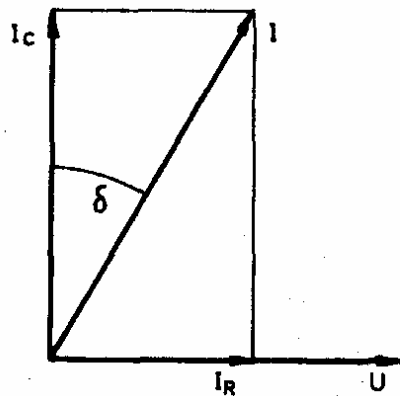
C_{1p} - podužni pogonski kapacitet ($\mu\text{F/km}$),

$\omega = 2\pi \cdot f$,

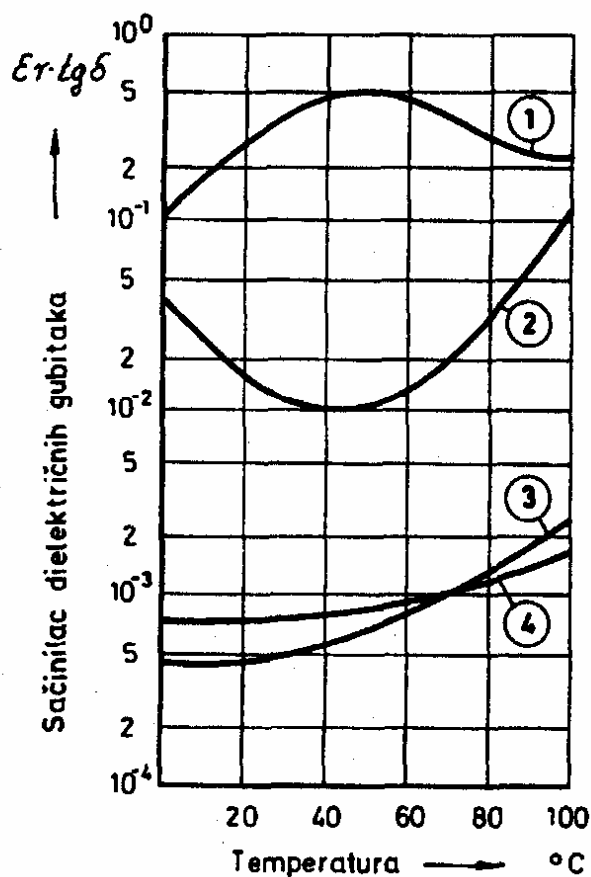
$\operatorname{tg} \delta$ - faktor gubitaka.



Sl. 22.6. Uprošćena električna šema dielektirka



Sl. 22.7. Vektorski dijagram uprošćene šeme dielektrika

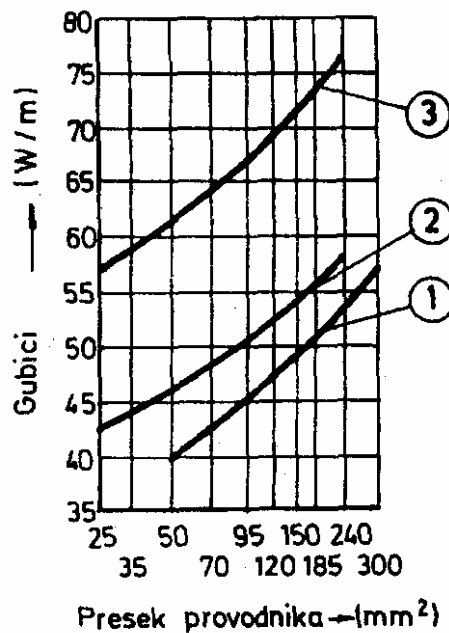


Sl. 22.8. Sačinilac dielektričnih gubitaka u zavisnosti od temperature
1 - PVC; 2 - papir impregnisan u uljnom kompaundu; 3 - PE; 4 - XPE

Dielektrični gubici do zaključno sa 110 kV mogu se zanemariti, izuzev za PVC izolaciju, mada se ona uglavnom ne koristi za napone više od 6 kV.

Kabl XHP 48-A $1 \times 800/95 \text{ mm}^2$, 64/110 kV položen u snopu ima sledeće gubitke:

- u dielektriku: $\approx 1 \text{ W/m}$,
 - u provodnicima: $\approx 80 \text{ W/m}$,
 - u el. zaštiti: $\approx 18 \text{ W/m}$
- UKUPNO $\approx 99 \text{ W/m}$

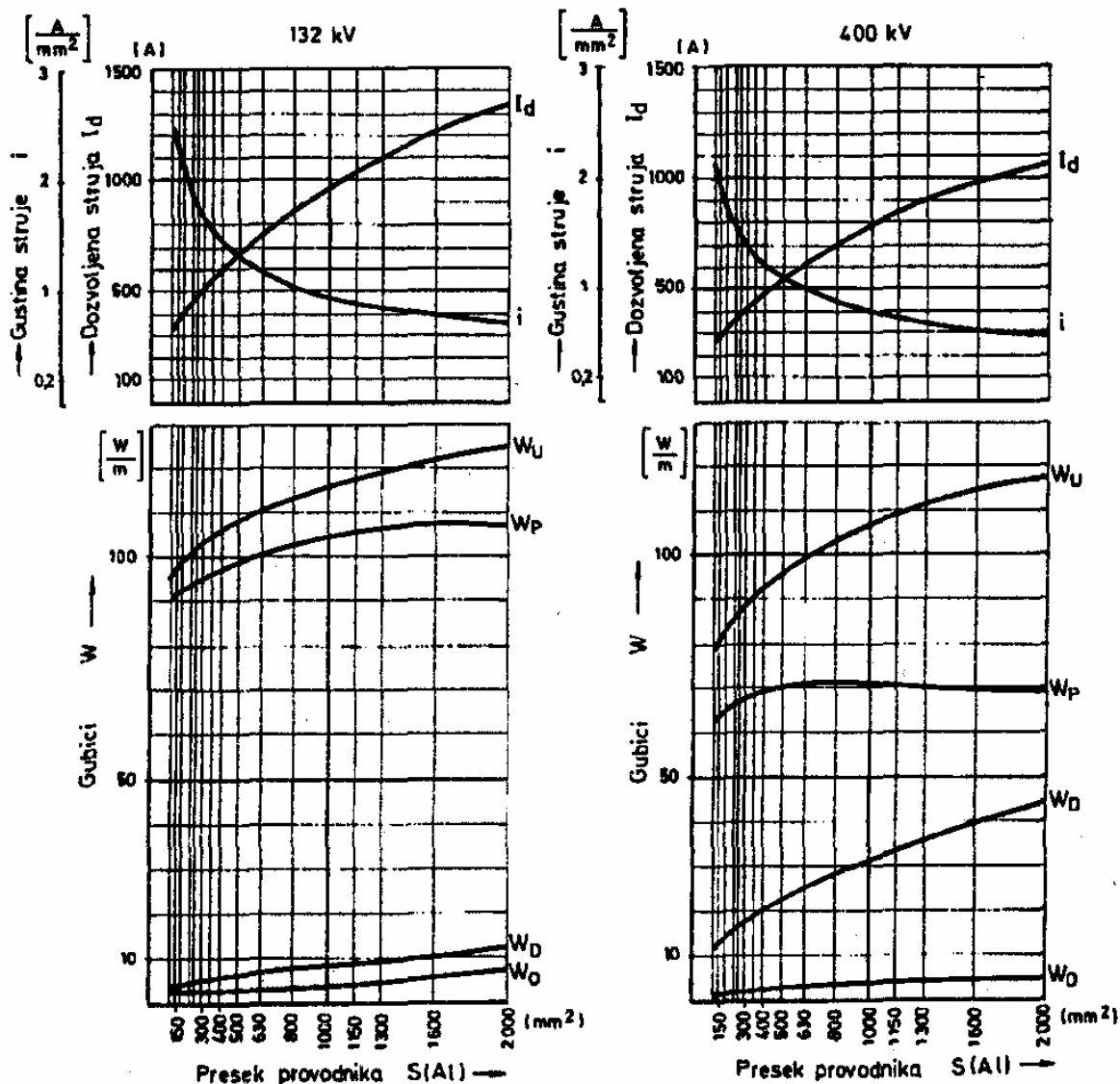


Sl. 22.9. Strujno¹⁾ zavisni gubici kablova položenih u zemljište²⁾

- 1 - IPO 13-A 3x..., 6/10 kV ($\theta_p = 65^\circ \text{ C}$),
- 2 - PP 00-A 3x...+..., 0,6/1 kV ($\theta_p = 70^\circ \text{ C}$)
- 3 - XP 00-A 3x...+..., 0,6/1 kV ($\theta_p = 90^\circ \text{ C}$).

¹⁾ U stvari to su i ukupni gubici, jer su dielektrični zanemarljivi.

²⁾ Gubici kablova položenih u vazduhu se razlikuju, jer su i naznačene struje različite.



Sl. 22.10. Trofazni gubici (w), dozvoljena strujna opterećenja (I_d), gustina struje (i) u zavisnosti od preseka Al provodnika za uljni kabl niskog pritiska, napona 132 i 400 kV,

w_o - gubici u metalnim omotačima (Pb); w_d - dielektrični gubici;

w_p - gubici u provodnicima; w_u - ukupni gubici,

Kablovi položeni u ravni (osno rastojanje 150 mm);

Temperatura zemljišta 10°C ;

Specifični toplotni otpor zemljišta 1 Km/W ;

Metalni omotači transponovani ("Crossbonding")

23. POLAGANJE KABLOVA

23.1. DOZVOLJENI POLUPREČNICI SAVIJANJA KABLOVA

Da ne bi dolazilo pri polaganju kabla do prskanja njegove izolacije pojedinih slojeva propisuju se najmanji dozvoljeni poluprečnici savijanja kabla.

Tab. 23.1. Najmanji dozvoljeni poluprečnici savijanja kablova

Tip kabla	Papirni kabl		PVC ¹⁾ kabl	XPE ¹⁾ kabl
	Sa Pb plaštom ili valovitim Al plaštom	Sa Al glatkim plaštom		
Višežilni kablovi do $U_0/U=0,6/1$ preko $U_0/U=0,6/1$	$15 \times d_k$	$25 \times d_k$	$12 \times d_k$	$10 \times d_k$
Jednožilni kablovi	$25 \times d_k$	$30 \times d_k$	$8 \times (d_p + d_k)$	$7 \times (d_p + d_k)$
			$10 \times (d_p + d_k)$	$9 \times (d_p + d_k)$

d_k - spoljašnji prečnik kabla; d_p - prečnik provodnika.

Kada se koriste oblikovani elementi - šabloni, na primer pred kablovskim glavama, onda su dozvoljeni manji poluprečnici savijanja - 70% vrednosti datih u tabeli 23.1.

Poluprečnik savijanja kabla pred kablovskim glavom može biti još manji ako se izvodi na oko $+30^\circ \text{C}$ i pomoću šablona za krivine (50% manji od vrednosti datih u tabeli 23.1.). Međutim, kod mašinskog polaganja zahtevaju se veći poluprečnici krivina (oko 50% veći) od vrednosti datih u tabeli 23.1.

23.2. DOZVOLJENE VISINSKE RAZLIKE NA TRASI KABLOVSKOG VODA

Problem visinske razlike kablovskog voda postoji kod papirnih kablova čiji je dielektrik impregniran u normalnom, tečnom kompaundu. To su kablovi tipa IPO, IPZO i sl. Kad su položeni u kablovskoj trasi sa većim visinskim razlikama kompaund polako odlazi iz viših tačaka u niže.

U tabelama 23.2. i 23.3. date su dozvoljene visinske razlike vertikalno položenih kablova i kablova položenih na strmim deonicama.

¹⁾ Prema podacima "Novkabel"-a, Novi Sad

Tab. 23.2. Dozvoljena visinska razlika vertikalno položenog kabla

Tip kabla	Naznačeni napon U_0/U (kV)	Maksimalno dozvoljena visinska razlika (m)
Papirni kabl (IPO)	do 3,6/6	50
	6/10	15
Kabl sa tri metalna omotača (IPZO)	6/10 do 8,7/15	30
	20/35	15

Tab. 23.3. Dozvoljeni pad na strmoj trasi kablovskog voda

Naznačeni napon U_0/U (kV)	Dozvoljeni pad (%)	
	Bez ograničenja	Do maksimalne dužine kabl trase od 500 m
0,6/1 do 20/35	4%	10%

Da bi se ova mana papirnih kablova izbegla, umesto običnog kompaunda za impregniranje koristi se tzv. naročiti (polučvrsti) kompaund. Ovi se kablovi prema JUS obeležavaju sa N, NPO, NPZO i sl. Za veće visinske razlike, izlaske na stubove, visoke objekte i sl. najpogodnije je koristiti kablove sa čvrstim dielektrikom: polivinilhloridom, umreženim polietilenom i sl.

23.3. DOZVOLJENE TEMPERATURE POLAGANJA KABLOVA

Zavisno od primenjenog dielektrika i konstrukcije kabla određuje se minimalna temperatura pri kojoj se kabl sme polagati.

Ograničenje kod papirnih kablova je u povećanju viskoziteta kompaunda pri nižim temperaturama. Kompaund koji se nalazi između papirnih traka u uslovima nižih temperatura teže se istiskuje te pri savijanju kabla može cepati papir.

Čvrsti izolacioni materijali takođe imaju ograničenja pri polaganju kablova. Tako PVC ima zadovoljavajuću savitljivost i pri -20°C , dok XPE pri znatno nižoj temperaturi: -40°C . Međutim, zbog sigurnosti ove mogućnosti se ne koriste.

Tab. 23.4. Dozvoljene minimalne temperature polaganja kabla

Vrsta izolacije kabla	Dozvoljena minimalna temperatura polaganja kablova ($^{\circ}\text{C}$)
Papir	+3 (+5) ¹⁾
PVC	+5 (+3) ¹⁾
XPE	-10

¹⁾ Neki proizvođači kablova daju $+5^{\circ}\text{C}$ odnosno $+3^{\circ}\text{C}$.

Kablovi sa izolacijom XPE tipa XHP, pošto je spoljašnji omotač od PVC, imaju ograničenje na +5° C. Međutim, može se proizvesti elastičniji PVC i za niže temperature, čak za -20° C.

Kabl se može polagati ako tokom 24 h pre polaganja kabla temperatura vazduha ne spadne ispod propisane. Kratkovremeni pad temperature tokom 2 - 3 h, npr. pri ponoćnim mrazovima smatra se, na osnovu praktičnih iskustava, da nema uticaja.

Ukoliko je potrebno polagati kabl pri temperaturama vazduha nižim od propisane onda je neophodno kabl zagrevati. Kabl se može zagrevati zavisno od prilika i mogućnosti na nekoliko načina:

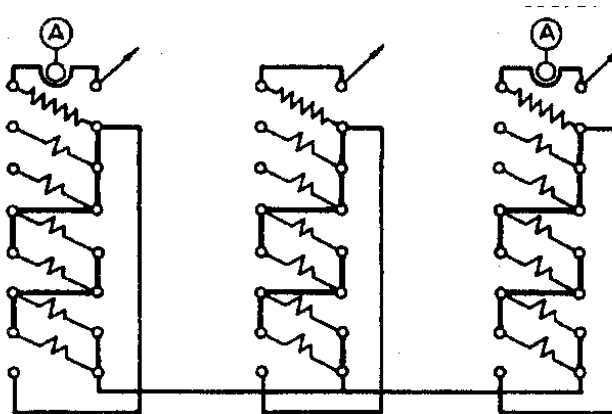
- električnom strujom,
- toplim vazduhom i
- u zagrejanim prostorijama i šatorima.

Za zagrevanje električnom strujom koriste se obično trofazni transformatori. U tabeli 23.5. dati su potrebni naponi za zagrevanje kablova zavisno od preseka provodnika, dužine kabla i temperature vazduha.

Tab. 23.5. Potreban napon i vreme za zagrevanje kablova različitih dužina i temperatura vazduha

Presek provodnika (mm ²)	Približno vreme grejanja (min) pri temperaturi vazduha (° C)			Napon na izvodima transformatora pri raznim dužinama kabla (m)				
	0	-10	-20	100	200	300	400	500
25	71	88	106	16,0	32,0	48,0	64,0	80,0
35	74	93	112	14,0	28,0	42,0	56,0	70,0
50	90	112	134	11,5	23,0	34,5	46,0	57,5
70	97	122	149	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0
95	99	124	151	9,0	18,0	27,0	36,0	45,0
120	111	138	170	8,5	17,0	25,5	34,0	42,5
150	124	150	185	7,5	15,0	22,5	30,0	37,5
185	134	167	208	6,0	12,0	18,0	24,0	30,0
240	152	190	234	5,3	10,6	15,9	21,2	26,5

Kao kontrola strujnog opterećenja koristi se merenje temperature spoljašnjeg reda kabla na bubnju. Zagrevanje kabla treba prekinuti kada temperatura spoljašnjeg omotača kabla dostigne 20° C pri temperaturi vazduha -10° C odnosno 30° C pri temperaturi vazduha od -10 do -25° C.



Sl. 23.1. Transformator za zagrevanje kabla
snaga: 30 kVA; napon primara: 380 V; sekundara 10 - 90 V, 50 - 300 A

Kablovi se mogu grejati u prostorijama ili pod šatorima. U tabeli 23.6. dati su uslovi i potrebno prosečno vreme držanja kabla u prostoriji ili pod šatorom.

Tab. 23.6. Trajanje zagrevanja kabla na bubnju toplim vazduhom

Sredina	Temperatura vazduha (° C)	Trajanje zagrevanja kabla na bubnju ne manje od časova
Šator na jednim kaloriferom sa dva kalorifera	40	18 - 24
	40	12 - 16
Prostorija	od 5 do 10	72
	od 10 do 25	24 - 36
	od 25 do 40	18

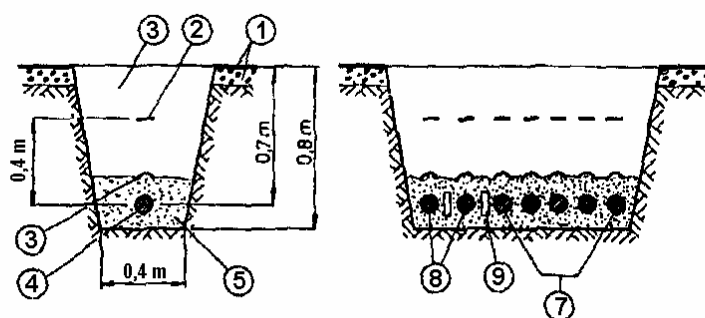
U predelima gde su temperature vazduha izuzetno niske primenjuje se zagrevanje kablova i tokom polaganja kablova.

Prema dokumentu CIGRE Report No. 206, 1964., predviđa se vreme zagrevanja kabla u prostoriji 36 časova ako je kabl namotan na metalni bubanj. Ako je namotan na drveni vreme se udvostručuje.

23.4. POLAGANJE KABLA U ROV

Pre početka kopanja rova za polaganje kablova najpre se prouči (iz tehničke dokumentacije) kablovska trasa, sastav zemljišta i položaj drugih podzemnih instalacija. Ako je potrebno onda se vrše probni iskopi poprečno na kablovsku trasu kako bi se ustanovio tačan položaj drugih instalacija i sastav zemljišta.

Dubina i širina rova zavisi od napona i broja kablova. Za napone od 1 do 10 kV dubina rova je 0,8 m, a za 35 kV je 1,1 m. Za napon 110 kV uobičajena je dubina 1,4 m. Međutim, ona se u praksi često menja zbog prepreka i drugih instalacija. U tom slučaju uobičajeno je kabl polagati na veću dubinu, naravno ukoliko je to ekonomski opravdano. Kablovi se ispod ulica obično polažu u plastične cevi (tzv. "juvidur cevi) ili cevi od betona. Od ovih drugih se sve više odustaje zbog nepraktičnosti. Povoljnije su plastične cevi, jer su glatke, ne smiču se na sastavima što se dešava kod betonskih cevi, a ugradnja im je jednostavnija. Međutim, kablovi se mogu polagati i direktno u kolovoz. Takvo rešenje ima znatne prednosti, jer se smanjuje vučna sila i kabl se ne oštećuje o ivice cevi.



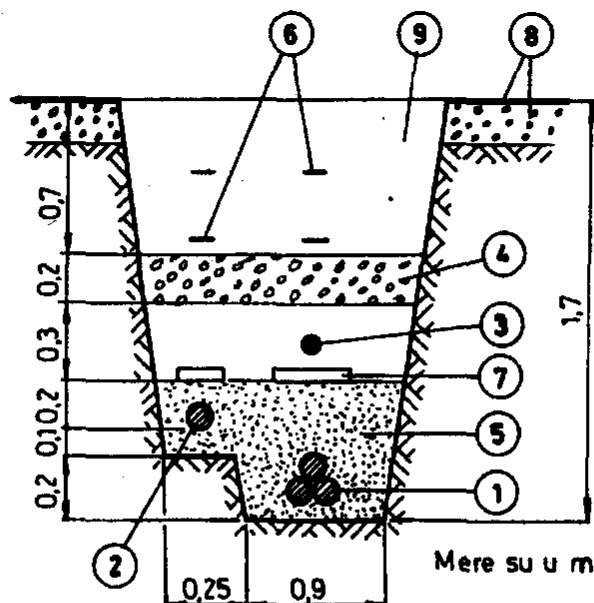
Sl. 23.2. Primer kablova položenih u rov

- 1 - betonsko-asfaltni zastor; 2 - PVC upozoravajuća traka; 3 - plastični štitnik;
- 4 - kabl; 5 - kablovska posteljica; 6 - kablovi 10 kV; 7 - kablovi 1 kV;
- 8 - prvobitno iskopana zemlja; 9 - pregrade između kablova (opreka)

Kablovski rov se zatrpava obično već iskopanom zemljom stim da je sitnozrnasta, bez grumenja, kamenja, organske truleži i sl. Ako je u pitanju isušivanje zemljišta usled velikog broja položenih kablova, ili pak visoke radne temperature kabla (90° C kod kablova sa XPE izolacijom) onda se rov zatrpava specijalnim materijalima mešavinama šljunka i sl. (vidi 20. 4. KABLOVSKA POSTELJICA). Važno je da prilikom zatrpavanja rova ne ostaju šupljine, jer njihovo prisustvo može smanjiti dozvoljenu strujnu opteretljivost kablova za nekoliko desetina procenata.

U tu svrhu treba nabijati rov mašinskim nabijačima. Za relativno suvo zemljište i kablovsku posteljicu od šljunka pogodan je vibracioni nabijač.

Za rov dubine 0,8 m uobičajeno je za normalne uslove zemljišta i vlažnosti da se rov nabija vibracionim nabijačem u dva sloja sa po dva prolaza nabijačem. Pri tome se postiže zadovoljavajuća nabijenost (stepen zbijenosti 90%).



Sl. 23.3. Kablovski rov ispod kolovoza ulice

- 1 - uljni kabl 110 kV; 2 - tzv. "diferencijani" kabl; 3 - signalni kabl (za prenošenje stanja pritiska u uljnom kablju 110 kV); 4 - betonska ploča MB 150; 5 - kablovska posteljica; 6 - PVC upozoravajuća traka; 7 - betonske ploče; 8 - kolovozni zastor; 9 - ispuna rova šljunkom

23.5. POLAGANJE KABLOVA U OBJEKTE

Kablovi se u objekte polažu na zidove, u kanale, na police, nosače i sl. Kablovi sa XPE izolacijom i spoljašnjim omotačem od PE nisu preporučljivi za naseljene objekte, jer PE pomaže gorenje. Kad se jednom zapali PE i dalje gori bez podrške vatre sa strane. Zbog toga se za ovakve slučajeve koristi kabl sa spoljašnjim omotačem od PVC.

PVC se ne smatra gorljivim, ali pri višim temperaturama razvija gasove i dim.

Čist PVC se na oko 150° C raspada uz razvijanje hlorovodonika (HCl) u obliku gasa. Da bi se to sprečilo PVC se dodaju tzv. stabilizatori. Pri nastanku požara kada vladaju temperature od nekoliko stotina celzijusa, proces oslobađanja hlorovodonika se ne može izbeći.

Kod visokih temperatura iz PVC se oslobađa hlorovodonik autokatalitički. U stvari, već oslobođen hlorovodonik pospešuje svoje dalje razvijanje. Hlorovodonik sa vlagom u vazduhu ili sa vodom, ako se njome gasi vatra, stvara hlorovodoničnu (sonu) kiselinu.

Pored nastanka gustog crnog dima i gasova formirana hlorovodonična kiselina ugrožava kontakte i metalne delove opreme objekta. Takođe je ugrožena čelična armatura armiranih betonskih konstrukcija, jer hlorovodonična kiselina može prodrati u beton i do dubine od oko 30 cm. Poznato je da je hlorovodonična kiselina nepovoljna po zdravlje čoveka, pa je pristup u tako ugrožene objekte dozvoljen samo sa gas maskama.

Za ograničenje požara preduzima se više mera:

- uklanja se sa kablova bitumizirana juta,
- na spoljašnje omotače kablova od PVC, PE i sl. nanose se naročiti premazi koji onemogućuju gorenje,
- ulaz kablova u druge prostorije izvodi se kroz specijalno zaptivene otvore kako bi se onemogućilo prenošenje plamena, gasova i dima,
- koriste se specijalni kablovi otporni na plamen.

Da bi se smanjili efekti požara u PVC se dodaju supstance kao što su antimontrioksid ili aluminijumhidroksid. Oni poboljšavaju otpornost PVC na gorenje i širenje plamena. Za ambijente gde se zahteva visoka sigurnost zbog prisustva velikog broja ljudi, kao što je metro, koriste se tzv. mineralni kablovi, bez halogenih elemenata (vidi 5.5.4, KABLOVI OTPORNI PREMA GORENJU).

Požarom su posebno ugroženi vertikalni kanali kroz koje su položeni kablovi (visoki objekti, tornjevi i sl.), pa je upotreba zaptivnih elemenata neophodna.

Ako se kablovi polažu u ravni onda treba paziti da se obujmice ne postavljaju na rastojanju većem od 80 cm. Uobičajeno je da se rastojanje obujmica određuje na osnovu konstrukcije i prečnika kabla. Tako se uzima

- kod kablova bez mehaničke zaštite:
rastojanje obujmica je jednako 20-ostrukum spoljašnjem prečniku kabla
- kod kablova sa mehaničkom zaštitom:
rastojanje obujmica je jednako 30 - 35-ostrukum spoljašnjem prečniku kabla.

Za vertikalno položene kablove rastojanje obujmica ne treba da pređe 1,5 m.

Međutim, kod jednožilnih kablova situacija je drugačija. Ovi kablovi mogu biti izloženi velikim mehaničkim silama pri kratkim spojevima. One zavise od više činilaca:

- temene vrednosti udarne struje kratke veze,
- osnog rastojanja jednožilnih kablova,
- konstrukcije kablova,
- vrste kratke veze (dvopolna ili tropolna).

Za jednožilni kabl od 150 mm^2 , Al, izolovan sa PVC izolacijom i električnom Cu zaštitom 6 mm^2 , za temenu vrednost udarne struje dvopolne kratke veze od 20 kA i rastojanje kablova od 15 cm dobija se rastojanje obujmice od oko 25 cm. Obujmice za jednožilne kablove treba da budu od nemagnetnog materijala da bi se izbeglo dodatno zagrevanje. Mogu se koristiti i obujmice od magnetnih materijala, ali tada magnetno kolo mora biti prekinuto ubacivanjem izolacionih umetaka.

Polaganje kablova u prohodne kanale koristi se u slučajevima kad se kablovi zbog malog slobodnog prostora ne mogu smestiti u zemlju, ili se pak, zbog međusobnog nagomilavanja, ne može obezbediti potrebna prenosna snaga. Takođe se koriste u specijalnim objektima (hotelima, bolnicama i sl.) gde postoje brojne instalacije (vidi 17.5.2. PROHODNI KANALI).

Po pravilu se u prohodne kanale polaže samo jedna vrsta instalacije. Moguće je polagati i druge instalacije zajedno sa energetskim kablovima, kao što su PTT kablovi. Vodovod i kanalizaciju nije poželjno polagati zbog eventualnog prskanja cevi.

U kanalima nije preporučljivo nastavljati kablove zbog mogućeg nastanka požara pri eksploziji kablovske spojnice.

U kanalima treba da postoji dobra prirodna ventilacija. Ako se temperatura vazduha u kanalu ne može održati ispod 30°C onda treba primeniti prinudnu ventilaciju.

Kablovski kanali u elektranama i važnijim objektima opremaju se uređajima za gašenje požara.

23.6. POLAGANJE KABLOVA U KORITA REKA

Kablovi se u korita reka polažu na nekoliko načina:

- polaganje na dno korita reke,
- ukopavanje kabla u dno korita reke,
- ukopavanje plastičnih cevi u dno korita kroz koje se provlače kablovi,
- polaganje kablova u podzemne prohodne galerije.

Direktno polaganje kablova po dnu plovnih reka, iako najjeftinije ne preporučuje se zbog mogućeg oštećenja kabla brodskim lengerima, metalnim delovima koji se valjaju usled jačeg protoka vode reke i sl.

Ukopavanje kablova u rov iskopan na dnu reke ne zadovoljava potpuno tražene uslove: kablovi su zaštićeni od mehaničkog oštećenja, ali zamena oštećenog kabla nije jednostavna, jer zahteva iskopavanje kabla ili polaganje novog kabla.

Cevi su izrađene od polutvrdog ili tvrdog polietilena. One se isporučuju obično u dužinama do oko 500 m, a u njih su uvučena užad (otporna na koroziju) za vuču kablova. Pravilo je da se jedan kabl polaže u jednu cev. Da bi se sprečilo podizanje cevi pri polaganju kablova, one se pre zatrpavanja na više mesta opterećuju betonskim tegovima. Ako je prelaz ugrožen lengerima i sl. trasa kabla se kaldrmiše tako da se ova opasnost isključuje. Na obalama reke obično se izgrađuju vodonepropusni šahtovi, te se time obezbeđuje lak pristup ustima cevi i laka zamena kablova.

Izrada podzemnih prohodnih galerija je najskuplja i po pravilu se sprovodi generalnim rešenjem prelaska reke, kojom prilikom se rešavaju i pitanja saobraćajnice i prelaska drugih instalacija.

Pre polaganja kablova treba snimiti dno reke kao i njegov sastav. Takođe treba utvrditi gornji i donji nivo vodostaja i brzinu vode. Zavisno od broja kablova kojima se premošćuje reka, širine i dubine reke, sastava zemljišta dna reke i sl. donosi se odluka o načinu polaganja kablova tj. izrade kablovskog rova. Pri određivanju mesta prelaska reke kablovima vodi se računa da su udaljena od pristaništa, sidrišta, mostova i sličnih mesta, gde plovni objekti rečnog saobraćaja mogu oštetiti kabl. Dno reke ne bi smelo tokom vremena da menja svoju konfiguraciju, jer se može desiti da kabl bude potkopan.

Razlikuju se dva načina izrade kablovskog rova u dno reke:

- kopanje rova bagerima i
- izrada rova mlazom vode pod pritiskom (tz. ispiranje).

23.7. POLAGANJE KABLOVA PREKO MOSTOVA

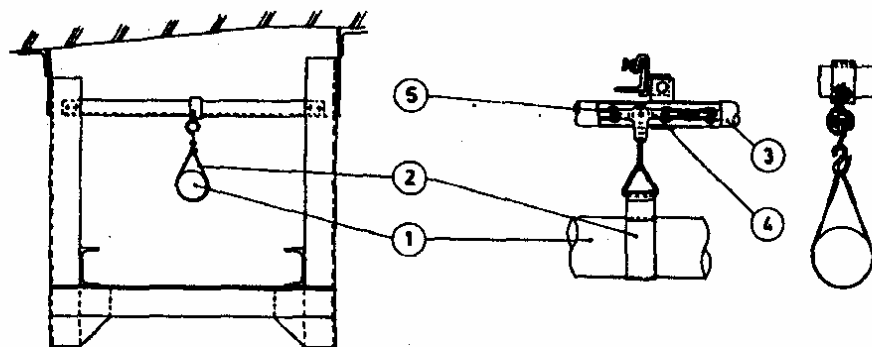
Kablovi položeni preko mostova mogu biti izloženi različitim uticajima: mehaničkim, hemijskim, svetlosnim i toplotnim. Od naročite važnosti za uspešan pogon kablova položenih preko mostova je uticaj vibracija i potresa na olovne plašteve kablova. Pri učestalim vibracijama i potresima kojima su izloženi kablovi položeni preko železničkih mostova dolazi do lomova na olovnim plaštevima kablova. Uticaj intenziteta zaprljanosti vazduha, prisutnog smoga, morske sredine, razvijenog rečnog saobraćaja pod mostom i sl. mogu biti od značaja za životni vek kabela. Korozija metalnog omotača kabela može se u pojedinim okolnostima relativno brzo razvijati. Tako i sunčana radijacija može uticati na vek trajanja zaštitnog spoljnog plašta kabela. Pregrejanje metalne površine mosta u letnjim mesecima mogu zračiti toplotu i pregrevati kablove tako da se njihovi prenosni kapaciteti mogu znatno smanjiti.

Već više od 90 godina u elektrotehnici se koristi olovo kao omotač kablova. Njegova laka obrada i spajanje, savitljivost, plastičnost, vodonepropustljivost, dobra postojanost na različite agresivne sredine učinile su da se i danas uspešno koristi kao omotač kablova a naročito za srednjenaponske kablove. U poređenju sa aluminijumom olovo se može smatrati "plemenitim" metalom. Međutim, olovo ima jednu manu, osetljivo je na vibracije i potrese. Kad je kabl sa olovnim plaštom položen preko mostova, ispod prometnih saobraćajnica, u blizini železničkih koloseka, u blizini pokretnih kranova, na brodovima, kao nadzemni vod ili kao podvodni morski kabl, gde postoji izražen uticaj plime i oseke, na njemu se javljaju naprsline. Naprsline na olovnom omotaču mogu se javiti i pri dužem transportu kablova železničkim saobraćajem. O sastavu i čistoći metala za plašteve vidi: 9.1. METALNI PLAŠTEVI.

Primenom kablova sa sintetičkom izolacijom, na primer kablova sa izolacijom od XPE, problemi vibracija više ne postoje. Ukoliko se želi veća otpornost na mehaničko habanje kabela koristi se mehanička zaštita od čeličnih žica i PE omotača.

Mostovi su izloženi višestrukome naprezanju i pomeranju koja se prenose manje-više na kabl zavisno od načina njegovog postavljanja na most. Ova naprezanja mostova, koja imaju za rezultat njihovo pomeranje, prouzrokuju dva činioca:

- temperatura i
- teret na mostu (vozila i dr.)



Sl. 23.4. Jedno rešenje nošenja kabla na mostu

1 - kabl; 2 - elastični držač kabla; 3 - konstrukcija mosta;
4 - klizač sa nosećom kukom; 5 - lanac vezan za krajeve mosta

Usled dnevnih temperaturnih promena dilatacija mosta može biti od nekoliko santimetara do preko 1 m, što zavisi od dužine mosta, materijala od kog je most izrađen i njegove konstrukcije. Takođe vozila i drugi tereti uzrokuju pored ovih vertikalnih ugiba i horizontalna pomeranja (uvijanje) mosta. Sva ova pomeranja se prenose na kabl koji se tekođe izdužuje usled dejstva temperaturnih razlika. Posebno osetljivo mesto za kablove je dilatacioni deo mosta. Na tom mestu kablovi su izloženi naprezanjima, obično na jednom mestu, što posle višegodišnjeg pogona dovodi do oštećenja kabla. Da kabl ne bi delio sudbinu mosta što se tiče pomeranja - izduženja orbi se nekim rešenjima postavljaju na viseće hvataljke.

U principu kablove ne treba čvrsto vezivati za konstrukciju mosta. Ovo je lako izvodljivo za trožilne kablove, međutim jednožilni se moraju učvrstiti zbog pojave eventualnih pomeranja pri kratkim spojevima.

23.8. SILE PRI POLAGANJU KABLOVA

23.8.1. DOZVOLJENE VUČNE SILE

Dozvoljena vučna sila kabla data je izrazom:

$$F_D = S \cdot \sigma \text{ [N]} \quad (23.1.)$$

gde je:

S - presek elementa kabla koji se napreže pri vuči (mm^2),
 σ - dozvoljeno specifično naprezanje na istezanje materijala koji je izložen vuči (N/mm^2).

Ovaj izraz se uglavnom koristi u slučajevima kada se za vuču kabla koriste njegovi provodnici. Uže za vuču se na provodnike vezuje pomoću tzv. vučne glave ili omče.

Tab. 23.7. Dozvoljena naprezanja Cu, Al, Pb i Č pri vuči kablova

Metal	Dozvoljeno naprezanje na istežanje pri vuči kablova σ (N/mm ²)
Cu	50 - 60
Al	45
tvrdi	25
meki ¹⁾	
Pb	10 - 15
čelična žica	80 - 160

Takođe se za dobijanje dozvoljene vučne sile može koristiti izraz koji je jednak umnošku kvadrata spoljašnjeg prečnika kabla:

$$F_D = K \cdot d_k^2 \quad (23.2.)$$

gde je:

- K - koeficijent (N/mm²),
- d_k - spoljašnji prečnik kabla (mm).

On se koristi kad se kabl vuče tzv. "čarapom".

Kablovi izolovani imoregnisanim papirom

Kod "pojasnih" kablova smatra se da teret vuče "kablovskom čarapom" prihvata olovni plašt ali delom i čelične trake (pri potezanju).

Ispitivanja su pokazala ova konstrukcija može podneti znatno veće sile (prema "Simens"-u) no što dozvoljava Pb plašt.

Tab. 23.8. Dozvoljene vučne sile "čarapom" i za Cu provodnike "pojasnih" kablova (IPO 13 3x..., 6/10 kV)

Presek provodnika (mm ²)	Dozvoljene vučne sile (N)	
	"čarapom"	za provodnik
35	4300	5250
50	4800	7500
70	6000	10500
95	7000	14250
120	7800	18000
150	8750	22500
185	10100	27750
240	11500	36000
300	13000	45000

Napomena: Prema "Simens"-u

¹⁾ Koristi se i za Al plašt

Kod kablova sa Al omotačem situacija je nešto drugačija, jer se sila ne prenosi na unutrašnje slojeve i provodnike kabla pošto je Al omotač dosta krut. Dozvoljeno naprezanje Al omotača se uzima da je 25 N/mm².

Uljni kablovi

Kod jednožilnog uljnog kabla šuplji provodnik služi za vučenje. Ovde je važno da ne dođe do curenja ulja koje je pod pritiskom.

Kod toržilnih uljnih kablova sa valovitim Al plaštom vučna sila se takođe ne prenosi na provodnike, a kabl se zaptiva letovanjem Al plašta na telo "vučne glave".

Kablovi izolovani sintetičkim materijalima

To su kablovi izolovani sa PVC, PE, XPE i EPR i drugim tzv. "čvrstim" dielektricima, preko kojih se sila pritiska lako prenosi na provodnike, jer obično nemaju metalne plašteve i mehaničke zaštite. Stoga je za njih ista dozvoljena vučna sila bilo da se vuku "čarapom" bilo za provodnike.

Tab. 23.9. Dozvoljene vučne sile

Način vuče	Tip kabla	Izraz	Koeficijent
Preko provodnika	Svi tipovi kablova	$F_D = \sigma \cdot \Sigma S$	$\sigma = 50 \text{ N/mm}^2$ (Cu provodnik) $\sigma = 30 \text{ N/mm}^2$ (Al provodnik)
Sa kablovskom "čarapom"	Kablovi izolovani sintetičkim materijalima (PVC, PE, XPE i sl.) bez mehaničke zaštite, npr. PP00, XP00, XHP49 i sl	$F_D = \sigma \cdot \Sigma S$	$\sigma = 50 \text{ N/mm}^2$ (Cu provodnik) $\sigma = 30 \text{ N/mm}^2$ (Al provodnik)
	Kablovi sa mehaničkom zaštitom predviđeni za vuču (čelične žice i sl.)	$F_D = K \cdot d_k^2$	$K = 9 \text{ N/mm}^2$
	Kablovi bez mehaničke zaštite predviđeni za vuču: - kablovi sa jednim metalnim plaštom (I(N)PO 13 i sl.) - kablovi sa tri metalna plašta (I(N)PZO 13 i sl.)	$P_D = K \cdot d_k^2$ $P_D = K \cdot d_k^2$	$K = 3 \text{ N/mm}^2$ $K = 1 \text{ N/mm}^2$

Napomena: ΣS - zbir svih preseka provodnika kabla (mm²); d_k - spoljašnji prečnik kabla (mm)

23.8.2. SILE OTPORA PRI POLAGANJU KABLOVA

Pri polaganju kabla javlja se više sila otpora prouzrokovanih inercijalnim masama i trenjem kabla o osnovu, o cevi, preko koturača i sl. Ti otpori mogu biti:

- na kablovskom bubnju podignutom na držače,
- na pravoj trasi kablovskog voda,
- na krivinama,
- na trasi sa visinskom razlikom,
- kroz cevi i
- na užetu za vuču.

Sili potrebnoj za pokretanje - razmotavanje kabla sa bubnja ne suprotstavlja se samo sila trenja u ležaju bubnja već i moment inercije bubnja. Prema iskustvu ova sila u početku, kad treba savladati inerciju bubnja, može iznositi nekoliko hiljada Njutna, odnosno 5 - 10% težine bubnja sa kablom.

Na pravoj trasi kabla dužine 1 m sila otpora je data izrazom:

$$F_{OT} = k_T \cdot G_j \cdot l \quad (23.3.)$$

gde je:

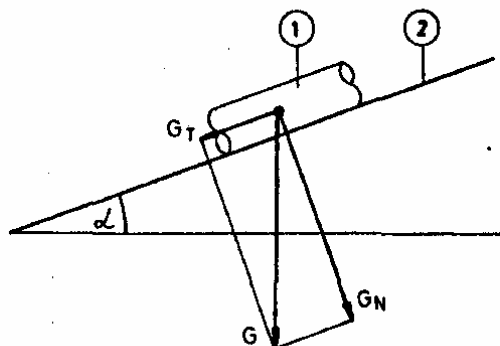
- k_T - koeficijent trenja,
- G_j - težina kabla dužine 1 m (N/m'),
- l - dužina kabla na pravoj trasi (m)

Kod polaganja na trasi pod uglom sila otpora je data izrazom:

$$F_{OT} = k_T \cdot G_N \cdot l \pm G_T \cdot l \quad (23.4.)$$

gde je:

- G_N - normalna projekcija težine kabla na strmu ravan,
- G_T - tangencijalna komponenta težine kabla.



Sl. 23.5. Kabl pod padom
1 - kabl; 2 - strma ravan

Razlikuju se dva koeficijenta trenja: statički i kinetički. Statički koeficijent trenja je proporcionalan odnosu između minimalne vučne sile potrebne za pokretanje predmeta - u ovom slučaju kabla, i sile normalne na posmatranu površinu:

$$F_S = k_{TS} \cdot G_N \quad (23.4.)$$

Kinetički koeficijent trenja je proporcionalan odnosu između minimalne sile potrebne da se kabl održava u kretanju i sile normalne na posmatranu površinu:

$$F_K = k_T \cdot G_N \quad (23.5.)$$

Kinetički koeficijent trenja je manji od statičkog i uopšteno gledano zavisi od brzine. Za brzine od 0,01 m/s do 7 m/s može se smatrati konstantnim.

Tab. 23.10. Koeficijenti trenja za XPE kabl u PVC cevi

Sredstvo za podmazivanje	Koeficijent trenja	
	k_{TS}	k_T
Bez podmazivanja	0,60	0,52
Rastvor polimera (želatinski)	0,44	0,44
Rastvor polimera visokih osobina	0,34	0,34
Talk prašak	0,50	0,42
Sapun	0,52	0,52
Tečni polimer	0,32	0,30
Voštani rastvor	0,21	0,20

Koeficijent trenja kabla pri polaganju preko koturača zavisi od više činilaca: vrste koturača, njenog održavanja i podmazivanja, spoljašnjeg plašta kabla, temperature i sl. Kod kablova tipa IPO 13 i sličnih koji imaju spoljašnji plašt od bituminizirane jute koeficijent trenja može se pod dejstvom temperature povećati 2 i više puta. Sintetički materijali ostvaruju koeficijent trenja oko 0,15. Prema iskustvu, koturače se postavljaju na oko 2 m jedna od druge, što zavisi od prečnika kabla.

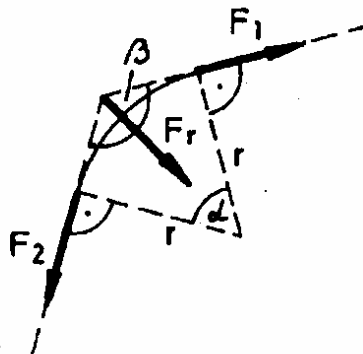
Tab. 23.11. Koeficijent trenja pri polaganju kabla preko koturača

Spoljašnji omotač kabla	Koeficijent trenja
Bitumenizirana juta	0,20 ¹⁾
PVC, PE i sl.	0,15

Krivine u trasi mogu znatno povećati vučnu silu. Kabl je na mestu krivine izložen i radijalnoj sili F_R koja je rezultanta sile na ulasku u krivinu (F_1) i sile na izlasku iz krivine (F_2).

¹⁾ Pri letnjim temperaturama može porasti dva i više puta.

Ona kod nekih konstrukcija kablova može izazvati nedozvoljena naprezanja kao što je uljni kabl sa šupljim provodnikom. Smatra se da ova sila ne treba da pređe vrednost od oko 2000 N po koturači.



Sl. 23.6. Sile u krivini

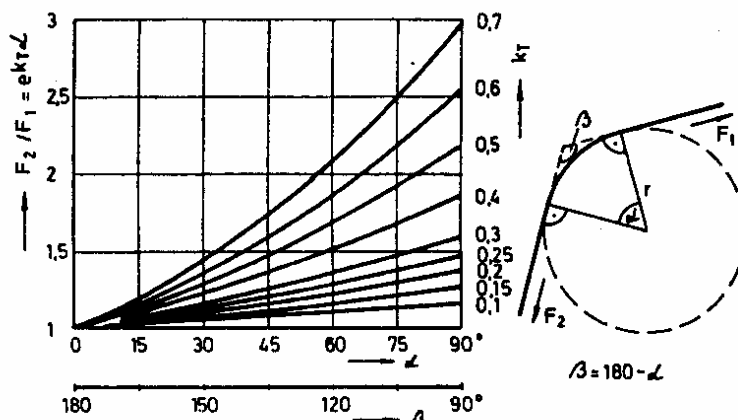
Ova radialna sila deluje pritiskom na kabl i proizvodi silu trenja kabla o koturaču.

Veza između sila F_1 , F_2 i F_r data je izrazima:

$$F_2 = F_1 \cdot e^{k_T \cdot \alpha} \quad (23.6.)$$

$$F_r = F_1 \cdot \frac{e^{k_T \cdot \alpha} - 1}{r} \quad (23.7.)$$

Ugao α se u gornjim izrazima unosi u radijanima. Uže za vuču takođe stvara otpore naročito u krivinama, ali se na pravim deonicama trase kabla zbog male težine može zanemariti.



Sl. 23.7. Prirast sile na izlasku iz krivine u zavisnosti od ugla promene pravca trase (β)

24. MEĐUSOBNI UTICAJI I ODNOSI ENERGETSKIH KABLOVA I DRUGIH PODZEMNIH INSTALACIJA I OBJEKATA

Naši propisi samo delom odeđuju odnose energetskih kablova i drugih podzemnih instalacija i objekata. Uticaji su različiti, u nekim slučajevima toplotni, kakvo je dejstvo toplovoda na kabl, a u nekim električni, što je slučaj induktivnog uticaja energetskog kabla na telekomunikacione kablove i cevovode. U nedostatku nekih propisa ovde su korišćeni iskustveni podaci, kako strani tako i naši. Posmatrani su međusobni odnosi i uticaji energetskih kablova i sledećih podzemnih instalacija i objekata:

- telekomunikacionih kablova (TK),
- jednosmerne električne vuče,
- toplovoda,
- vodovoda,
- naftovoda i gasovoda,
- železničkih pruga,
- puteva i
- drvoreda.

24.1. UTICAJ ELEKTROENERGETSKIH (EE) KABLOVA NA TELEKOMUNIKACIONE (TK) KABLOVE

Indukovana elektromotorna sila u TK-kablu, u slučaju paralelnog vođenja sa EE kablom, iznosi:

$$E_i = \omega \cdot M \cdot I_1 \cdot L \cdot f_{rr} \text{ [V]} \quad (24.1.)$$

gde je:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f,$$

M - koeficijent međusobne induktivnosti (modul) između EE i TK kabla sa povratkom preko zemlje (mH/km),

I_1 - struja zemljospoja (A),

L - dužina deonice približavanja (km),

f_{rr} - rezultatni redukcionni faktor.

Koeficijent međusobne induktivnosti je u opštem slučaju kompleksna veličina čiji ugao zavisi od rastojanja EE i TK kabla i specifičnog električnog otpora zemljišta ρ_E . Pri malim promenama rastojanja (<1:3)

kod paralelnog vođenja može se računati sa apsolutnim iznosom M . Kompleksni izraz za M ima smisla uzimati za veća rastojanja a i promene zemljišta. Dokumentom CCITT¹⁾, 1963. date date su kompleksne vrednosti M .

Struja zemljospoja može biti jednopolna struja kratkog spoja, tj.: struja u električnim mrežama sa direktnim uzemljenjem ili uzemljenjem preko otpora za njeno ograničenje, i struja zemljospoja kod neuzemljenih električnih mreža (prvenstveno dvostruki zemljospoj).

Rezultantni redukциони faktor je:

$$f_{rr} = f_r \cdot f_{rTK} \cdot f_{rX} \quad (24.2.)$$

gde je:

- f_r - redukциони faktor EE kabla (strujni redukциони faktor),
- f_{rTK} - redukциони faktor TK kabla (naponski redukциони faktor),
- f_{rX} - redukциони faktor susednih metalnih instalacija (kompenzacionih provodnika).

Redukциони faktor EE kabla predstavlja meru zaštitnog dejstva metalnog plašta i armature kabla (vidi 12.5. Redukциони faktor).

Redukциони faktor TK kabla sa metalnim omotačem po definiciji predstavlja odnos :

- podužne elektromotorne sile indukovane u provodniku kabla i
- podužne elektromotorne sile indukovane u provodniku kabla, ali kad bi TK kabl bio bez metalnog plašta.

Pri ovome se predpostavlja da je metalni plašt TK kabla uzemljen. Redukциони faktor je samo tada od uticaja, ako je otpor uzemljenja postrojenja, na koji je vezan metalni plašt kabla, niske vrednosti u poređenju sa podužnim otporom metalnog plašta TK kabla. Ovakav slučaj postoji kod dugih deonica, a naročito ako su kablovi sa spoljašnjim slojem od jute, te metalni omotač kabla služi i kao uzemljivač.

Pri uzemljenju plašta kabla na oba kraja, podužni efektivni otpor plašta kabla je:

$$R_{2ef} = \frac{R_2 \cdot L + R_{uz1} + R_{uz2}}{L} \quad (24.3.)$$

¹⁾ CCITT - Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique

gde je:

R_2 - podužni otpor metalnog plašta (Ω/km),

R_{uz1} i R_{uz2} - otpori uzemljenja na oba kraja kabla (Ω),

L - rastojanje između mesta gde je izvršeno uzemljenje (km).

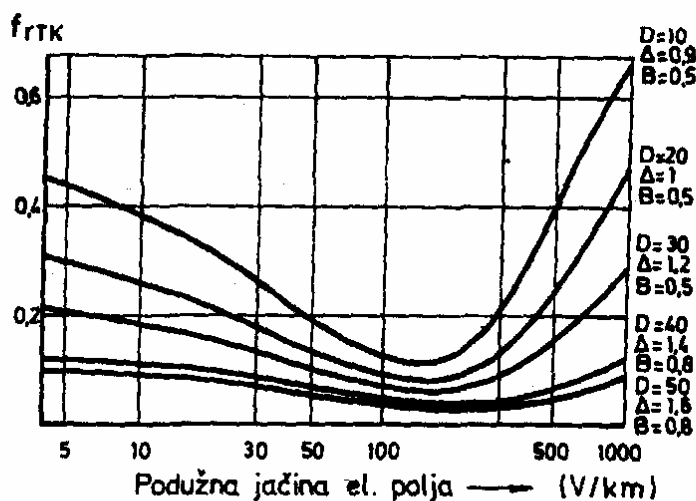
Naponski redukциони faktor ima isti izraz kao i strujni redukциони faktor (bez mehaničke zaštite - magnetne):

$$f_{TK} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{23}^2}} \quad (24.4.)$$

gde je X_{23} podužna reaktansa kola metalni plašt 2 - zemlja 3 (vidi sl. 12.24.).

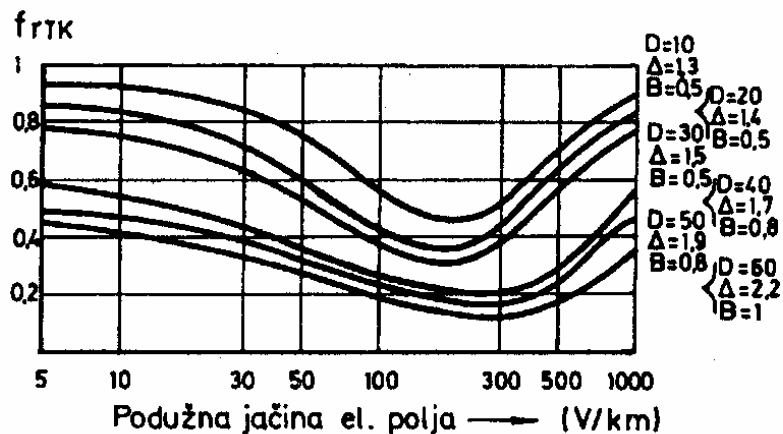
Kod kablova bez mehaničke magnetne zaštite mogu se koristiti vrednosti strujnog redukcionog faktora. Kod kablova sa metalnom (magnetnom) zaštitom redukциони faktor zavisi od podužne jačine električnog polja:

$$E_{ij} = \omega \cdot M \cdot I_1 \cdot f \cdot f_x \quad [\text{V/km}] \quad (24.5.)$$



Sl. 24.1. Naponski redukциони faktor za različite debljine i spoljašnje prečnike olovnog omotača i debljina 2 čelične trake u zavisnosti podužne jačine

D - spoljašnji prečnik kabla,
 Δ - debljina olovnog plašta,
 B - debljina čeličnih traka



Sl. 24.1. Naponski redukциони faktor za različite debljine i spoljašnje prečnike aluminijumskog omotača i debljina 2 čelične trake u zavisnosti podužne jačine el. polja

D - spoljašnji prečnik kabla,
 Δ - debljina olovnog plašta,
 B - debljina čeličnih traka

Kompleksni izraz za redukциони faktor kompenzacionih provodnika glasi:

$$f_{rx} = 1 - \frac{Z_{23} \cdot Z_{13}}{Z_{33} \cdot Z_{12}} \quad (24.6.)$$

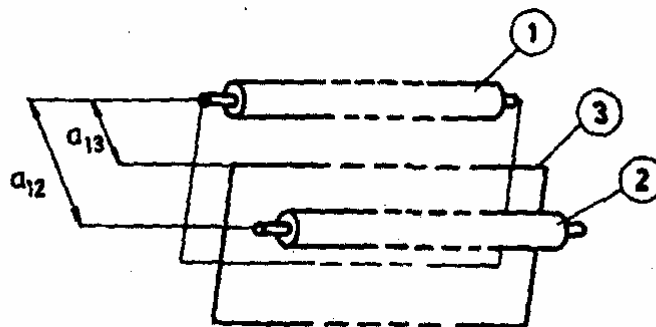
gde je:

Z_{23} - međusobna impedansa TK kabla i kompenzacionog provodnika,

Z_{13} - međusobna impedansa energetskog kabla i kompenzacionog provodnika,

Z_{33} - sopstvena impedansa kompenzacionog provodnika,

Z_{12} - međusobna impedansa između EE i TK kabla.



Sl. 24.3. Uticaj kompenzacionog provodnika
1 - energetska kabl; 2 - TK kabl; 3 - kompenzacioni provodnik

Ako se uzme, što uglavnom zadovoljava:

$$\begin{aligned} Z_{13} &\approx X_{13} \\ Z_{23} &\approx X_{23} \\ Z_{12} &\approx X_{12} \end{aligned}$$

onda se dolazi do uprošćenog izraza za redukcionu faktor kompenzacionih provodnika:

$$f_{rx} = \sqrt{\frac{R_3^2 + \omega^2 \cdot \left(L_3 - \frac{M_{23} \cdot M_{13}}{M_{12}} \right)^2}{R_3^2 + L_3^2 \cdot \omega^2}} \quad (24.7.)$$

gde je:

- R_3 - podužni otpor kompenzacionog provodnika (Ω/km),
- M_{23} - podužni koeficijent međusobne induktivnosti kola 2 i 3 (mH/km),
- M_{13} - podužni koeficijent međusobne induktivnosti kola 1 i 3 (mH/km),
- M_{12} - podužni koeficijent međusobne induktivnosti kola 1 i 2 (mH/km),
- L_3 - podužni sopstveni koeficijent induktivnosti kola 3 (mH/km),
- $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$.

Tab. 24.1. Koeficijent međusobne induktivnosti

Vrsta tla	ρ_E ¹⁾	Rastojanje EE i TK kabla (m)										Koeficijent međusobne induktivnosti (mH/km)									
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	2	3	4	5	10	20	50	100	500	1000
		1,80	1,70	1,65	1,55	1,50	1,40	1,35	1,30	1,25	1,20	1,15	1,10	1,00	0,95	0,85	0,70	0,55	0,38	0,14	0,05
Oranica	50	2,10	2,05	2,00	1,95	1,90	1,85	1,80	1,80	1,80	1,80	1,65	1,60	1,50	1,40	1,20	1,00	0,70	0,55	0,27	
Kamenito	5000																				
Gradsko područje (sa razvijenom strukturom podzemnih metalnih instalacija)	0,025	1,10	0,95	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,60	0,60	0,45	0,35	0,28	0,24	0,12	0,05	0,01	0	0	

¹⁾ Specifični električni otpor zemljišta (Ω/m).

Prema Kabel und Leitungen für Starkstrom - "Siemens", 1969. Međuvrednosti se mogu dobiti interpolacijom.

Našim nacionalnim standardom JUS N.C0.101 (1988.) - *Zaštita telekomunikacionih postrojenja od uticaja elektroenergetskih postrojenja - Zaštita od opasnosti*, date su granične vrednosti induktivnih napona.

Tab. 24.2. Granične vrednosti indukovanih napona pri kratkotrajnom uticaju¹⁾ (JUS N.C0.101)

Elektroenergetski vodovi	Telekomunikacioni vodovi	Efektivne vrednosti graničnih napona (V)
1. Elektrienergetski vodovi nazivnog napona iznad 1 kV, izuzev vodova visoke pogonske sigurnosti ($t \leq 0,5$ s)	Kablovski vodovi	430
	kablovski vodovi čija su el. kola završena razdvojn timer transformatorima	1200 ²⁾
2. Elektrienergetski vodovi visoke pogonske sigurnosti ($t \leq 0,2$ s)	kablovski vodovi	430
	kablovski vodovi čija su el. kola završena razdvojn timer transformatorima	1200 ²⁾

Tab. 24.3. Granične vrednosti indukovanih napona pri trajnom uticaju³⁾ (JUS N.C0.101)

Elektroenergetski vodovi	Telekomunikacioni vodovi	Efektivne vrednosti graničnih napona (V)
1. Elektrienergetski vodovi nazivnog napona iznad 1 kV,	kablovski vodovi koji nisu završeni razdvojn timer transformatorima	65 ⁴⁾
	kablovski vodovi koji su završeni razdvojn timer transformatorima	150

Pri kosom približavanju TK kabla EE kablu može se uzeti za koeficijent međusobne induktivnosti vrednost koja odgovara geometrijskoj sredini dve krajnje tačke kosog približavanja. Tada treba uzeti efektivnu dužinu TK kabla, tj. njegovu projekciju na EE kabl.

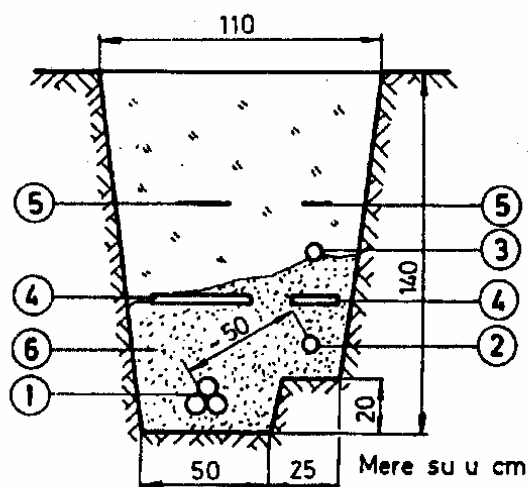
Nemački propisi ovu problematiku regulišu sledećim normama:

- *DIN VDE 0228, Teil 1: VDE - Bestimmungen für Massnahmen bei Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Starkstromanlagen - Allgemeine Grundlagen,*
- *DIN VDE 0228, Teil 2: VDE - Bestimmungen für Massnahmen bei Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Starkstromanlagen - Beeinflussung durch Drehstromanlagen.*

¹⁾ Kratkotrajni uticaj EE kabla čije je delovanje na TK kabl kraće ili jednako 0,2 s, odnosno 0,5 s.
²⁾ Za TK kablove namene isključivo za potrebe elektroprivrede, koji nisu u vezi sa javnom PTT mrežom, dozvoljava se vrednost napona do 60% U_i (ispitni napon TK kabla i kabl. glava, spojnice, razdvojn timer transformatora i sl.).
³⁾ Trajni uticaj EE kabla u nenarušenom pogonu i povremeni uticaj za vreme kvarova u EE mreži koji mogu duže da traju (pri zemljospoju u neuzemljenim i kompenzovanim el. mrežama).
⁴⁾ Ova granična vrednost odnosi se isključivo na zaštitu, a ne na smetnje u sistemu signalizacije.

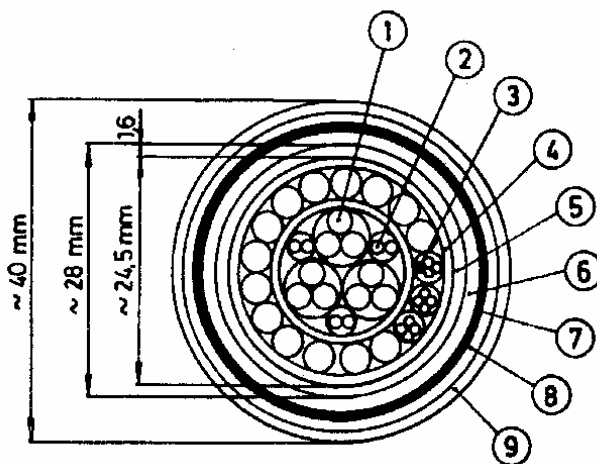
Primer 24.1.

Uporedo sa 110 kV kablom položen je tzv. "diferencijalni" kabl.



Presek rova 110 kV kabla

- 1 - 110 kV uljni kabl niskog pritiska; 2 - TK kabl ("diferencijalni" kabl); 3 - signalni kabl (za prenos stanja pritiska ulja u 110 kV kابلu); 4 - betonske zaštitne poloče;
5 - PVC - upozoravajuće trake; 6 - posteljica kabla



Presek "diferencijalnog" kabla

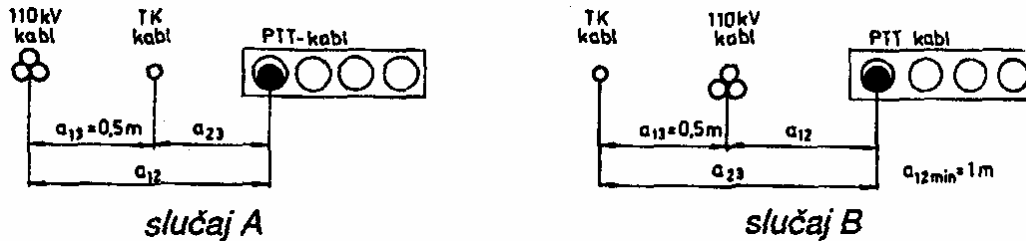
- 1 - trojke za diferencijalnu zaštitu; 2 - telefonske parice; 3 - telefonske četvorke;
4 - pojasna izolacija; 5 - Al plašt; 6 - Pe plašt; 7 - unutrašnja zaštita; 8 - čelična armatura;
9 - spoljašnja antikoroziona zaštita (impregnisana juta)

Redukcioni faktor "diferencijalnog" kabla u opsegu 60-350 V/m je 0,1.

Treba naći redukcioni faktor kompenzacionog "diferencijalnog" TK kabla za razne slučajeve.

Posmatraju se dva slučaja:

A - "diferencijalni" TK kabl se nalazi između 110 kV kabla i PTT kabla,
 B - 110 kV kabl se nalazi između "diferencijalnog" TK kabla i PTT kabla.



Redukcioni faktor kompenzacionog provodnika u kome je uzet u obzir i njegovo uzemljenje (R_z) glasi:

$$f_{TK} = \sqrt{\frac{\left(R_3 + \frac{R_z}{l}\right)^2 + \omega^2 \cdot \left(L_3 - \frac{M_{23} \cdot M_{13}}{M_{12}}\right)^2}{\left(R_3 + \frac{R_z}{l}\right)^2 + L_3^2 \cdot \omega^2}}$$

Podaci:

- slučaj A (TK kabl se nalazi između 110 kV kabla i PTT kabla)
 - $R_z / l = 0,5 \Omega / km$,
 - $a_{12} = 2 m$; $a_{13} = 0,5 m$; $a_{23} = 2 - 0,5 = 1,5 m$,
 - $\rho_E = 0,025 \Omega m$,
 - $M_{23} \approx 0,57 mH / km$ (iz tab. 24.1.),
 - $M_{13} = 0,75 mH / km$ (iz tab. 24.1.),
 - $M_{12} \approx 0,45 mH / km$ (iz tab. 24.1.),
 - L_3 (prema jednačini 12.27.):

$$L_3 = \frac{0,1446}{2\pi \cdot f} \cdot \log \left(\frac{125 \cdot 10^3}{\frac{1}{2} \cdot (12,25 + 10,65)} \cdot \sqrt{0,025} \right) = 1,5 mH / km$$

$$R_3 = 0,028 \cdot \frac{1000}{\pi \cdot (12,25^2 - 10,65^2)} = 0,243 \Omega / km$$

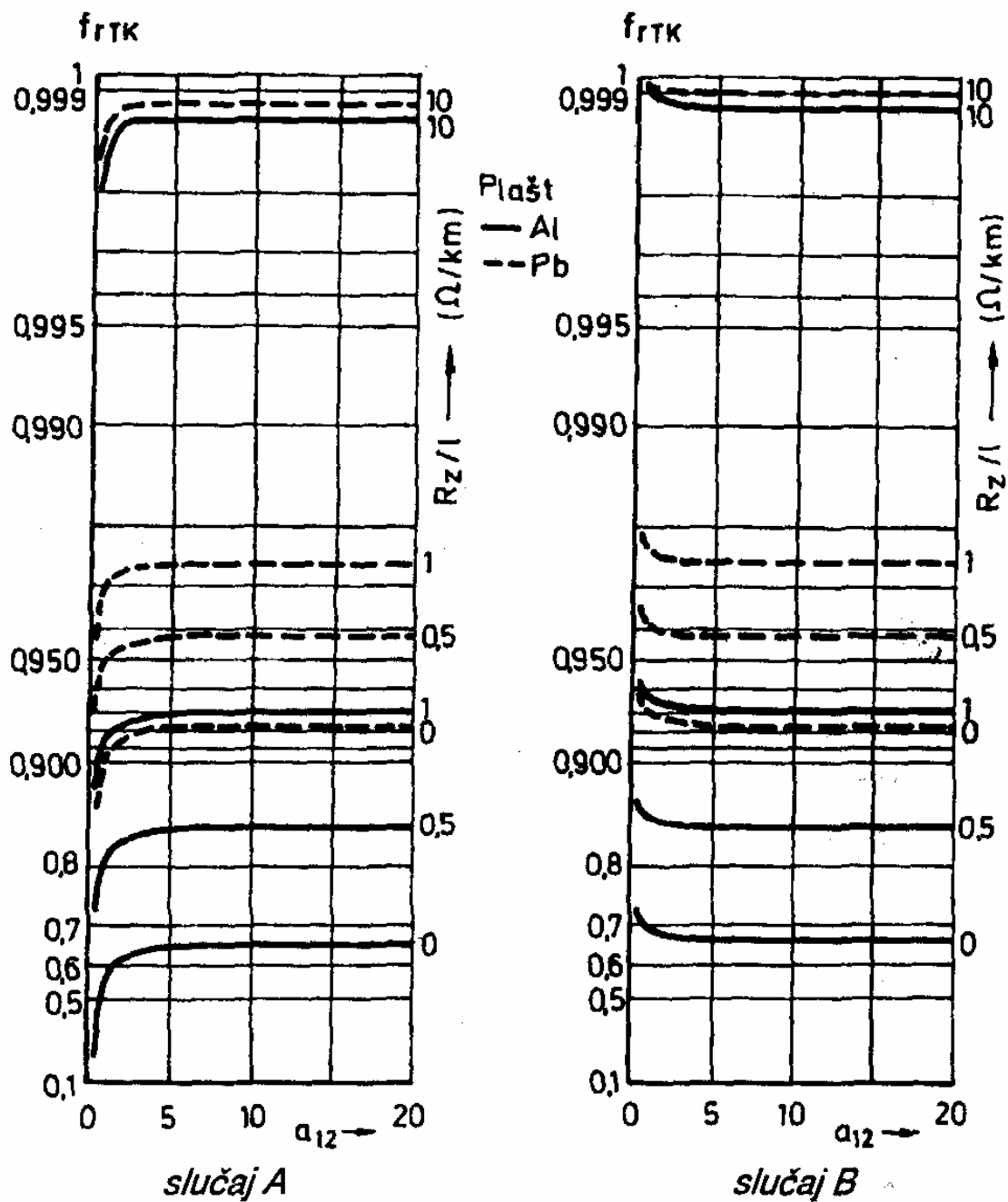
$$f_{rTK} = \sqrt{\frac{\left(R_3 + \frac{R_z}{l}\right)^2 + \omega^2 \cdot \left(L_3 - \frac{M_{23} \cdot M_{13}}{M_{12}}\right)^2}{\left(R_3 + \frac{R_z}{l}\right)^2 + L_3^2 \cdot \omega^2}}$$

$$f_{rTK} = \sqrt{\frac{(0,243 + 0,5)^2 + (2\pi \cdot f)^2 \cdot \left(1,5 \cdot 10^{-3} - \frac{0,57 \cdot 0,75 \cdot 10^{-6}}{0,45 \cdot 10^{-3}}\right)^2}{(0,243 + 0,5)^2 + (1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2\pi \cdot f)^2}}$$

$$f_{rTK} = 0,867$$

U prva dva nomograma date su vrednosti redukcionog faktora TK kompenzacionog voda za razne vrednosti rastojanja (110 kV kabla i PTT kabla) i odnosa R_z/l za dve konstrukcije TK voda (sa Al i Pb plaštom) i za $\rho_E = 0,025 \Omega m$.

U druga dva nomograma uzeto je $\rho_E = 50 \Omega m$.



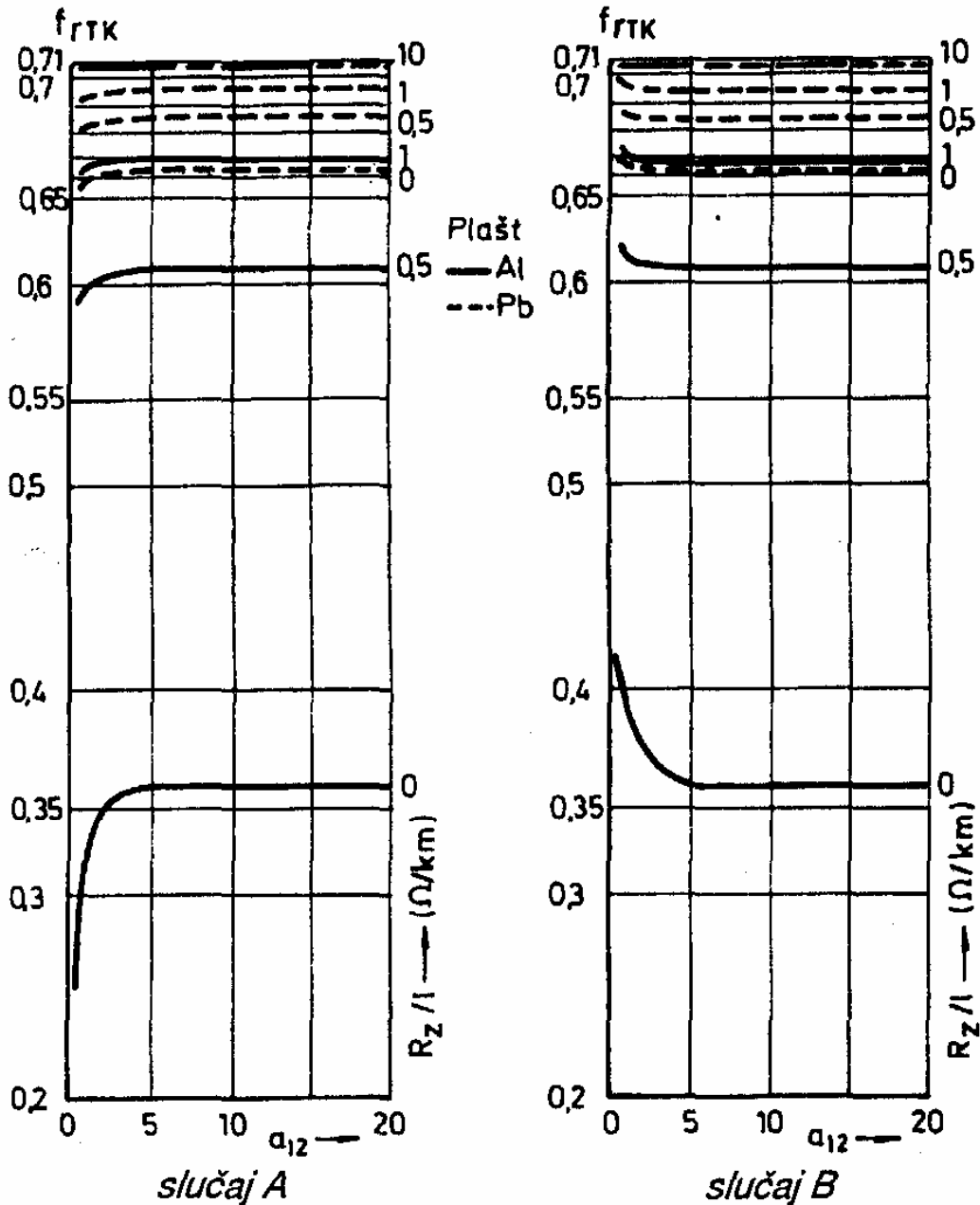
Nomogram redukcionog faktora kompenzacionog kola metalnog omotača diferencijalnog TK kabla u zavisnosti od rastojanja a_{12} i parametra R_z/l

specifični električni otpor zemljišta, $\rho_E = 0,025 \Omega m$,

$a_{13} = 0,5 m = const$,

R_z otpor uzemljenja "diferencijalnog" TK kabla ($R_{z1} + R_{z2}$),

l - dužina paralelnog vođenja



Nomogram redukcionog faktora kompenzacionog kola metalnog omotača diferencijalnog TK kabla u zavisnosti od rastojanja a_{12} i parametra R_z/l

specifični električni otpor zemljišta, $\rho_E = 50 \Omega m$,
 $a_{13} = 0,5 m = const$,
 R_z otpor uzemljenja "diferencijalnog" TK kabla ($R_{z1} + R_{z2}$),
 l - dužina paralelnog vođenja

24.2. UTICAJ JEDNOSMERNE VUČE NA ENERGETSKE KABLOVE

Poznato je da se za tramvajsku vuču u gradovima koristi jednosmerni napon, dok u železničkoj vuči pretežno naizmenični, koji se zatim u lokomotivi pretvara u jednosmerni napon. S obzirom da samo jednosmerna struja razorno deluje na metalne omotače kablova - naročito na olovo, to se ne razmatra uticaj železničke vuče na energetske kablove. Uticaj naizmenične električne vuče na kablove ogleda se u indukovanju povišenih napona u kablovima. Ova problematika pripada oblasti bezbednog rada na kablovima.

Pitanje zaštite energetskih kablova ne mogu se rešavati pojedinačno, a naročito primenom katodne zaštite, jer njome mogu u izvesnim situacijama biti ugrožene druge podzemne instalacije. Stoga je, pri donošenju odluke o primeni načina zaštite kabla od jednosmernih lutajućih struja, neophodno sarađivati sa saobraćajnim preduzećem i drugim vlasnicima podzemnih instalacija (TK vodovi, vodovod, toplovod, ukopane metalne konstrukcije i sl.).

Kako su ova pitanja komplikovana po složenosti i uzajamnim uticajima, uobičajeno je da se mere za ograničenje dejstva lutajućih struja razmatraju grupisane u dva dela:

- mere na električnoj vuči i
- mere na kablovskoj mreži.

Pored ovoga, merenjima se ustanovljava ugroženost kablova lutajućim strujama. Tako se predviđaju sledeća merenja: napona i pada napona na šinama, otpora rasprostiranja koloseka, električnog otpora spojeva šina, izolovanosti povratnog puta, specifičnog električnog otpora zemljišta, gustine izlazne-ulazne lutajuće struje, oblasti lutajućih struja, oblasti zaštite od lutajućih struja i sl.

Našim propisima nisu regulisana pitanja koja se odnose na uticaj lutajućih struja na energetske kablove.

Nemačkim propisima ova materija je regulisana i to u dva dela:

- VDE 0115/3,65 - Odredbe za električnu vuču, VDE 0115a/8,75 - Odredbe za električnu vuču (izmene) i
- VDE -150/8,75 - Odredbe za zaštitu od korozije lutajućih struja jednosmernih postrojenja.

U ovim propisima se ne određuje neophodno rastojanje energetskih kablova od postrojenja jednosmerne vuče, tj. šina sa gledišta uticaja jednosmernih lutajućih struja - što je i logično kad se zna suština ove pojave. Oblast lutajućih struja, u kojoj su ugroženi kablovi zavisi ne samo od razgranatosti šina jednosmerne vuče već i od provodljivosti zemljišta, od otpora donjeg stroja koloseka, od razgranatosti drugih metalnih instalacija pod zemljom i dr. Međutim, nekim drugim uputstvima određuju se ova rastojanja. Tako se daje (Richtlinien für die Kabeltechnik, VDEW) najmanje rastojanje energetskih kablova od delova koji pripadaju električnim tramvajima (šine, stubovi i sl.):

20 cm.

Pri ukrštanju kablova sa šinama jednosmerne vuče predviđa se postavljanje kablova u cevi i kanale, s tim da rastojanje donje ivice šina i cevi - kanala iznosi najmanje:

100 cm.

U bivšem SSSR-u su pitanja rastojanja energetskih kablova i postrojenja jednosmerne vuče regulisana posebnim pravilima. U njima se daje najmanje rastojanje kabla od najbliže šine:

200 cm.

Ovo rastojanje može biti i manje, ali tada kabl treba da je položen u azbestno-cementne cevi koje su natopljene bitumenom. Za ukrštanje kabla i tramvajskog koloseka predviđaju se rastojanja od donjeg stroja pruge:

100 cm.

Ovim pravilima se takođe predviđa minimalno dozvoljeno rastojanje pri paralelnom vođenju energetskog kabla sa železničkim kolosekom jednosmerne električne vuče. Minimalno rastojanje kabla od najbliže šine iznosi:

10 m.

Takođe, i ovde se dozvoljava smanjenje rastojanja pod uslovom da kabl bude položen u azbestno-cementne kanale ili cevi natopljene bitumenom.

KATODNE ZAŠTITE

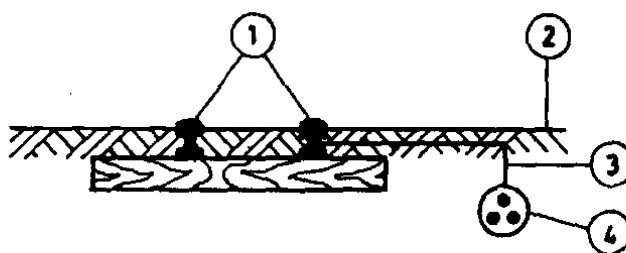
Princip katodne zaštite sastoji se u dovođenju metalnog omotača kabela na dovoljno niski potencijal prema okolini, tako da se spreči izlazak struje iz njega (izuzetak od ovoga je Al koji je korozivno napadnut iako struja ulazi u njega).

Razlikuju se četiri grupe katodne zaštite:

- sa neposrednim odvođenjem lutajućih struja,
- sa usmerenim odvođenjem lutajućih struja,
- sa "usisavanjem" (soutirage) lutajućih struja i
- sa ugrađenom anodom u zemlji.

NEPOSREDNO ODVOĐENJE LUTAJUĆIH STRUJA

Ovaj način katodne zaštite sme se primeniti samo u slučajevima kada se sigurno zna da je priključno mesto na šinama na dovoljno negativnom potencijalu naspram okolnog zemljišta. Takođe, ne sme, pri upotrebi ovog načina katodne zaštite doći do promene polariteta šina i kontaktnog voda, tj. do suprotnog toka jednosmerne struje.

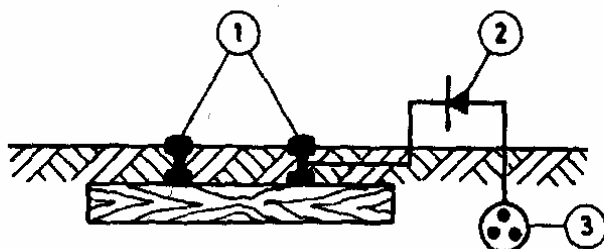


Sl. 24.4. Neposredno odvođenje lutajućih struja

1 - šine; 2 - zemljište; 3 - zaštitni provodnik; 4 - kabl

USMERENO ODVOĐENJE LUTAJUĆIH STRUJA

Ovaj način zaštite kablova dozvoljava veliku slobodu u izboru mesta priključenja kabela na šinu, pošto usmerivač onemogućuje tok struje u suprotnom smeru - od šina ka kابلu.

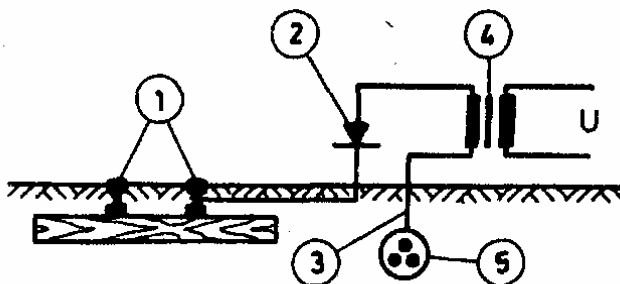


Sl. 24.5. Usmereno odvođenje lutajućih struja

1 - šine; 2 - usmerivač; 3 - kabl

"USISAVANJE" (SOUTIRAGE) LUTAJUĆIH STRUJA

Ovaj sistem zaštite se primenjuje kada prethodna dva načina nisu dovoljna. Jednosmerni izvor struje primorava odvođenje lutajućih struja preko zaštitnog provodnika. Parametri uređaja pri tome, moraju sa gledišta mesnih električnih prilika (potencijala zemljišta, uticaja drugih metalnih podzemnih instalacija, vlažnosti zemljišta i sl.), biti određeni (mesto postavljanja, napon i sl.).

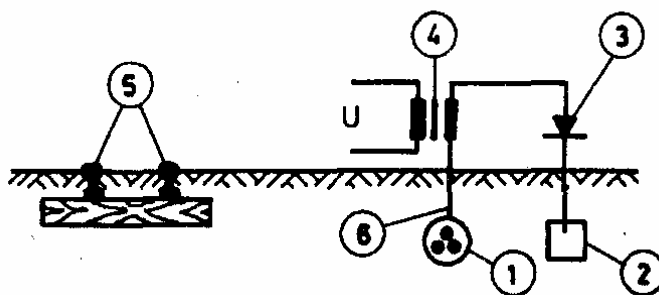


Sl. 24.6. Odvođenje lutajućih struja tzv. "usisavanjem"
1 - šine; 2 - usmerivač; 3 - zaštitni provodnik; 4 - transformator; 5 - kabl;
U - pomoćni naizmenični napon

KATODNA ZAŠTITA SA UGRAĐENOM KATODOM U ZEMLJI

Ova zaštita se koristi u slučajevima kada bi zaštitni provodnik bio nerasazmerno dugačak.

Spojni provodnici i priključna mesta na anodi moraju biti dobro izolovani prema zemlji. Rastojanje anoda jedne od druge i od kabla određuje se od slučaja do slučaja (zavisno od provodnosti zemljišta, područja koje treba štiti, potencijala kabla prema zemlji, rentabilnosti i dr.).



Sl. 24.7. Katodna zaštita sa ugrađenom anodom u zemlji
1 - kabl; 2 - anoda; 3 - usmerivač; 4 - transformator; 5 - šine; 6 - zaštitni provodnik;
U - pomoćni napon

IZOLOVANJE KABLA

Poznata su dva načina izolovanja kablova:

- površinsko izolovanje kablova i
- izolovanje deonice kabla izolacionim mufovima.

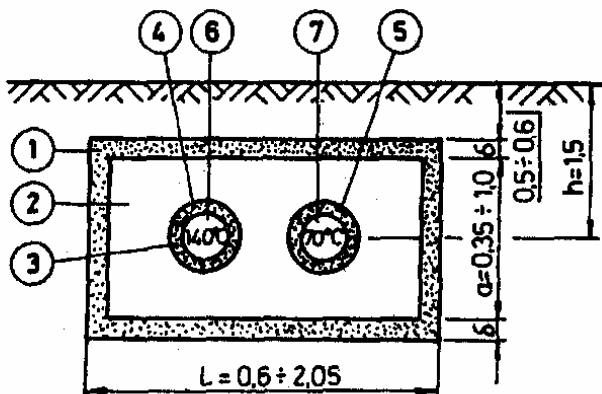
Površinsko izolovanje kablova se primenjuje u slučajevima kad se ne znaju mesta izlaska i ulaska u lutajuće struje.

Ovo je najefikasniji način zaštite ukoliko se ne primene kablovi sa spoljašnjim izolacionim plaštom.

Tok lutajuće struje kroz metalni omotač kabla se ne može ograničiti samo upotrebom izolacionih mufova, koji su izolovani prema zemlji i prema metalnim omotačima obe deonice kabla. Ove mufove treba ugrađivati u zonama između područja ulaznih i izlaznih struja i to na deonicama koje su relativno suve, a po mogućstvu tamo gde zemljište ima veliki električni otpor. Dejstvo ovih izolacionih mufova se povećava ako se kablovi s obe njegove strane u dužini od nekoliko metara izoluju prema zemlji. Kada je u pitanju više kablova položenih jedni pored drugih, onda pored primene izolacionih mufova koji se postavljaju na jednom mestu, treba ispred i iza mufova međusobno vezati metalne plašteve kablova. Ova veza treba da je izolovana. Obično se kod važnijih kablova predviđa mogućnost kontrole - merenja stanja izolovanih mufova. U tom cilju, ako mesto ugradnje mufa nije lako pristupačno, predviđa se na pogodan način izvođenje priključnih provodnika za merenja.

24.3. UTICAJ TOPLOVODA NA KABLOVE

Uticao toplovoda na elektroenergetske kablove se ogleda u povišenju temperature zemljišta koje okružuje kabl. Toplovod najviše zagreva zemljište kad je i vreme najhladnije. Međutim, baš tada je i opterećenje kablova najveće. Temperatura vode u toplovodu pod pritiskom može biti i 140° C. U tom slučaju spoljašnji zid toplovoda može dostići maksimalnu temperaturu od +30° C.



Sl. 24.8. Tipičan toplovod

1 - beton; 2 - vazduh; 3 - čelična cev, obično 600 mm; 4 - staklena vuna;
5 - pocinkovani lim; 6 - dolazni fluid-topla voda; 7 - povratni fluid-rashlađena voda

U nemačkim propisima VDE 0100 ova se problematika tretira i to na sledeć način:

Ukrštanja sa toplovodom	Najmanje dozvoljena rastojanja
• za kabl 1 kV, signalni i merni kabl	30 cm
• za kabl 10 kV ili jedan kabl 30 kV	60 cm
• za više kablova 30 kV ili kablova iznad 60 kV	100 cm

Približavanje toplovodu pri paralelnom polaganju do 5 m dužine	Najmanje dozvoljena rastojanja
• za kabl 1 kV, signalni ili merni	30 cm
• za kabl 10 kV ili jedan kabl 30 kV	60 cm
• za više kablova 30 kV	100 cm

pri paralelnom polaganju preko 5 m dužine	Najmanje dozvoljena rastojanja
• za kabl 1 kV, signalni ili merni	30 cm
• za kabl 10 kV ili jedan kabl 30 kV	70 cm
• za više kablova 30 kV	150 cm

Prema publikacijama na ruskom jeziku propisana rastojanja su nešto veća no što daju nemački propisi. Propisano najmanje približavanje između kablova i toplovoda je 2 m. Ovo rastojanje se određuje pod uslovom da toplovod ne poveća temperaturu zemljišta za više od 5 - 10° C.

Za smanjenje toplotnog uticaja toplovoda na kabl između njih postavi se metalni ekran (metalne cevi, Al profil i sl.) koji će odvoditi prona površini zemljišta toplotu i sa toplovoda i sa kabla.

Za smanjenje toplotnog uticaja koristi se i naročita kablovska postelja kojom se zasipaju i toplovod i kablovi i na taj način poboljšava odvođenje toplote.

U Kopenhagenu su za ograničenje uticaja toplovoda na kablove koristili tzv. toplotne cevi ili kako ih još zovu "termički superprovodnici". Ove toplotne cevi služe za prenošenje toplote s toplijih mesta na hladnija, zahvaljujući tečno-gasnoj fazi rashlađivača koji se nalazi u njima. Na toplom mestu rashlađivač prelazi u gasnu fazu, a na hladnijem u tečnu i to čak pri malim temperaturnim razlikama. Ovaj se način može koristiti za toplotno rasterećenje grupe kablova.

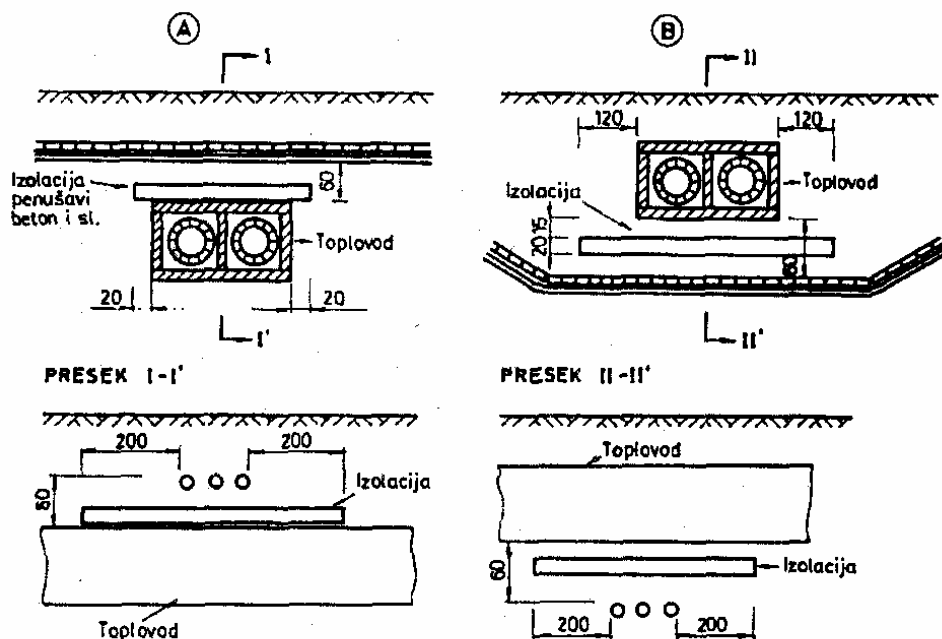
Tab. 24.4. Minimalna rastojanja¹⁾ toplovoda od kablova (praksa u "Elektro distribuciji - Beograd")

Napon kabla (V)	Rastojanje (m)		Napomena
	Paralelno vođenje	Ukrštanje	
1	1	0,6 ²⁾	- ukrštanje po pravilu: kabl iznad toplovoda, - max. uticaj 10-15° C
10 - 35	2	0,6 ²⁾	- ukrštanje po pravilu: kabl iznad toplovoda, - max. uticaj 10-15° C
110	2	1	- ukrštanje po pravilu: kabl iznad toplovoda, - max. uticaj 5° C ³⁾

¹⁾ Pod rastojanjem se podrazumeva razmak između spoljašnje ivice toplovoda i kabla, odnosno cevi u kojoj se nalazi kabl.

²⁾ Za rastojanje <0,6 m obezbediti toplotnu izolaciju od penušavog betona.

³⁾ Dozvoljava se izuzetno 10° C (za međupovezne 110 kV vodove i sl.).



Sl. 24.9. Ukrštanje kablovskog voda (1, 10 i 35 kV)
 slučaj A - slučaj normalnog ukrštanja; slučaj B - slučaj izuzetnog ukrštanja

24.4. VODOVOD

Međusobni položaj energetskih kablova prema vodovodnim cevima određuje se na osnovu čisto fizičkih odnosa, kako bi se mogle obezbediti intervencije - popravke na obema instalacijama.

Uobičajaju se sledeća rastojanja data u tabeli 24.5. Međutim, treba reći da se u gradskim četvrtima sa brojnim podzemnim instalacijama i uzanim prostorima i ulicama sve više odustaje od propisanih mera odgovarajućih preduzeća, jer ih je nemoguće održati. I ovde važi uslov da se energetski kablovi i vodovodne cevi ne smeju voditi paralelno jedne iznad drugih.

Tab. 24.5. Rastojanje energetskih kablova i vodovodnih cevi

Vrsta odnosa	Normalno rastojanje (m)	Izuzetno rastojanje (m)
Paralelno vođenje	0,5 ¹⁾	0,25 ³⁾
	0,3 ²⁾	0,25 ⁴⁾
Ukrštanje	0,5	0,10

¹⁾ Mera koja se propisuje od strane nekih naših preduzeća za vodovod.

²⁾ Nemačka iskustva

³⁾ Prema nekim internim tehničkim propisima.

⁴⁾ Prema nekim internim tehničkim propisima predviđa se uvlačenje kabla u zaštitnu cev, 1 m levo i desno od mesta ukrštanja.

24.5. CEVOVODI

Pod pojmom cevovod podrazumeva se metalna cev izolovana ili neizolovana, koja služi za transport fluida kao i fluida koji sadrže čvrste materijale u obliku zrna, čestica ili granula (nafta, gas, usitnjeni uglj i vodom i sl.).

Ova problematika je regulisana nacionalnim standardom: *JUS N.CO.105 (1986.) - Tehnički uslovi zaštite podzemnih metalnih cevovoda od uticaja elektroenergetskih postrojenja.*

Podzemni cevovod u blizini EE kabla izložen je uticaju usled induktivne sprege. Previsoki indukovani potencijal na cevovodu može prouzrokovati:

- pojavu opasnih napona dodira i
- oštećenje izolacije cevovoda, a takođe i njegovog metalnog zida.

Granična vrednost napona cevovoda i okolnog tla iznosi 1000 V. Ako je visina indukovanog napona manja od vrednosti onda se smatra da ne postoji opasnost od oštećenja izolacije cevovoda.

Najmanje dozvoljeno rastojanje između EE kabla naznačenog napona do 35 kV i cevovoda pri paralelnom vođenju i ukrštanju je 0,5 m. Dozvoljava se i manje rastojanje ako je onemogućeno prenošenje eventualnog luka sa kabla na cevovod.

Na osnovu DIN 1998. od 1970. predviđa se da se gasovod (za transport) polaže u kolovoz.

Prema propisima bivšeg SSSR-a rastojanje pri ukrštanju između kablova i gasovoda odnosno naftovoda određuje se na 0,5 m. Međutim, dozvoljava se i 0,25 m, ali pod uslovom da se kabl položi u azbestno-cementnu ili betonsku cev dužine po 2 m na svaku stranu plus širina ukrštanja. Pri paralelnom vođenju određuje se minimalno rastojanje od 1 m, ali se dozvoljava i 0,25 m pod prethodnim uslovima.

Prema nemačkoj literaturi (Richtlinien für Kabeltechnik, VDEW 1966.) predviđa se rastojanje pri ukrštanju 0,2 m. Ukoliko se ono ne može postići treba primeniti izolacione pregrade (obično tvrdi PVC ili PE). Za paralelno vođenje, u interesu posedovanja dovoljno prostora pri opravkama u montaži, predviđa se rastojanje 0,4 m. Napominje se da razmak 0,2 m ne bi trebalo smanjivati. Ukoliko se ni on ne može održati onda treba primeniti izolacione ploče - pregrade.

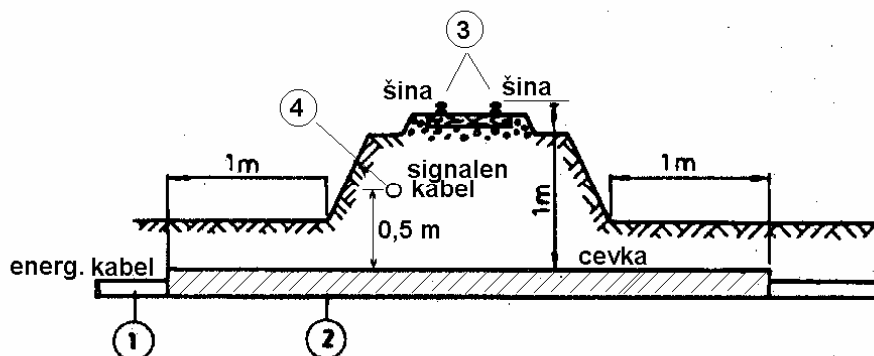
24.6. ŽELEZNIČKA PRUGA

Ukrštanje energetskih kablova sa železničkom prugom bilo je određeno "Službenim listom SFRJ", br. 24/1967 (nadzemni vodovi). Po pravilu ugao ukrštanja treba da je 90° , i ne manji od 45° . Uz posebnu saglasnost moguće je ukrštanje izvesti i pod uglom od 30° . Prolaz kablova ispod železničke pruge se izvodi u zaštitnim cevima čiji su krajevi van zone železničke pruge, tako da pri raskopavanju ne dolazi do ugrožavanja stabilnosti temelja donjeg stroja železničke pruge.

Vertikalno rastojanje između kablova i gornje ivice železničkih šina ne sme biti manji od 1 m.

Međutim, novim propisom iz ove oblasti izbačen je ovaj deo o ukrštanju sa železničkom prugom.

U slučaju da se radi o elektrificiranim prugama onda nije dozvoljeno polagati kablove (pri ukrštanju) u metalne cevi.



Sl. 24.10. Primer ukrštanja energetskog kablova sa železničkom prugom
1 - energetski kabl; 2 - zaštitna PVC cev; 3 - železnički kolosek; 4 - signalni kabl

24.7. PUTEVI

Van naseljenih mesta energetski kablovi se polažu saglasno uslovima nadležne službe. Praksa je da se od autoputa kablovi polažu na udaljenosti bar 40 m od spoljne ivice pojasa puta.

Kod puteva nižeg reda koriste se sledeća rastojanja:

- putevi I i II reda ≥ 20 m,
- putevi III i IV reda ≥ 10 m.

Na brdovitim terenima su znatno manja rastojanja ≥ 5 m od ivice pojasa puta. U posebnim okolnostima zavisno od terena moguća su i manja rastojanja.

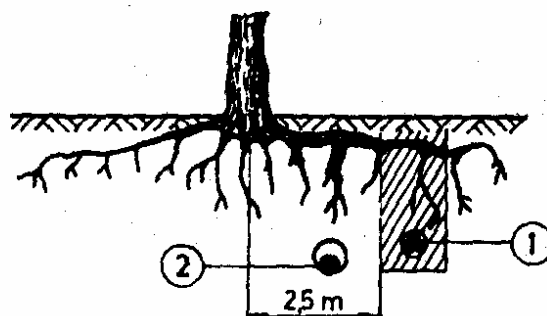
Pod putnim pojasom se razume širina puta (ivice kolovoza) i 2 m od spoljne ivice jarka ili useka.

Ugao ukrštanja kabla i puta treba da je 90° , ali ne manji od 30° .

Vertikalno rastojanje kablovskih cevi od gornje ivice kolovoza ne sme biti manje od 1 m. Zaštitne kablovske cevi se polažu 1 m levo i desno od putnog pojasa.

24.8. DRVOREDI

Poznato je da je zemljište oko drveća suvlje, jer biljka crpi hranljive sastojke i vlagu iz njega. Merenja specifičnog toplotnog otpora zemljišta pokazala su nagli skok vrednosti u oblasti drvoreda. To se objašnjava manjim sadržajem vlage u zemljištu. Prilikom iskopa rova za kabl drveće i drugo rastinje biće ugroženo ako dođe do kidanja korena biljke.



Sl. 24.11. Zaštitne mere u blizini korena drveća (nemačko iskustvo)
1 - ručno kopan rov; 2 - kabl u zaštitnoj cevi koja je postavljena bušenjem ili utiskivanjem

Nemački standardi zahtevaju širinu od 2,5 m za drvored. Ako se pomenuto rastojanje ne može održati onda kablove treba polagati u cevi koje su položene bušenjem ili utiskivanjem. Gradsko zelenilo Beograda propisuje rastojanje drvoreda od kabla od 2 m. Prema ruskoj literaturi takođe se predviđa rastojanje od 2 m, ali se ostavlja mogućnost da se u dogovoru s nadležnom organizacijom ovo rastojanje može smanjiti.

24.9. PODZEMNE INSTALACIJE NA JAVNIM POVRŠINAMA

Prema nemačkim normama DIN 1998 trotoarske površine su podeljene na zone: TK kablovi pošte (PTT), elektroenergetski kablovi, gas i voda, s tim da je PTT zona uz regulacionu liniju zgrada. Ovakav raspored predviđa u PTT zoni jedan slobodan prostor po visini, od 30 cm kojim se omogućuje ukrštanje sa priključnim instalacijama zgrade (niskonaponski kabl priključak i priključak vode i gasa). Blizina zona PTT i elektroenergetskih kablova ne treba da stvara teškoće u pogledu indukovanih napona u PTT kablovima. U mrežama 0,4 kV i 10 kV pogotovo ako je zvezdište napona 10 kV uzemljeno preko otpora i time struja jednopolnog kratkog spoja ograničena na primer na 300 A - ne postoji pojava opasnih napona u PTT kablovima.

Zona energetskih kablova po dubini se prostire od 0,6 do 1,6 m, za gas od 1,1 do 1,3 m, a za vodovod od 1 do 1,8 m zavisno od klimatskog područja.

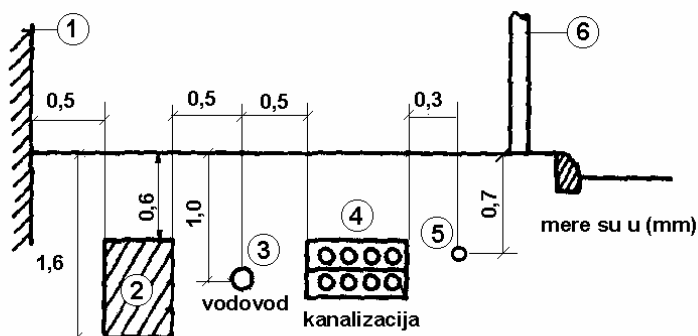
Daljinsko grejanje se postavlja u kolovozu, uz slivnike. U slučaju ukrštanja sa energetskim kablovima i vodovodom predviđa se izrada izolacije ili odvođenja toplote.

Takođe se i za gasni dalekovod predviđa mesto u kolovozu, uz slivnik.

Prema engleskoj praksi instalacije se u trotoaru postavljaju od regulacione linije zgrade prema ulici ovim redom: energetski kablovi, gasovod, vodovod i PTT kablovi.

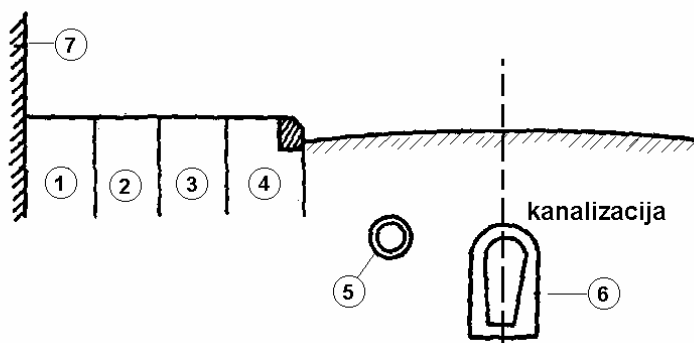
Novija nemačka praksa je nešto izmenjena, jer je redosled od regulacione linij zgrada prema ulici sledeći: elektroenergetski kablovi, gas, vodovod, TK (zona PTT).

Predlogom našeg JUS standarda usvojena su slična rešenja nemačkim.



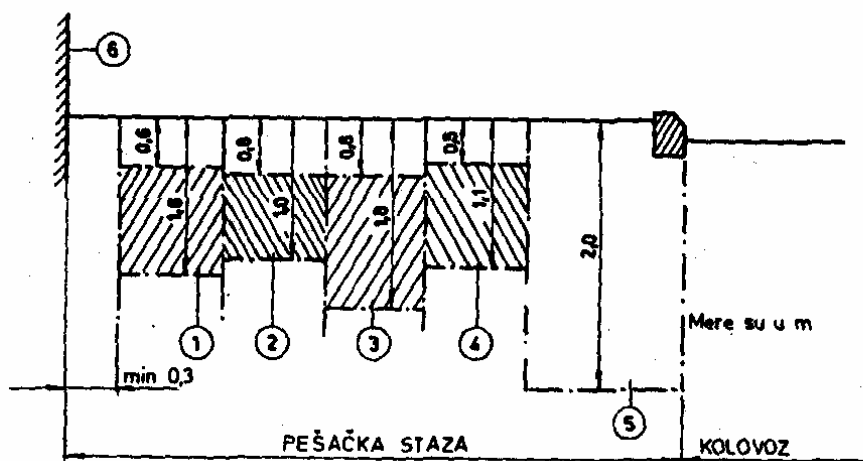
Sl. 24.12. Primer položaja podzemnih instalacija u trotoaru (engleska praksa)

- 1 - regulaciona linija zgrada; 2 - zona elektroenergetskih kablova; 3 - vodovod; 4 - kanalizacija, PTT; 5 - kabl javnog osvetljenja



Sl. 24.13. Primer položaja podzemnih instalacija (nemačka praksa)

- 1 - zona PTT; 2 - zona elektroenergetskih kablova; 3 - zona gasa; 4 - zona vodovoda; 5 - glavna vodovodna cev ili daljinsko grejanje ili gasni daljokovod; 6 - kanalizacija; 7 - regulaciona linija zgrada



Sl. 24.14. Raspored instalacija prema predlogu JUS

- 1 - elektroenergetski kablovi; 2 - gas; 3 - vodovod; 4 - TK (PTT zona); 5 - javno osvetljenje i stub kontaktne mreže električnog saobraćaja; 6 - zgrada

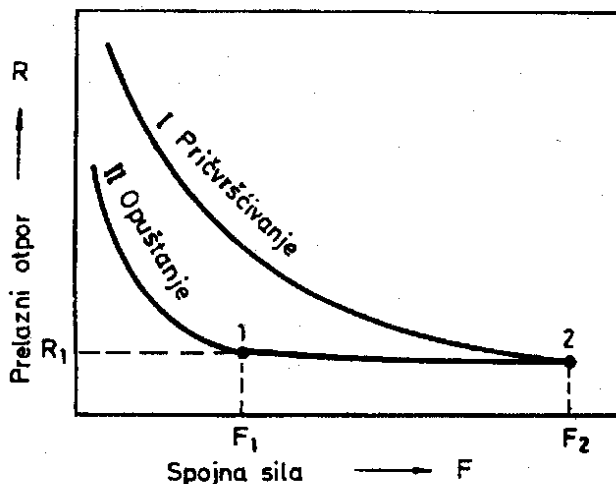
25. SPAJANJE PROVODNIKA

Osobnosti aluminijuma su: stvaranje oksidnog sloja, toplotno širenje, elektrolitička korozija i tzv. hladno tečenje.

Aluminijum je pokriven tankim i tvrdim oksidom visoke temperature topljenja, oko 2000°C . On se stvara čim aluminijum dođe u dodir sa vazduhom. Pri zagrevanju aluminijum se širi za oko 40% više nego bakar, pa upotreba klasičnih bakarnih stezaljki ne dolazi u obzir.

Hladno tečenje aluminijuma ili puzanje javlja se kad se aluminijum podvrgne većem pritisku. Međutim, ispod jedne određene vrednosti pritiska ova pojava se može zanemariti. Pri većim pritiscima, a naročito kod malih površina hladno tečenje je jako izraženo. Tada oslabi spoj između površina, dolazi do stvaranja oksidnog sloja i velikog prelaznog otpora i konačno do termičkog razaranja spoja.

Kriva zatezanja, tj. kriva pričvršćivanja dve spojne površine prikazana je na slici 25.1. Povećanjem sile smanjuje se prelazni otpor tako da pri sili F_1 otpor padne na vrednost R_1 . Sila F_2 pri kojoj se postigne vrednost prelaznog otpora R_1 znatno je veća od sile F_1 pri kojoj praktično ne postoji hladno tečenje. Kad se jedan spoj zateže zavrtnjima ili presuje, odnos sile i prelaznog otpora kretaće se po krivoj I. Kad se dostigne tačka 2 i prestane zatezati, odnosno presovati spoj, proces neće stati, već će se nastaviti po krivoj II. Ova kriva se zove kriva relaksacije (opuštanje) i njen tok je posledica hladnog tečenja aluminijuma. U opsegu $F_1 - F_2$ prelazni otpor se praktično neće menjati. Važno je da se opuštanje završi u opsegu $F_2 - F_1$, a za vrednost prelaznog otpora R_1 .



Sl. 25.1. Prelazni otpor u zavisnosti od sile spoja

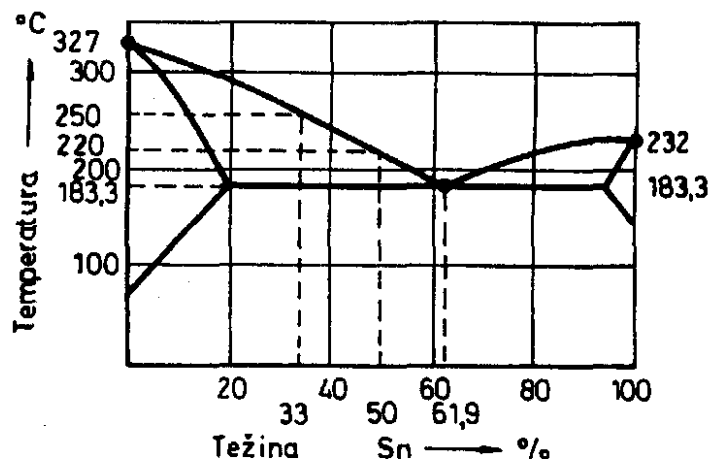
25.1. METODE SPAJANJA PROVODNIKA

Poznate su sledeće metode spajanja provodnika:

- lemljenje,
- topljenje,
- gnječenje (presovanje) i
- primenom stezaljki.

LEMLJENJE

Ova metoda spajanja provodnika je najstarija pa su je potisnule modernije i ekonomičnije metode. Meki lem ne difundira u metal provodnika tj. ne dolazi do njihove unutarnje veze. Veza zalemljenih delova održava se samo zahvaljujući sili adhezije. Ove sile nisu velike pa ovakvi spojevi nisu u stanju da izdrže mehanička, a ni veća toplotna naprezanja.



Sl. 25.2. Dijagram legure Pb-Sn

Temperatura topljenja kod mekog lemljenja kreće se od oko 200-400° C. Mada ne visoke, ove temperature predstavljaju stalnu opasnost za izolaciju kabla, jer proces mekog lemljenja ne traje kratko vreme. Temperatura topljenja legure Pb-Sn mnogo zavisi od sadržine kalaja. Do 183,3° C legura je u čvrstom stanju. Legura sa 33% Sn iznad 183,3° C omekšava da bi se tek na 250° C otopila. Za leguru sa 50% Sn temperatura topljenja nalazi se na oko 220° C. Za leguru sa 61,9% Sn (tzv. euteklički lem) ne temperaturi od 183° C istovremeno postoje dva stanja: tečno i čvrsto.

Sadržaj Sn u leguri može imati veliki značaj u izradi kvalitetnih spojeva u mrežama gde se očekuju veće struje kratkog spoja.

Postupak spajanja Al provodnika metodom lemljenja je kao i kod spajanja Cu provodnika, samo što se sa Al provodnika prethodno mora ukloniti oksidni film. Ova metoda se zove metoda trljanja i aluminijumski oksid se razara mehaničkim putem. Lem je u obliku šipke koja sadrži dva metala sa višom i nižom tačkom topljenja: kalaj i cink. Lem je sačinjen od 70% cinka i 30% kalaja. Pri topljenju i trljanju šipke o aluminijumski provodnik kristali cinka mehaničkim putem razaraju oksid, te se kalaj spaja sa aluminijumom.

Metoda lemljenja ima više nedostataka:

- uticaj montera je odlučujući za kvalitet spoja,
- spoj ne izdržava veće struje kratkog spoja, maksimalna temperatura je 160° C,
- izrada spoja sa Al provodnicima dugo traje.

Zbog temperaturnog ograničenja ovaj spoj ne odgovara novim materijalima za izolaciju kabla (PE, XPE), jer oni dozvoljavaju visoke temperature pri kratkim spojevima (250° C).

TOPLJENJE

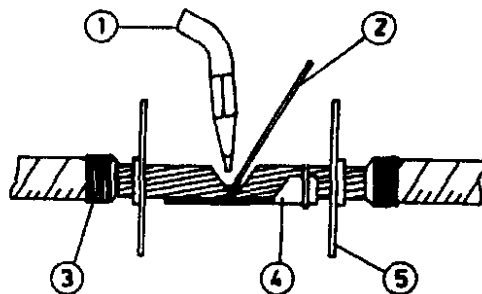
Kao što je poznato tačka topljenja Al je relativno niska, dok je nasuprot tome, tačka topljenja njegovog oksida visoka. Razlika ove dve tačke topljenja je oko 1500° C. U procesu topljenja aluminijuma pre no što dostigne tačku topljenja oksid odeblja, pa budući da je specifično teži, lako se utapa u rastopljenu kupku.

Da bi se shvatile teškoće spajanja aluminijuma topljenjem neophodno je nešto reći o topilima ili kako se još zovu fluksovima. U procesu spajanja aluminijuma topljenjem topila se rastvara aluminijumski oksid. Međutim, da bi bilo efikasno topilo mora da ispuni delikatne uslove. Tačka topljenja topila treba da je bar za 100° C niža od tačke topljenja aluminijuma, da se ne bi desilo da oksid utone u kupku i izbegne uticaj topila. Soli stvorene delovanjem topila na aluminijumski oksid treba da su specifički lakše od rastopljenog aluminijuma, da bi plivale po rastopini noseći sa sobom nečistoće i štiteći aluminijum od ponovne oksidacije i absorpcije gasova. Kada je zavarivanje završeno, ove soli treba ukloniti da kasnije ne bi došlo do korozije. Međutim, ma koliko važne bile osobine topila da agresivno rastvaraju aluminijumski oksid, ipak se tome ne teži, jer su stvorene soli utoliko intenzivniji uzročnici korozije ukoliko je topilo agresivnije.

Za spajanje aluminijuma topljenjem poznate su četiri metode:

- gasno zavarivanje (autogeno),
- električno zavarivanje,
- termitni postupak i
- zavarivanje u inertnim gasovima.

Za gasno zavarivanje koriste se gasovi kiseonik i acetilen ili kiseonik i vodonik. Spojni materijal je aluminijumska žica. Najčešće se koristi zavarivanje u tzv. "V" obliku. Iako je temperatura topljenja aluminijuma 660°C zbog dobre toplotne provodnosti potrebna je velika količina toplote, gotovo kao kod zavarivanja čelika. Zbog toga je vrlo ugrožena izolacija kablova, te se štiti specijalnim pločama. Postoji način zavarivanja spojeva u tzv. zatvoreni oblik - kalup ali se on ređe koristi.

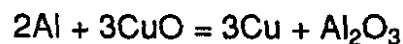


Sl. 25.3. Zavarivanje spoja u otvorenom obliku
1 - plamenik; 2 - Al žica za zavarivanje; 3 - povez od azbestne trake;
4 - otvoren oblik; 5 - zaštitna ploča za hlađenje

Ova metoda zavarivanja daje odlične rezultate i pretpostavlja odlično uvežbano osoblje.

Metoda zavarivanja električnim putem se retko koristi.

Termitno spajanje provodnika je novijeg datuma i prvobitno je korišćeno za spajanje bakarnih provodnika. Proces spajanja bakarnih provodnika zasniva se na redukciji oksida bakra. Aluminijumski prašak redukuje oksid bakra, tako da se dobija čist bakar i aluminijumski oksid:



Za početak procesa spajanja koristi se poseban prašak koji razvija temperaturu od 1540°C i pali aluminijumski prašak pri čemu se dostiže temperatura od 2200°C . Za spajanje aluminijumskih provodnika neophodno je upotrebiti fluks koji rastvara oksid aluminijuma. Kao i za sve druge metode spajanja aluminijuma potrebno je da je Al provodnik

čist i odmašćen. Ako je temperatura pri kojoj se vrši spajanje niska, provodnike treba zagrijati. Takođe treba zagrijati kalup, naročito ako se sumnja da je vlažan.

Ova metoda je skupa i relativno komplikovana.

Metoda zavarivanja u inertnom gasu je poznata pod skraćanim nazivom MIG (Metal Inert Gas). Zavarivanje u struji inertnih gasova ne zahteva nikakve paste. Električni luk nastaje između elektrode koja se automatski pomera i provodnika. Oko elektrode struji inertan gas i na taj način izoluje var od okoline - vazduha.

GNJEČENJE (PRESOVANJE)

Metoda spajanja provodnika gnječenjem mnogo se koristi, jer ima više prednosti nad klasičnim metodama (lemljenje i topljenje):

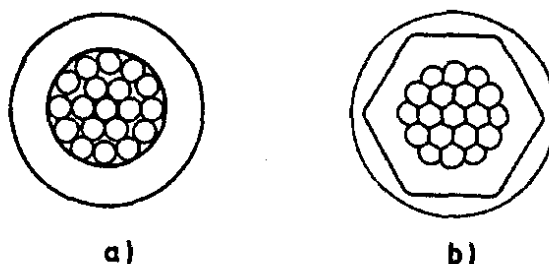
- praktično je isključen uticaj montera na kvalitet spoja,
- spoj se izvodi vrlo brzo,
- postupak je hladan - ne postoji mogućnost pregrevanja izolacije,
- znatno smanjena mogućnost pojave korozije spoja.

Spajanje gnječenjem sastoji se u deformaciji spoja: čaure i provodnika i razaranja slojeva oksida na provodnicima. Na taj način se ostvaruje trajan električni spoj.

Poznato je više metoda gnječenja ali se najviše koriste sledeće:

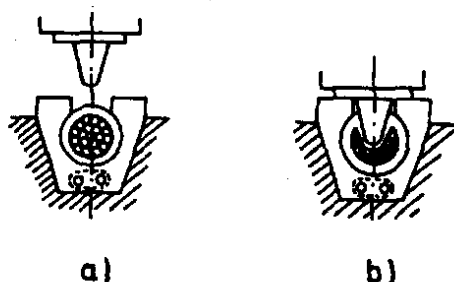
- gnječenje u šestougaoni oblik,
- gnječenje dubokim utiskivanjem i
- kombinacija dva prethodna.

Gnječenje u šestougaoni oblik upotrebljivo je podjednako dobro za Al i Cu provodnike bili oni višežični, jednožični, sektorskog ili kružnog oblika. Presa može biti ručna do preseka provodnika od 185 mm². Zbog ivica koje ostaju posle gnječenja ova metoda se ne koristi za napone iznad 20 kV. Primenom hidrauličnih presa rešava se problem gnječenja većih preseka. Ova metoda se dosta koristi u Nemačkoj.



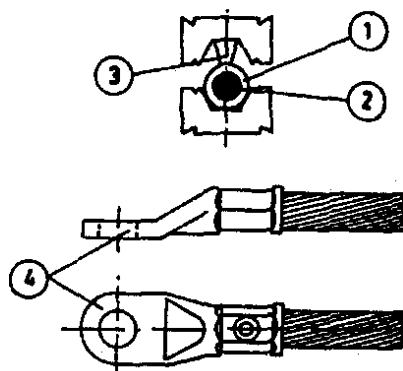
Sl. 25.4. Gnječenje u šestougaoni oblik
a - pre gnječenja; b - posle gnječenja

Gnječenje dubokim utiskivanjem razvijeno je u Francuskoj, a primenjuje se u većem broju zemalja. Osnovni uslov je za ovaj spoj da čaura bude radijalno zatvorena u kalupu po celoj svojoj dužini.



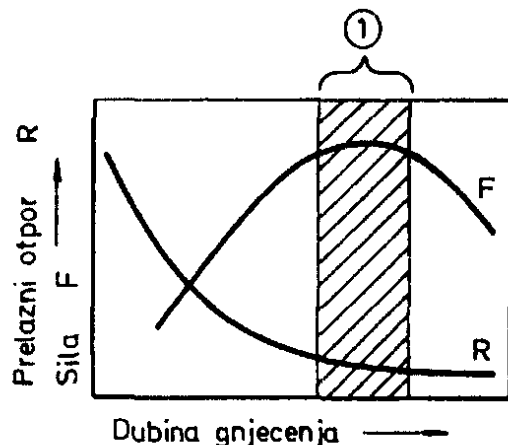
Sl. 25.5. Gnječenje dubokim utiskivanjem
a - izgled pre gnječenja; b - izgled posle gnječenja

Šestougaono gnječenje s dubokim utiskivanjem razvijeno je u Poljskoj. Provodnik i čaura se gnječe pomoću dve matrice od kojih jedna sadrži trn.



Sl. 25.6. Šestougaono gnječenje s dubokim utiskivanjem
1 - čaura; 2 - provodnik; 3 - trn; 4 - papučica

Prelazni električni otpor spoja izrađen gnječenjem opada sa povećanjem njegove deformacije i dostiže pri najvećoj mehaničkoj čvrstoći spoja svoju optimalnu vrednost.

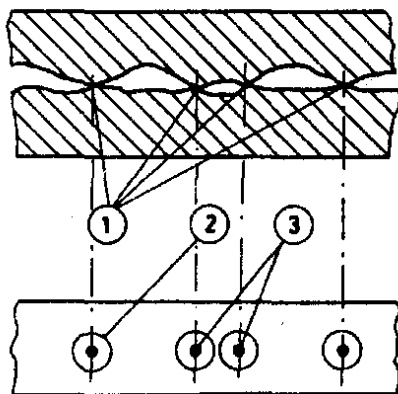


Sl. 25.7. Zavisnost prelaznog otpora i mehaničke čvrstoće spoja od dubine gnjecenja
1 - područje najpovoljnijeg gnjecenja

25.2. STEZALJKE

Stezaljke se najviše koriste kod montaže račvastih spojnica i priključivanja kabla na električne razvode i kablovske priključne kutije. Prelazni otpor zavisi od sile pritiska i najpre brzo opada da bi se zatim ustalio tako da više ne opada iako sila raste. Ako bi sila opala otpor se kod dobro izgrađenih stezaljki ne bi praktično povećao.

Spojne površine, ma kako dobro bile obrađene, u strukturalnom smislu, ipak, ne predstavljaju dve ravne površine koje idealno, celom površinom naležu jedna na drugu. Kad sila dejstvuje na dve površine, onda se prvobitni spojni otpor, nastao običnim naleganjem površine, smanjuje, jer se neravna površina spoja izravnava. Pri ovom se broj spojnih tačaka povećava, tj. površina spoja se deformiše i ostvaruje bolji spoj površina.



Sl. 25.8. Kontaktne površine
1 - spojna mesta; 2 - prividne površine spoja; 3 - stvarne površine spoja

Cela površina spoja ne služi za prolaz struje, jer se na njenoj ukupnoj površini ne ostvaruje kontakt između površina, već samo delimično, na mikroskopski malim površinama.

Otpor stezaljke manji je ukoliko je veća sila spoja ili ukoliko je specifični električni otpor spojnog materijala manji. Otpor takođe zavisi od obrade spojnih površina što se izražava površinskim otporom. To ipak ne znači da je veličina dodirne površine stezaljke nevažna. Od veličine ove površine, naime, zavisi intenzitet odvođenja toplote.

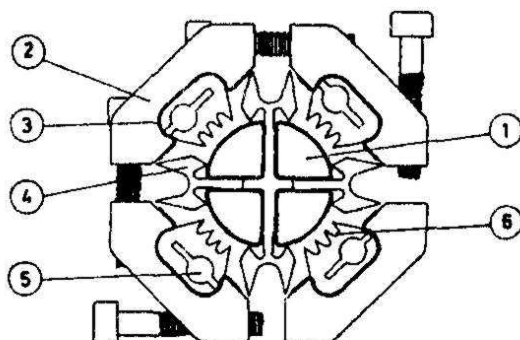
Problem je kod stezaljki što one treba da razore sve oksidne slojeve pojedinih žica u aluminijumskom provodniku. Ukoliko bi se efektivni presek preovodnika smanjio, to bi moglo doći do termičkog preopterećenja provodnika i spoja u stezaljki. Stoga se stezaljke u "T" spojevima ne koriste za veće preseke glavnog voda od 240 mm², a za odvojene od 95 mm².

Postoji takođe i problem pritezanja stezaljki. Proizvođači stezaljki propisuju moment pritezanja u Nm. Međutim, to ne predstavlja potvrdu da će spoljna sila biti dovoljna, što zavisi od vrste antikorozijske zaštite zavrtnja, prisustva ulja i sl. Zavrtnj zaštićen postupkom vrućeg cinkovanja ostvaruje pri istom momentu pritezanja manju spojnu silu no kadminizirani zavrtnj. U stvari sila spoja mnogo zavisi od trenja zavrtnja o stezaljku. Konstruktori stezaljki teže da proizvode takve stezaljke kod kojih se pri određenom momentu pritezanja sila spoja neće znatno menjati sa vrstom antikorozivne zaštite zavrtnja ili prisustva ulja i sl.

Postavljanje stezaljki na šine predstavlja dobro rešenje, ukoliko nije u pitanju postolje niskonaponskih visokoučinskih osigurača (NVO). Kod takvih priključaka stezaljka se greje od osigurača i spoj može biti termički narušen.

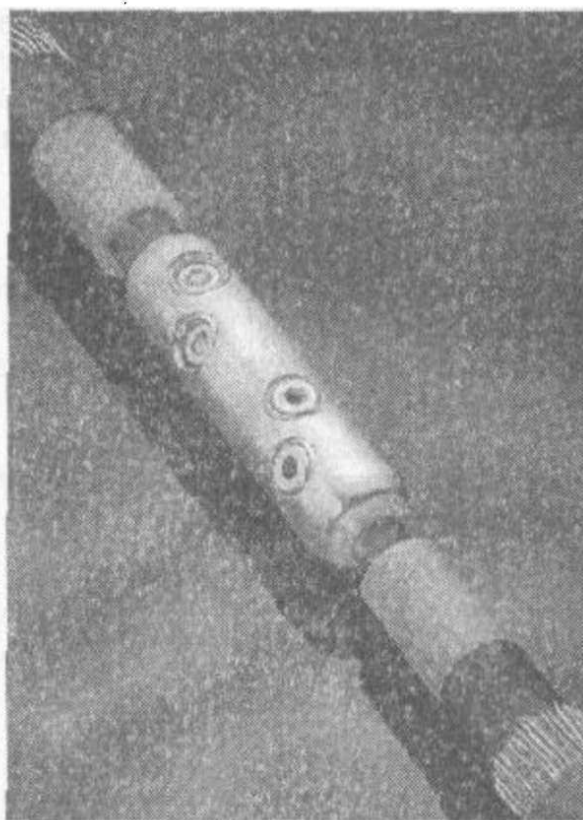
Stezaljka kao i šina na koju se priključuje treba da su pokalajisane. Niklovanje ili posrebravanje se ne preporučuje. Da bi se obezbedio dobar i trajan spoj Al stezaljka se direktno ne kalajise. U cilju da se ostvari dobro kalajisanje Al stezaljke, ona se prethodno prevlači međuslojem od bronce ili nikla.

Da bi se izbeglo korišćenje presa i na taj način uprostila montaža spoja, koriste se čaure sa zavrtnjima. Međutim, njihovo korišćenje je ograničeno do napona 1 kV, jer glave zavrtnja vire iznad čaure.



Sl. 25.9. Kompaktna stezaljka za rad pod naponom
1 - provodnik glavnog kabla; 2 - telo stezaljke od legure Al; 3 - izolacioni sloj;
4 - izolacioni klin; 5 - otvor za provodnik odvojnog kabla;
6 - zubi za probijanje izolacije provodnika glavnog kabla

Nemačko preduzeće Gerhard Petri GmbH & Co. KG Elektrotechnik u svom proizvodnom programu ima čaure sa zavrtnjima, do napona 18/30 kV. Glave zavrtnjeva se pri uvrtnju kidaju kad se ostvari dobar spoj, tako da čaura ostaje ravna.



Sl. 25.10. Čaura sa zavrtnjima za naponski nivo do 18/30 kV
proizvodnje Gerhard Petri GmbH & Co. KG Elektrotechnik

Za centriranje provodnika u čauri služe prsteni od veštačkog materijala otporni na temperaturu (vidi tab 25.9.). Isti princip je primenjen i kod kablovskih papuča (vidi tab. 25.10.).

25.3. ISPITIVANJE SPOJEVA

Tokom pogona spoj je izložen višestrukim naprezanjima. On mora da podnese bez promena svojih osobina pogonske i kratkospojne struje. U tom smislu su i sačinjeni propisi o ispitivanju spojeva. U stvari tu se radi o tzv. ispitivanju spojeva na ubrzano starenje. Ova ispitivanja se sastoje od više stotina promena opterećenja - ciklusa, kod kojih posle faze zagrevanja sledi faza hlađenja. Spoj se zagreva prolaskom naizmernične struje 50 Hz koja u određenom vremenskom periodu treba da postigne propisanu temperaturu. Za niskonaponske stezaljke propisuje se trajna temperatura provodnika 90°C , a pri kratkom spoju 180°C (JUS N.F4.106 i JUS N.F4.101). Međutim, za gnječenje spojeva određuje se viša temperatura pri kratkom spoju od 250°C , što odgovara dozvoljenoj temperaturi za kablove izolovane umreženim polietilenom. Ispitivanje se sastoji od 100 ciklusa zagrevanja i hlađenja i jednog opterećenja velikom strujom koja greje provodnike u spoju na 180°C odnosno 250°C . Pri svakom ciklusu mereni uzorci treba da se ohlade na oko 30°C .

Pad napona spoja se meri jednosmernom strujom i to posle 500 ciklusa, a zatim posle opterećenja velikom strujom koja odgovara spoju (180 odnosno 250°C) i posle 1000 ciklusa opterećenja. Kvalitet spoja sa gledišta pada napona ocenjuje se na osnovu njegovog procentualnog porasta pojedinih faza merenja.

Što se tiče temperature samog ispitnog uzorka ona ne sme biti veća od temperature provodnika.

26. KABLOVSKE GLAVE I SPOJNICE

26.1 OPŠTE

Podnosivi napon kablovskih glava i spojnica treba da je veće no kod kablova, da bi se nadoknadili nedostaci koje sobom nosi njihova montaža (uključci, ručna montaža i sl.). Stoga se pri proračunu debljine i oblika izolacije kablovskih glava i spojnica uzima manja jačina električnog polja no kod kablova. Takođe se uzima da je računski napon unutrašnje izolacije kablovske glave veći od spoljašnje (izolator kablovske glave) za oko 10% (praksa u bivšem SSSR-u).

Tab. 26.1. Računski napon (U_R) kablovskih glava i spojnica¹⁾

Pogonski linijski napon (kV)	Kablovska glava			Obična kablovska i "stop" ²⁾ spojnica		
	110	220	500	110	220	500
Računski napon U_R (kV)	310	580	1020	275	550	825

Određuju se i računске jačine električnog polja i one su znatno niže od jačine električnog polja izolacije kablova (kod kablovskih glava i "stop" spojnica 50%).

Kod papira je u tangencijalnom pravcu probojna čvrstoća 10 do 12 puta niža no radijalnom pravcu (vidi: 7.1. PAPIR). Tako se uzima da je računska jačina električnog polja kablovskih glava i spojnica:

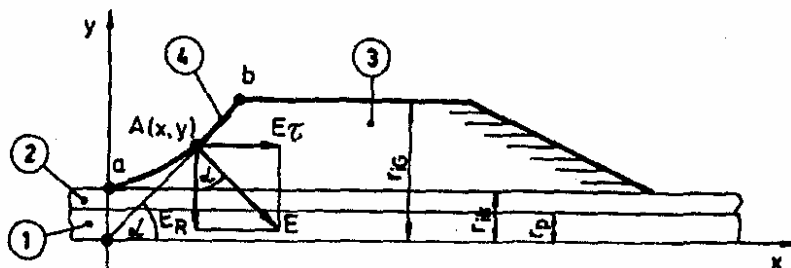
$$E_{tR} \approx 0,04 \cdot E_R$$

gde je E_R računska jačina električnog polja kablovske glave u radijalnom pravcu.

Kablovske glave i spojnice sa gledišta električnog polja karakterišu se pojavom tangencijalnog naprezanja izolacije (kod neizotropnih izolacija kao što je papir i neke vrste izolacionih traka).

¹⁾ Prema praksi u bivšem SSSR-u.

²⁾ "Stop" spojnice su spojnice u kojima se prekida hidraulički tok ulja levo i desno od spojnice.



Sl. 26.1. Električno polje u kablovskoj glavi
1 - provodnik; 2 - izolacija kabla; 3 - izolacija kablovske glave; 4 - deflektor

Debljina izolacije kablovske glave se određuje iz izraza, rešavajući ga po r_{iG} :

$$E_R = \frac{U_R}{r_p \cdot \ln \frac{r_{iG}}{r_p}} \quad (26.1.)$$

gde je:

- U_R - računski napon,
- r_p - poluprečnik provodnika,
- r_{iG} - poluprečnik izolacije kablovske glave.

Dužina projekcije konusa - deflektora na 0x osu je:

$$l_x = \frac{U_R}{E_{\tau R}} \cdot \ln \frac{r_p}{r_p \cdot \ln \frac{r_{iG}}{r_p}} \quad (26.2.)$$

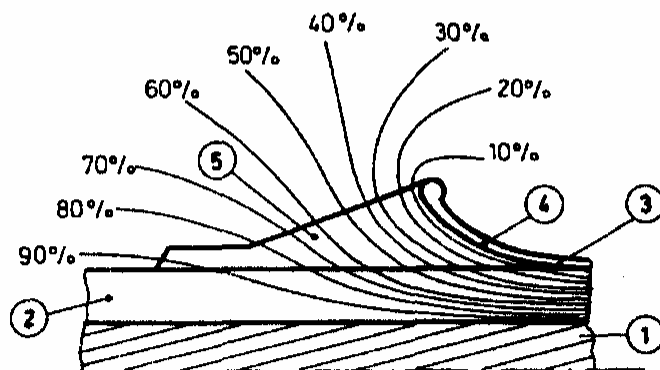
gde je r_{ik} poluprečnik izolacije kabla.

Za kablove sa čvrstim dielektrikom (PE, XPE i sl.) naponskog nivoa od 10 kV i više električno polje u kablju treba da je radijalno, jer bi inače došlo tokom vremena do proboja izolacije. Ova granica kod papirnih kablova je 15 kV. To se postiže tzv. ekraniziranjem žila kabla. Međutim, kod kablovskih glava i spojnika zbog promene geometrije i prekida sredine električno polje se deformiše tj. nije više radijalno.

Da bi se izolacija rasteretila jakih električnih naprežanja primenjuje se više načina kojima se oblikuje električno polje:

- geometrijsko,
- kapacitivno,
- omsko i
- refraktorsko.

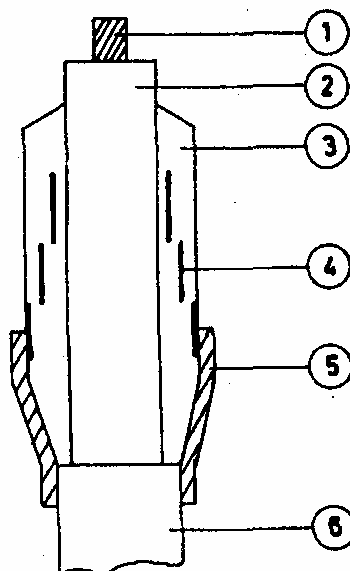
Geometrijsko oblikovanje električnog polja primenjuje se kod srednjenaponskih i visokonaponskih kablova.



Sl. 26.2. Geometrijsko oblikovanje električnog polja

1 - provodnik; 2 - izolacija kablova; 3 - električni ekran kablova;
4 - električni levak - deflektor; 5 - izolacija kablovske glave

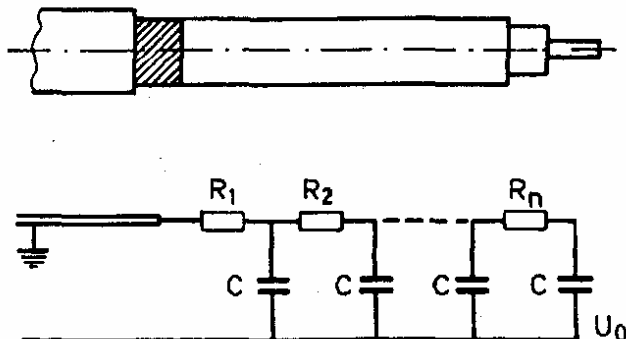
Kapacitivno oblikovanje električnog polja koriste se kod najviših napona.



Sl. 26.3. Kapacitivno oblikovanje električnog polja

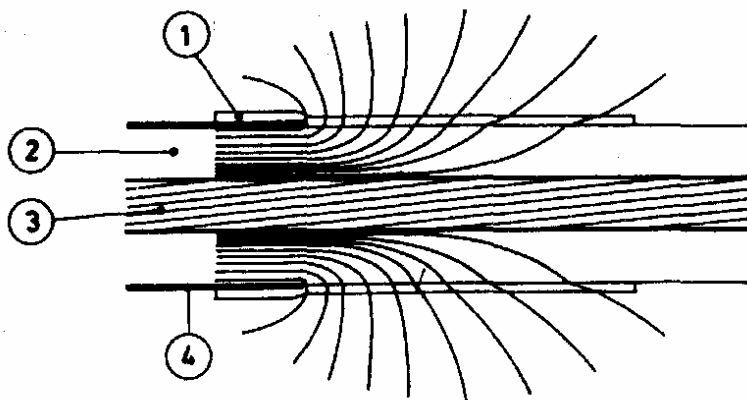
1 - provodnik; 2 - izolacija kablova; 3 - izolacija kablovske glave;
4 - kapacitivni cilindar; 5 - električni levak; 6 - električni ekran kablova

Omsko oblikovanje električnog polja ostvaruje se motanjem specijalnih samovulkanizirajućih traka. Preko njih teku struje odvoda koje stvaraju kontinualnu raspodelu napona duž kabela. Umesto traka se koriste skupljajuće cevi.



Sl. 26.4. Omsko oblikovanje električnog polja

Refraktorsko oblikovanje električnog polja zasniva se na prelamanju električnog polja na granici dielektrika. Pri prelazu sa dielektrika manje dielektrične konstante na dielektrik sa većom, linije električnog polja lomiće se na njihovoj granici šireći lepezu linija električnog polja. Iz toplotnih i električnih razloga ova metoda je ograničena do napona od 36 kV.



Sl. 26.5. Kombinovano omsko-refraktorsko oblikovanje električnog polja

1 - toploskupljajuća cev za oblikovanje električnog polja; 2 - izolacija kabela;
3 - provodnik; 4 - električni ekran kabela

26.2. IZOALCIONI MATERIJALI

Za nalivanje kablovskih glava i spojnica koriste se:

- ulja,
- bitumenske mase i
- očvršćavajuće mase.

Za srednjenaponske papirne kablove koriste se tzv. uljni kompaundi, a za uljne kablove visokog napona specijalna ulja niskog viskoziteta.

Bitumenske mase koriste se za papirne i PVC kablove 1 kV, a i za ispune spoljašnjih kablovskih spojnica kod viših napona.

Očvršćavajuće mase namenjene su prvenstveno za kablove sa tvrdom izolacijom.

Mase za nalivanje treba da zadovolje sledeće uslove:

- treba da su za vreme nalivanja dovoljno tečne (niskog viskoziteta) da bi mogle da ispune sve šupljine,
- da imaju malo zapreminsko skupljanje,
- da dobro priležu uz izolaciju kabla tokom ciklusa opterećenja,
- dobro odvođenje toplote sa kabla,
- mehaničku čvrstoću, naročito ako sam izolacioni materijal (smola) formira kablovsku spojnicu odnosno glavu,
- malo upijanje vlage pri nalivanju i
- hemijsku postojanost.

Bitumenska masa pokazala je odlične rezultate za nalivanje kablovskih spojnica 1 kV kod papirnih kablova. Međutim sa uvođenjem kablova sa XPE izolacijom ona nije mogla da zadovolji postavljene temperaturne uslove i uslove zaptivanja, Visoka radna temperatura XPE kablova od 90° C, a izuzetno i 130° C (tzv. havarni pogon) predstavlja nepremostivu granicu za bitumensku masu (veliki koeficijent izduženja i nedovoljno odvođenje toplote). Takođe ona ne pokazuje dobro prijanjanje uz XPE izolaciju žila kabla.

Očvršćavajuće ili dvokomponentne mase - zalivne smole kod nas poznate pod nazivu "Smolit" (H.P. "Kablovi" - Jagodina) imaju primenu za kablovski pribor do 1 kV a ređe do 10 kV. Najviše se koriste epoksidne smole.

Tab. 26.2. Mase za nalivanje na bazi bitumena¹⁾

Mase	Oznaka	Primena
Masa za nalivanje	SN	Za garniture do 10 kV.
Tvrda masa za nalivanje	SE	Za kablovske glave na stubu.
Masa za nalivanje sa većom adhezijom	SP	Za garniture do 10 kV sa povećanom sigurnošću (spojnice u visoko vlažnoj sredini).
Hladna masa ²⁾	SY	Za spojnice, za kablove izolovane sintetičkim materijalima do 1 kV.
Hladna nalivna masa	SZ	Za garniture do 1 kV i kablovske glave za 10 kV, za kablove izolovane sintetičkim materijalima.

Postoje smole na bazi nezasićenih poliestera, silikonske smole i sl. Proces očvršćavanja dvokomponentnih smola je egzoterman (>130° C) i zahteva propisane temperaturne uslove - zagrevanje mase pri nižim temperaturama. Nedostatak ovo načina izrade kablovskih glava i spojnica je relativno dug proces pripreme mase, njenog očvršćavanja kao i ograničeno trajanje komponentnih masa (1 do 3 godine). Pri probama starenja, naizmeničnom zagrevanju i hlađenju, što se praktično javlja u pogonu, epoksidne smole su pokazale dobro prijanjanje uz izolaciju i metalne delove kabla i spoja.

Tab. 26.3. Zalivne smole³⁾

Oznaka	Tip	Primena
GNH	žilava - tvrda	do 1 kV ✓
GNW	meka - elastična	do 1 kV
GMH	žilava - tvrda	do 10 kV
GMW	meka - elastična	do 10 kV

Papirne trake različitih širina se isporučuju u ulju, u limenim kutijama. One su obično od papira istog kvaliteta kao i izolacija kabla ili krep papir.

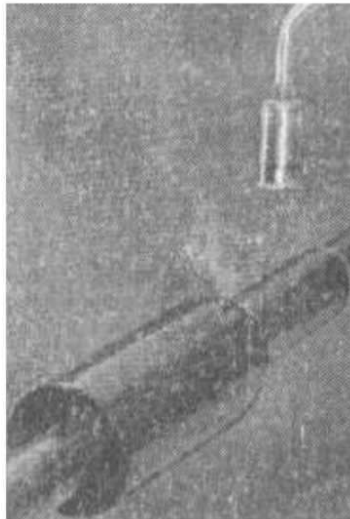
Izolacione trake (na bazi EPR) su samospajajuće, te ne ostavljaju mogućnost postojanja šupljina.

Kao vrlo pogodni za izolaciju i zaptivanje kablovskih glava i spojnica posle višegodišnjeg korišćenja, pokazali su se toploskupljajući materijali. Osnova tehnologije toploskupljajućih materijala su umreženi polimeri. Ovi materijali imaju osobinu da se putem toplotnog postupka vraćaju na prvobitne dimenzije. Stoga se i nazivaju materijali sa memorijom.

¹⁾ Prema DIN VDE 0291, Teil 1.

²⁾ Uglavnom se izbegava jer ne popunjava pouzdano sve šupljine.

³⁾ Prema DIN VDE 0291, Teil 2.



Sl. 26.6. Toplotni postupak
grejanje spoljašnje toploskupljajuće cevi kablovske spojnice

Ovi materijali su postojani na starenje, atmosferske uticaje i delovanja ultravioletnih zraka.

26.3. TIPOVI KABLOVSKIH GLAVA I SPOJNICA

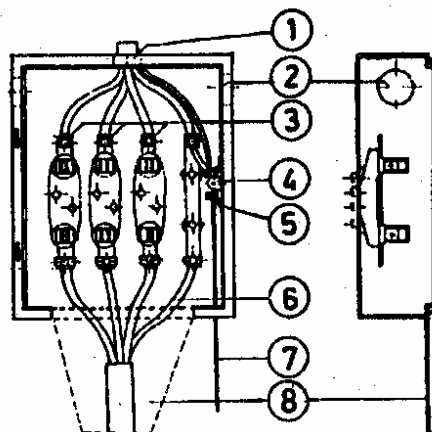
Kablovske glave i spojnice sa obzirom na uslove ambijenta u kome se nalaze i uticaj električne mreže čiji su sastavni deo, treba da zadovolje sledeće zahteve:

- izolacioni nivo,
- otpornost na kratke veze kako sa gledišta temperature tako i sa gledišta dinamičkih sila,
- zadovoljavajuće odvođenje toplote u normalnom i kratkospojnom režimu rada,
- otpornost na uslove ambijenta u kojima se nalaze (sunčevo zračenje, kiša, ozon, kiseline i sl.),
- dobar spoj provodnika i sl.

Izolacioni nivo podrazumeva postojanu električnu čvrstoću tokom veka kablovskog voda kada su kablovske glave i spojnice izložene višestrukim promenama temperature i različitim izduženjima materijala u njima. Pri tome ne smeju da nastanu šupljine niti da vlaga uđe u kablovsku spojnicu odnosno glavu. Naročito je za električni kvalitet kablovskih spojnica i glava karakteristično merenje parcijalnih pražnjenja. Ovo se prvenstveno odnosi na kablovski pribor od sintetičkih materijala.

NISKI NAPON

Tipično za niskonaponske kablovske glave i spojnice je da one bez ikakvih problema zadovoljavaju električne zahteve - dielektričnu čvrstoću.



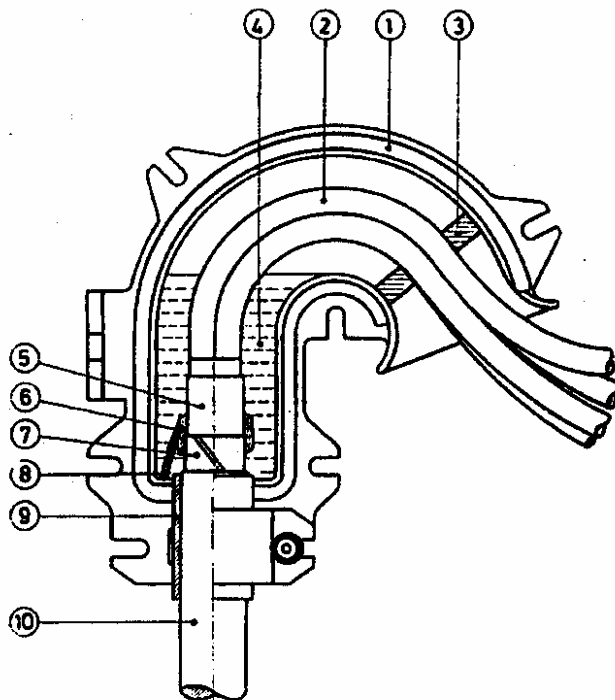
Sl. 26.7. Kablovska priključna kutija - tip "Elektro distribucija" - Beograd

- 1 i 2 - otvor za ulaz el. instalacije objekta;
3 - postolje NV osigurača sa "NEPOS" stezaljkama; 4 - jezičak za zaključavanje bravice;
5 - priključak za uzemljenje i nulovanje sa "NEPOS" stezaljkama; 6 - žile napojnog kabla;
7 - uzemljenje (Fe/Zn traka); 8 - zaštitnik kablova

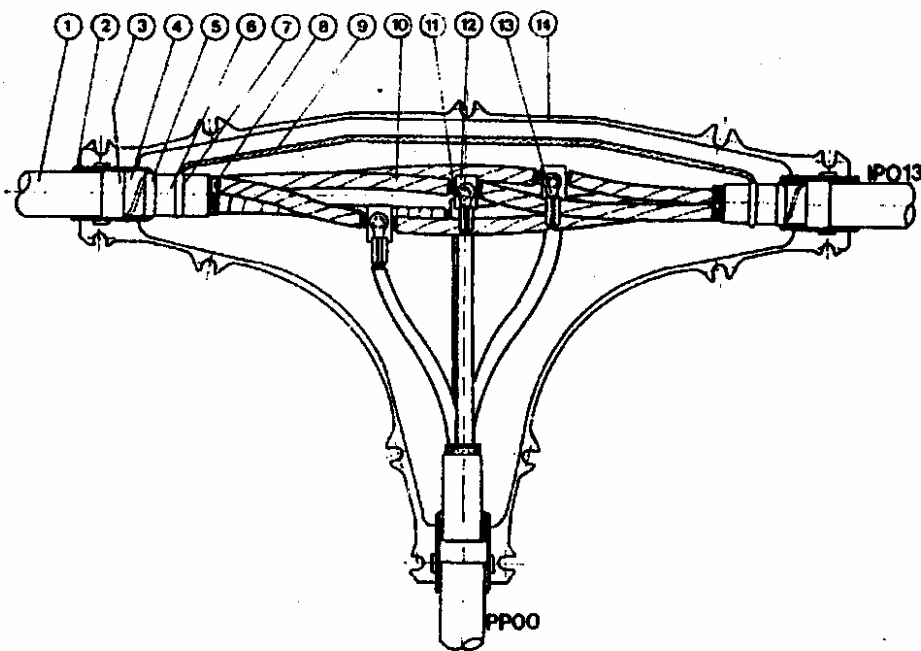
Međutim, s obzirom na njihovu masovnost, različite proizvođače pribora i velikog broja ljudi koji su uključeni u montažu postoji veliki problem da se njihov kvalitet održi na željenom nivou.

Posebno se teži da kablovske spojnice i glave budu otporne na prodor vlage. Međutim, ne treba zanemariti u spoljašnjim uslovima i otpornost na puzajuće struje i spoljašnje uticaje (korozija, sunčevo zračenje, ozon i sl.).

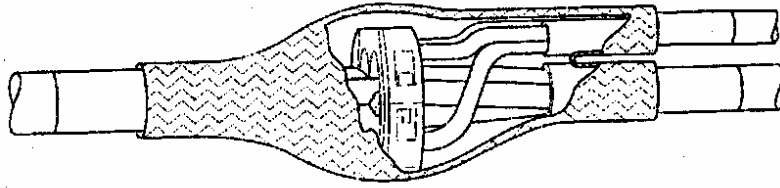
Primenom toploskupljajućih cevi vreme montaže je znatno skraćeno, a postignu je zadovoljavajući nivo kvaliteta. Grejanje toploskupljajućih cevi izvodi se sa gasnim gorionikom i to od sredine cevi prema krajevima kako se ne bi zarobio vazduh u njima. Ovaj metod izrade spojnica naročito je pogodan za XPE kablove, jer upotreba epoksidnih smola ili bitumenskih masa ne daje dobre rezultate zbog lošeg prijanjanja ovih materijala na XPE izolaciju kabla.



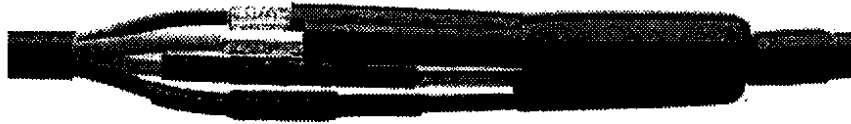
Sl. 26.8. Kablovska glava za spoljnu montažu (kabl PO 13)
 1 - telo kablovske glave; 2 - žile kabela; 3 - gumeni odstojnik; 4 - kablovska masa;
 5 - olovni omotač kabela; 6 - zaletovnani spoj čeličnih traka i olovnog omotača;
 7 - čelična traka kabela; 8 - bakarno užje; 9 - zaptivač; 10 - kabl PO13



Sl. 26.9. Račvasta kablovska spojnica
 1 - zaštitni plać kabela; 2 - jutana traka; 3 - samolepljiva traka; 4 - armatura kabela;
 5 - spoj armature i Pb plašta; 6 - Pb plašt; 7 - spoj Pb plašta (Cu užje);
 8 - pričvršćenje pojasne izolacije; 9 - Cu užje; 10 - izolacija žile;
 11 - provodnik; 12 - stezaljka; 13 - papučica; 14 - livena spojnica (oklop)



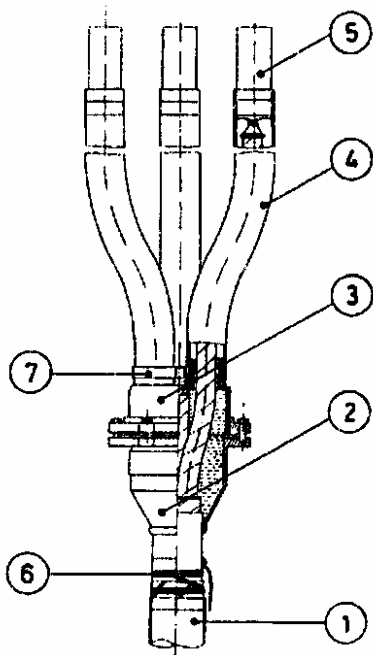
SI. 26.10. Račvasta spojnica "Raychem" 1 kV,
sa kablovima PP00 (XP00) i kompakt stezaljkom



SI 26.11. Prava spojnica "Raychem" 1 kV,
sa kablovima PP00 (XP00)

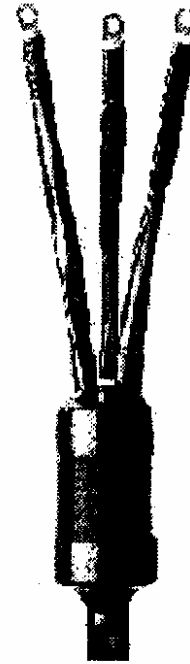
SREDNJI NAPON

Za papirne kablove 10 kV za unutrašnju montažu koristi se tip kablovske glave sa PVC cevima. Ove cevi se ne smeju međusobno dodirivati, jer na tim mestima zbog velikog grad E nastaje proboj,cevi i ispad kabla iz pogona. Takođe u zaprljanoj sredini može doći i do podužnog proboja cevi usled puzajućih struja. Stoga se prilikom izbora materijala za cev pored ostalih ispitivanja vrše ispitivanja na puzajuće struje. Cevi kao i stezaljke za njihovo zaptivanje treba da izdrže pritisak ulja.

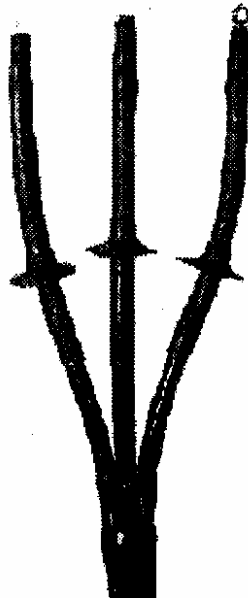


Sl. 26.12. Kablovska glava 12 kV
za unutrašnju montažu
za tip kapla IPO

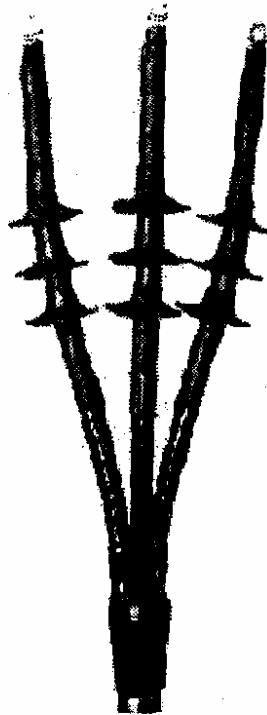
- 1 - kabl IPO; 2 - telo kablovske glave;
- 3 - uljokaz; 4 - PVC cev;
- 5 - kablovska papučica;
- 6 - uzemljenje kablovske glave;
- 7 - stezaljke za zaptivanje cevi



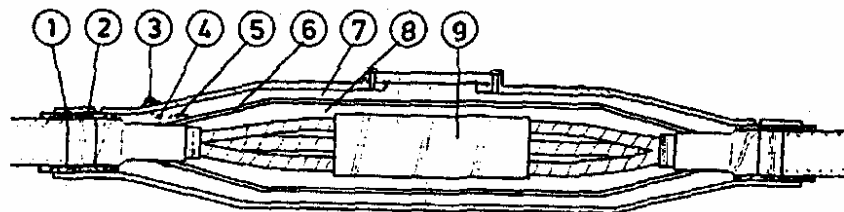
Sl. 26.13. Kablovska glava
"Raychem" 10 kV
sa uljokazom za kabl IPO 13



Sl. 26.14. Kablovska glava
za unutrašnju montažu "Raychem" 10 i 20 kV
za kabl tipa NPO 13 i sl.

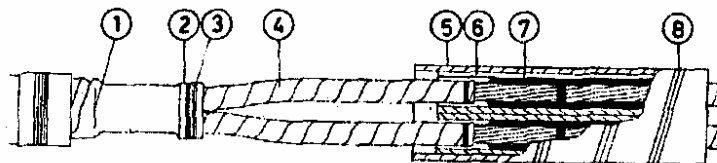


Sl. 26.15. Kablovska glava za spoljašnju montažu "Raychem 10 i 20 kV za kabl tipa NPO 13 i sl.



Sl. 26.16. Kablovska spojnica KS 64 10 kV (H.P. "Kablovi" - Jagodina)

- 1 - zaštitna spojnica; 2 - impregnisana jutana traka; 3 - zavrtanj za uzemljenje;
 4 - uže za uzemljenje 25 mm²; 5 - spoj olovne spojnice sa omotačem;
 6 - unutrašnja olovna spojnica; 7 - bitumenska kablovska masa SP;
 8 - uljna kablovska masa VUM/N ili VUM; 9 - izolovani spojevi; 10 - impregnisani kanap

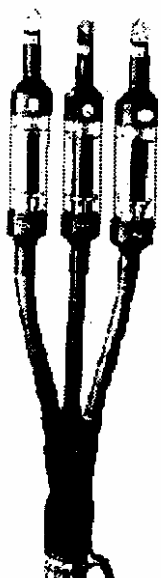


Sl. 26.17. Izolovanje spojeva spojnice KS 64 10 kV

- 1 - mesto gde je zalemljena armatura sa omotačem; 2 - namotaj izolacionog papira preko pojasne izolacije; 3 - impregnisani kanap; 4 - fabrički izolovana žila; 5 - impregnisani papirni valjak; 6 - impregnisani papirni valjak; 7 - spojna čaura; 8 - impregnisani kanap



Sl. 26.18. Kablovska spojnica "Raychem" 10 kV, za kabl I(N)PO 13



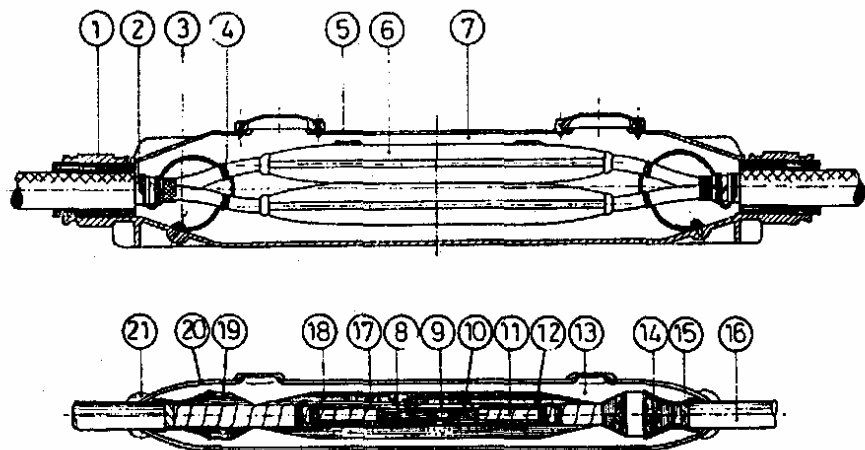
Sl. 26.19. Kablovska glava za unutrašnju montažu "Raychem" 10 i 20 kV sa uljokazom, za kabl IPZO 13



Sl. 26.20. Kablovska glava za unutrašnju montažu "Raychem" 10, 20 i 35 kV sa uljokazom, za kabl XHP 48 (49) i sl.



Sl. 26.21. Kablovska glava sa spoljašnju montažu "Raychem" 10, 20 i 35 kV za kabl XHP 48 (49) i sl.
(Broj izolacionih šešira: za 10 kV 2 kom; za 20 i 35 kV 3 kom)



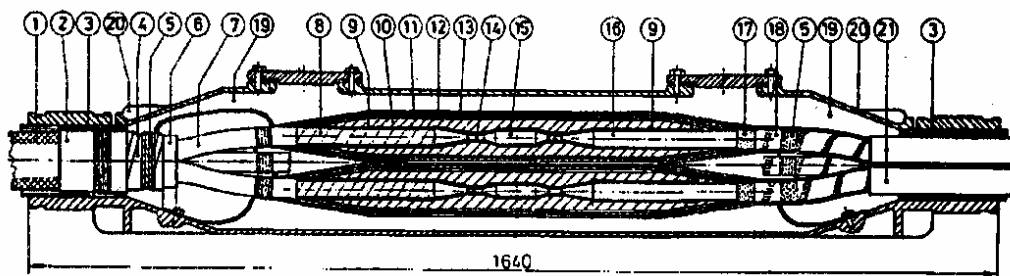
Sl. 26.22. Prava kablovska spojnica KS 1640/HE, 35 kV

- 1 - impregnirana jutana traka; 2 - uzemljenje armature; 3 - zavrtanj za uzemljenje;
- 4 - spoj omotača sa armaturom; 5 - zaštitna spojnica KS 1640/HE;
- 6 - unutrašnja olovna spojnica; 7 - bitumenska kablovska masa; 8 - bakarni provodnik;
- 9 - čaura za spajanje provodnika; 10 - popuna od impregnisanog i svilenog konca;
- 11 - stepenovana izolacija; 12 - popuna od svilenog konca i papirne trake;
- 13 - visokonaponski kablovski kompaund; 14 - deflektor od olovne žice;
- 15 - grafitni papir; 16 - olovni plašt žile; 17 - papirni cilindar br. 1; 18 - papirni cilindar br.2;
- 19 - papirni cilindar br. 3; 20 - olovna spojnica KSU;
- 21 - lemljeni spoj olovnog plašta i olovne spojnice



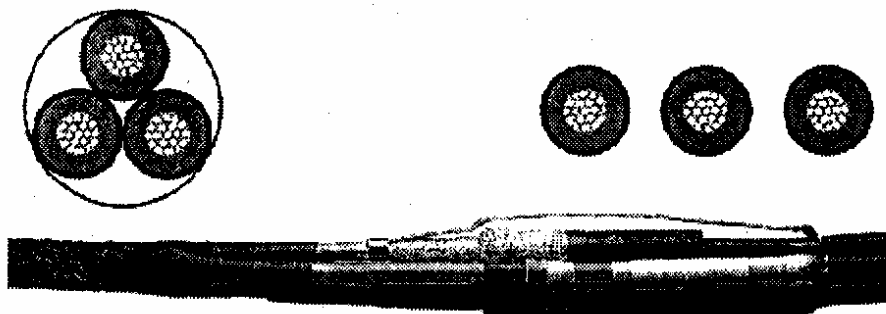
Sl. 26.23. Kablovska spojnica "Raychem" 10, 20 i 35 kV za kabl tipa I(N)PZO 13

Montaža kablovske spojnice proizvodnje "Raychem" 10, 20 i 35 kV za kabl tipa I(N)PZO 13 izvodi se tako što se oba kraja kabla zaptivaju i ekranizuju pomoću provodnih cevi i razdelnih kapa. Deo gde se kabl račva, se pre toga, ispuni sa žutom trakom za popunu, a papirna izolacija žila kabla pojačava se sa prozirnim cevima otpornim na ulje. Obe papirne strane kabla se pomoću ovog postupka pretvaraju u plastični ekranizovani kabl. Dalja montaža ove spojnice u potpunosti odgovara montaži spojnicama za kablove sa izolacijom od plastične mase. Područje čaure za spajanje prvo se omota žutom trakom a zatim se prekrije cevima za kontrolu električnog polja. Na kraju se postavi ekranizovane izolaciono telo. Završetak spojnice čini bakarna mrežica, kućište od lameliranog čeličnog lima kao i spoljna izolaciona cev radi zaptivanja spoja.

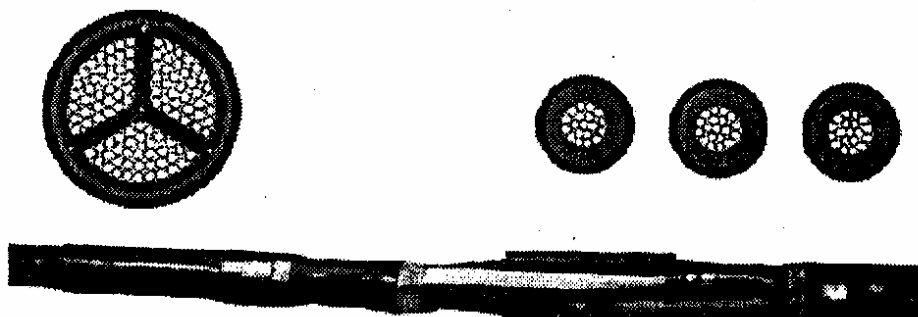


Sl. 26.24. Prelazna spojnica 35 kV kablova ("papirnog" i XPE)
(prema H.P. "kablovi" - Jagodina)

- 1 - papirom izolovan kabl 35 kV; 2 - samolepljiva PVC traka; 3 - hesijan; 4 - armatura;
5 - Cu fleksibilno kalaisano uže; 6 - ispuna; 7 - olovni plašt; 8 - papirna izolacija;
9 - traka TRI-SIL N° 20; 10 - izolaciona traka W 962 EPR; 11 - poluprovodna traka N° 17;
12 - mrežasta Cu traka N° 15; 13 - termoplastična traka N° 85; 14 - provodnik;
15 - spojna čaura; 16 - polietilenska izolacija; 17 - poluprovodni sloj kabla XPE;
18 - zaštitni provodnik XPE kabla; 19 - bitumenska masa SP;
20 - livena zaštitna spojnica KS 1640; 21 - PVC plašt
Napomena: Spojna čaura mora da bude sa pregradom u sredini.



Sl. 26.25. Prelazna kablovska spojnica "Raychem" 10, 20 i 35 kV
za kabl tipa I(N)PZO 13 i XHP 48 (49) i sl.



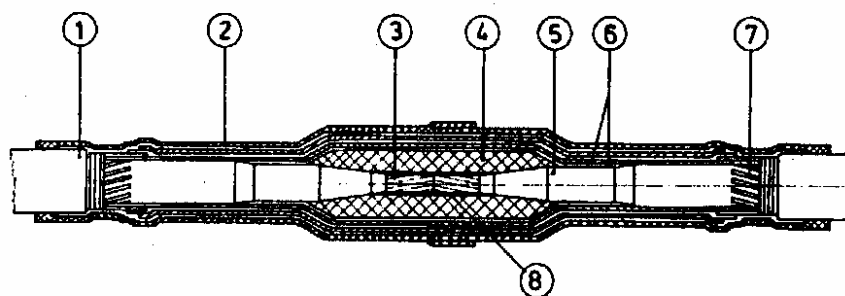
Sl. 26.26. Prelazna kablovska spojnica "Raychem" 10, 20 i 35 kV
za kabl tipa I(N)PO 13 i XHP 48 (49) i sl.

VISOKI NAPON

Montaža kablovskih glava i spojnice visokog napona predstavlja delikatan posao.

Naročita pažnja se poklanja konstruisanju kablovskih spojnice i glava za kablove izolovane XPE, jer se na tim mestima narušava radijalno električno polje koje postoji u kablju.

Kablovska spojnica sa procesom vulkanizacije se izvodi sa polietilenskim trakama koje se vulkanizuju u metalnim kalupima sa električnim grejačima. Pri procesu vulkanizacije održava se određena temperatura i pritisak tako da u njoj ne nastanu šupljine.

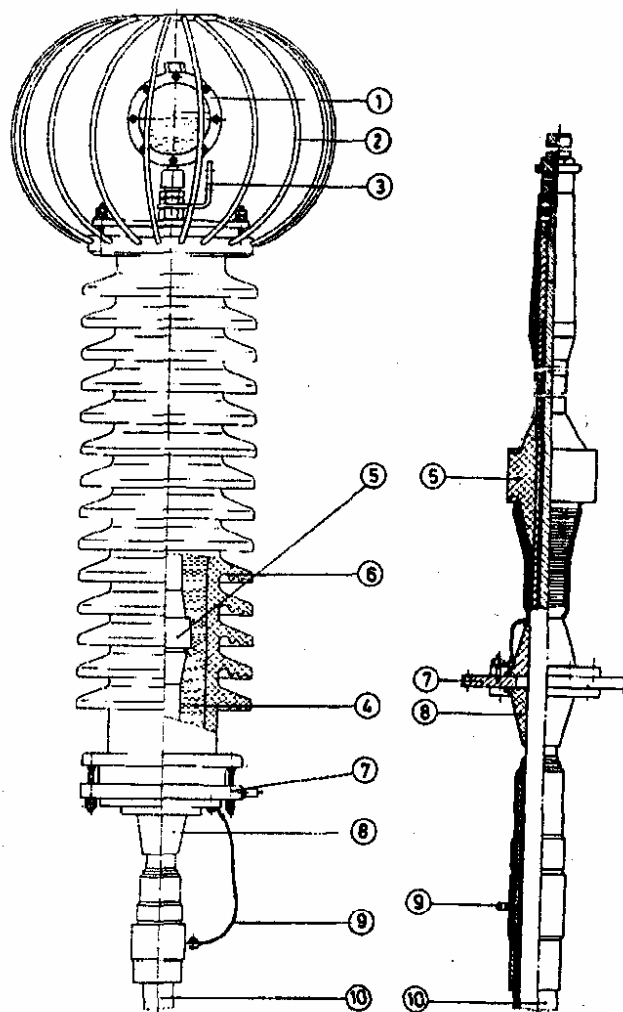


Sl. 26.27. Kablovska spojnica 110 kV za XPE kablove
(sa procesom vulkanizacije)

- 1 - kabl 110 kV; 2 - termoskupljajuća cev; 3 - provodnik; 4 - traka izolaciona-polietilenska;
5 - izolacija kabla koja se vulkanizuje; 6 - poluprovodni slojevi;
7 - Cu žice električne zaštite; 8 - poluprovodna traka

Posebna pažnja se posvećuje motanju i vulkanizovanju poluprovodne trake na provodnik. Ni u kom slučaju ne bi se smelo desiti da se traka odlepi i poremeti električno polje. Ova traka se posle motanja vulkanizuje zagrevanjem pomoću električne pegle kojom se više puta prelazi preko namotanih traka.

Al provodnici se spajaju zavarivanjem u argonu, kako bi se izbegla oksidacija spoja, a njegov kvalitet se ispituje rentgenskim zracima.



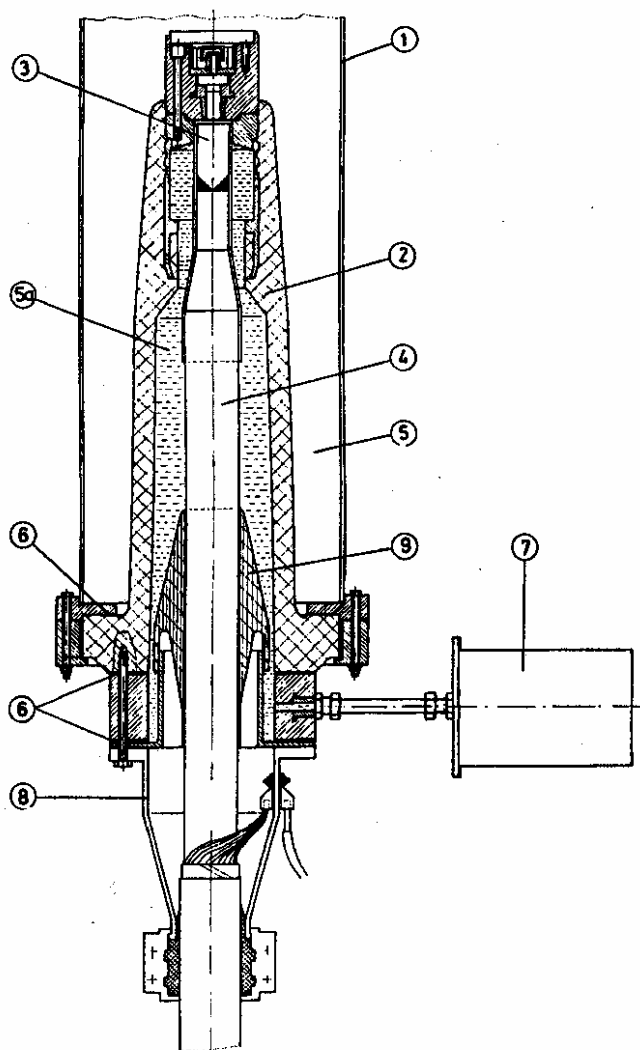
Sl. 26.28. Kablovska glava za spoljašnju montažu za kabl XPE 110 kV
1 - kompenzacioni sud; 2 - zaštitni ekran; 3 - kontaktna šina; 4 - silikonsko ulje; 5 - deflektor; 6 - porcelanski izolator; 7 - donja ploča; 8 - gumena zaptivan čaura; 9 - uže za uzemljenj; 10 - kabl 110 kV

Za uvođenje XPE kablova u razvodna postrojenja sa gasom SF₆ koriste se konstruisane kablovske glave koje predstavljaju integralni deo postrojenja. Stoga ne sme doći do mešanja dva izolaciona medija: SF₆ i silikonskog ulja ili njihovog isticanja. Ove kablovske glave treba da odgovaraju IEC - Publication 859 (1986.): Cable connections for gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages of 72,5 kV and above.

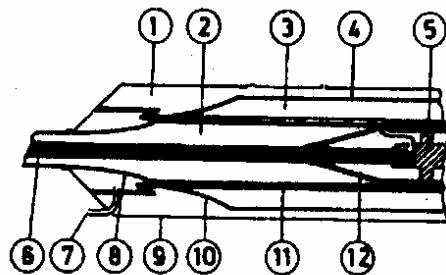
Kod kablovskih glava u postrojenjima sa gasom može se javiti, pri komutacionim prenaponima, potencijalna razlika usled različitih induktivnih otpora između metalnog kućišta kablovske glave i metalnog omotača - električne zaštite kabl. Ove pojave mogu imati za posledicu oštećenje spoljašnjeg ekrana u podnožju kablovske glave.

"Stop" kablovska spojnica se primenjuje kod kablova sa niskim pritiskom ulja i ona služi da kao i obične spojnice spoje električno dve deonice kabla a i da ih hidraulički razdvoje.

Poslednjih godina naglo je porasla primena prefabrikovanih kablovskih glava i spojnice da bi se smanjio uticaj ljudskog faktora (ručnog rada). Za XPE kablove sve su više u upotrebi kablovske spojnice sastavljene iz fabrički pripremljenih delova, tzv. prethodno odlivene i prefabrikovane kao viši stepen gotovih spojnica. Kod njih je postignut takav raspored linija sila električnog polja da je čak povoljniji no u kابلu. Takođe je i zagrevanje mesta spoja u kablovskoj spojnici manje no kod samog kabla.

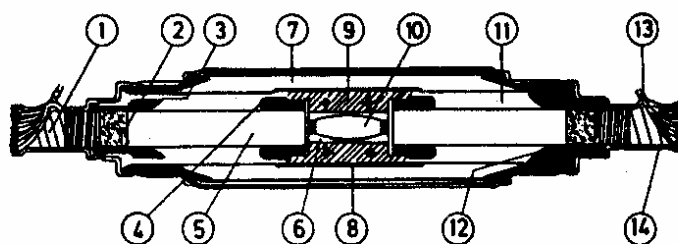


Sl. 26.29. Kablovska glava 110 kV za montažu u SF₆ postrojenje
1 - metalno kućište; 2 - provodni izolator; 3 - kontaktni sistem; 4 - XPE kabl; 5 - gas SF₆;
5a - izolacioni fluid (silikonsko ulje); 6 - zaptivni elementi; 7 - dilataciona posuda;
8 - uvodni sklop; 9 - deflektor



Sl. 26.30. Šematski prikaz kablovske "stop" spojnice za uljni kabl niskog pritiska

- 1 - ulje; 2 - unutrašnji namotaji; 3 - spoljašnji namotaji; 4 - metalna traka; 5 - spojna čaura;
6 - provodnik; 7 - napajanje uljem; 8 - unutrašnji deflektor električnog polja;
9 - spoljašnje bakarno kućište; 10 - spoljašnji deflektor električnog polja;
11 - izolaciona cev; 12 - elektroda za raspodelu električnog polja



Sl. 26.31. Prefabrikovana kablovska spojnica 138 kV za XPE kablove

- 1 - električna zaštita kablova; 2 - električni ekran žile; 3 - prekid za slučaj primene cross-bondinga;
4 - provodni deo za rasterećenje električnog polja; 5 - izolacija kablova;
6 - provodni punilac; 7 - fabrički odliven izolacioni cilindar; 8 - provodna cev;
9 - metalni cilindar za odvođenje toplote; 10 - spoj provodnika;
11 - fabrički odliven izolacioni cilindar; 12 - provodni deo za rasterećenje električnog polja; 13 - veza za spajanje električne zaštite kablova; 14 - spoljašnji omotač kablova

26.4. ISPITIVANJE KABLOVSKIH GLAVA I SPOJNICA

Postupci ispitivanja kablovskih glava i spojnica dati su nemačkim propisima DIN VDE 0278:

- Starksstromkabel - Garnituren mit Nennspannungen U bis 30 kV Allgemeines, Teil 1,
- Starksstromkabel - Garnituren mit Nennspannungen U bis 30 kV Muffen U_0/U über 0,6/1 kV, Teil 2,
- Starksstromkabel - Garnituren mit Nennspannungen U bis 30 kV Muffen $U_0/U = 0,6/1$ kV, Teil 3,
- Starksstromkabel - Garnituren mit Nennspannungen U bis 30 kV Endverschlüsse für Innenraumanlagen U_0/U über 0,6/1 kV, Teil 4,
- Starksstromkabel - Garnituren mit Nennspannungen U bis 30 kV Endverschlüsse für Freiluftanlagen U_0/U über 0,6/1 kV, Teil 5.

Ovim propisima se ne daju samo ispitivanja koja imaju električnu osnovu, već i ona koja uzimaju u obzir i uticaj okruženja (zemljište, atmosfera, voda, kiša i magla itd.).

Tako se u opštem delu (Teil 1) predviđaju sledeća ispitivanja:

- naznačenim podnosivim naizmeničnim naponom,
- jednosmernim naponom,
- naznačenim podnosivim udarnim naponom,
- cikličnim strujnim opterećenjem,
- trajnim naizmeničnim naponom pri cikličnom strujnom opterećenju,
- parcijalna pražnjenja (za kablove sa sintetičkom izolacijom od 6/10 kV),
- termička čvrstoća pri kratkoj vezi,
- mehanička čvrstoća pri kratkoj vezi,
- uticaj vlage na kablovske glave za unutrašnja postrojenja,
- zaptivenost spojnica u vodenom kupatilu,
- izolacioni otpor spojnice 1 kV u vodenom kupatilu,
- temperatura 1 kV spojnice (merenje temperature provodnika).

Tab. 26.4. Naponska ispitivanja¹⁾ kablovskih glava i spojnica iznad 0,6/1 kV prema DIN VDE 0278

Kablovska oprema	Ispitivanje	Ispitni napon (kV) za naznačene napone kabl opreme U_0/U (kV)				Trajanje ispitivanja	Objašnjenje
		3,5/6	6/10	12/20	18/30		
Kablovske glave i spojnice iznad 0,6/1 kV	Naznačeni podnosivi naizmenični napon	27	35	55	75	1 min	Ne sme doći do el. proboja. Kod kabl. glava ni do el. preskoka
	Naznačeni podnosivi udarni napon	60	75	125	170	-	Ne sme doći do el. proboja. Dozvoljen je 1 el. preskok za svaki polaritet
	Jednosmerni napon	28	48	96	144	30 min	Ne sme doći do el. proboja. Kod kabl. glava ni do el. preskoka

¹⁾ Ovde su data čisto naponska ispitivanja. Prema DIN VDE 0278 postoje kombinovana ispitivanja kao: ispitivanje trajnim naizmeničnim naponom sa cikličnim strujnim opterećenjem i sl.

Tab. 26.5. Električna i kombinovana ispitivanja¹⁾ spojnice 0,6/1 kV prema DIN VDE 0278 (Teil 3)

Redosled ispitivanja	Ispitivanje	Vrednosti ispitivanja	Objašnjenje
1	Naznačeni podnosivi naizmienični napon	4 kV, 1 min	Ne sme doći do proboja
2	Cikličko strujno opterećenje	Struja prema VDE 0278. Broj ciklusa 63	Jedan ciklus: 5 h grejanje, 3 h hlađenje
3	Cikličko strujno opterećenje sa ispitivanjem zaptivenosti spojnice u vodenom kupatilu	Struja prema VDE 0278. Broj ciklusa 63	
4	Ispitivanje izolacionog otpora spojnice u vodenom kupatilu.	Merni napon ≥ 100 V	Otpor izolacije ≥ 1 M Ω
5	Naznačeni podnosivi naizmienični napon u vodenom kupatilu.	4 kV, 1 min.	Ne sme doći do proboja

Kablovska glava 110 kV za SF₆ postrojenja koju je razvilo H.P. "Kablovi" - Jagodina i "Energoinvest" - Sarajevo bila je podvrgnuta električnim, toplotnim i mehaničkim ispitivanjima. Tok tipskih ispitivanja je sledeći:

- mehanička ispitivanja provodnog izolatora,
- podnosivim naizmieničnim naponom, 1 min,
- merenje parcijalnih pražnjenja prema IEC 540,
- ispitivanje impulsnim naponom 1,2/50 μ s prema IEC 230 (jednopolno i trolejno),
- ispitivanje naizmieničnim naponom 2,5 U₀ 30 min.
- merenje parcijalnih pražnjenja prema IEC 540,
- ispitivanje cikličnim zagrevanjem prema IEC 540,
- ispitivanje cikličnim zagrevanjem prema nacrtu IEC,
- merenje parcijalnih pražnjenja prema IEC 540,
- ispitivanje impulsnim naponom 1,2/50 μ s prema IEC 230 uz zagrevanje provodnika 5 \pm 2° C iznad maksimalno dozvoljene radne temperature,
- ispitivanje naponom 3U₀, 15 min,
- termička ispitivanja naznačenom strujom,
- ispitivanje termičkom strujom kratkog spoja.

¹⁾ Pored ovih ispitivanja predviđa se i merenje temperature provodnika pri struji prema VDE 0278 (trajanje 15 h). Temperatura ne sme biti veća od 10 K iznad maksimalno trajne dozvoljene temperature kabla.

27. ISPITIVANJE KABLOVA POSLE POLAGANJA

Ustaljena je praksa da se posle polaganja kabla (uključivo izrađene kablovske glave i spojnice) ispituje njegov kvalitet koji može biti izmenjen u periodu od njegove proizvodnje i fabričkog ispitivanja pa do ugradnje. Obično se predviđaju dva ispitivanja:

- ispitivanje izolacije kabla i
- ispitivanje spoljašnjeg omotača kabla.

Ova su ispitivanja naponska, ali se mogu meriti i otpor izolacije, tgδ i sl. U novije vreme se kod kablova sa čvrstom izolacijom mere i parcijalna pražnjenja.

27.1. ISPITIVANJE IZOLACIJE KABLA

Dosadašnje iskustvo pokazuje da je ispitivanje klasičnih kablova jednosmernim naponom zadovoljavajuće.

Međutim, poslednjih godina došlo se do saznanja da primena jednosmernog napona kod kablova sa čvrstom izolacijom ne daje dobre rezultate, pa čak i ugrožava ispravnu izolaciju kabla.

Poznato je da je priroda izolacije klasičnih kablova izolovanih impregniranim papirom u uljnom kompaundu drukčija od savremenih kablova izolovanih polietilenom (PE) i umreženim polietilenom (XPE). U prvom slučaju se radi o polučvrstom dielektriku od papira i ulja, a u drugom slučaju o čvrstom dielektriku. To ima za posledicu i drukčije pojave u izolaciji kad se ona nađe u električnom polju. Kad se kabl sa čvrstom izolacijom podvrgne povišenom jednosmernom naponu stvaraju se u izolaciji vezana električna opterećenja koja mogu duže vreme opstati u njemu što može biti kasnije uzrok električnom probiju. Izolaciona otpornost PE i XPE kablova je $>10^{17} \Omega\text{cm}$, dok je kod papirnih kablova niža (oko $10^{14} \Omega\text{cm}$), te kod njih ne postoji takva mogućnost obrazovanja stalno vezanih električnih opterećenja.

Pri visokonaponskom ispitivanju XPE i PE kablova sa negativnim jednosmernim naponom koji traje 10 do 20 min. mogu se proizvesti dugotrajna prostorna opterećenja, koja pri pozitivnom polutalasu posle priključenja naizmeničnog napona obrazuju jako električno polje i time tzv. "electrical trees". Izolacija će tada biti nepovratno oštećena, te je njen kompletan probij samo pitanje vremena.

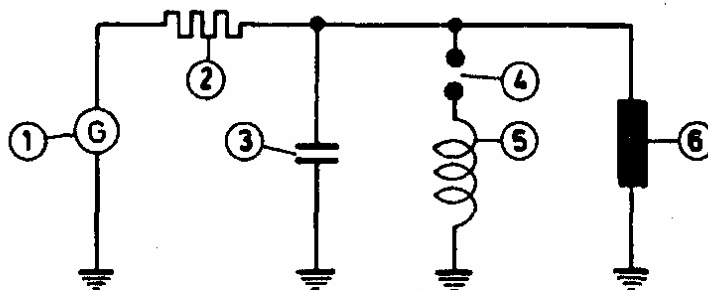
Kod kablova sa sintetičkom izolacijom dosadašnja iskustva, što se tiče ispitivanja jednosmernim naponom, nisu zadovoljavajuća. Samo grube greške se ovim postupkom mogu otkriti.

Nedostatak ispitivanja kablova PE i XPE jednosmernim naponom je mala mogućnost otkrivanja greške na izolaciji kabla i izgledi da se ostvare uslovi za kasniji električni proboj izolacije, doveli su do potrebe razmatranja alternativnog ispitivanja naizmeničnim naponom.

Ispitivanja povišenim naponom frekvence mreže u osnovi ima prednost, jer daje raspodelu napona u izolaciji kakva se ima u pogonu. Međutim, teškoće s ovim ispitivanjima su u obezbeđenju znatnih struja za napon 380 V koji stoji na raspolaganju.

Pri ispitivanju naponom frekvence mreže u kanalu električnog proboja stvara se visoki gasni pritisak koji obustavlja proces električnog pražnjenja. Međutim, ako se primeni ispitni napon vrlo niske frekvence (0,1 Hz), onda ima vremena da se gas difundira u okolinu i time pritisak opadne. Na taj način električni proboj sa vrlo niskim frekvencama se odvija znatno brže no sa 50 Hz.

Sada se smatra da je oscilatorna metoda najprihvatljivija, jer je uređaj jednostavan i ne zahteva veće snage.



Sl. 27.1. Oscilatorna metoda

1 - generator jednosmernog napona; 2 - otpor; 3 - kondenzator;
4 - varničar; 5 - induktivnost; 6 - uzorak za ispitivanje - kabl

Nemačkim normama DIN VDE 0289 (Teil 1) određuju se uslovi ispitivanja položenih i montiranih niskonaponskih i sredjenaponskih kablova (od 0,6/1 kV do 18/30 kV). Na visokonaponske kablove zavisno od tipa odnose se norme: DIN VDE 0256, 0257, 0258 i 0263.

Tab. 27.1. Ispitni naponi kablova 0,6/1 kV - 18/30 kV prema DIN VDE 0289 - Teil 1

Vrsta ispitnog napona	Naznačeni napon kablova U_0/U (kV)					Trajanje ispitivanja (min)
	0,6/1	3,6/6	6/10	12/20	18/30	
Jednosmerni (kV)	5,6 - 8	20 - 29	34 - 48	67 - 96	76 - 108	15 - 30
Naizmjenični (kV)	-	7	12	24	36	15

Za PE i XPE kablove posebno se naglašava da se ispitni naponi odnose na nove kablove - koji nisu bili u pogonu. U slučaju da su već bili u pogonu preporučuje se niži ispitni napon, ali ne veći od $2U_0$. Posle ispitivanja kablove treba rasteretiti preko otpora (100 k Ω , 1000 W).

Tab. 27.2. Ispitni jednosmerni napon kablova 0,6/1 kV - 18/30 kV prema IEC 502 i IEC 55-1

Naznačeni napon kablova U_0/U kV	Papirni kablovi		Kablovi sa sintetičkom izolacijom
	"Pojasni" kablovi	Kablovi s radijalnim el. poljem	
	Ispitni jednosmerni napon (kV)		
0,6/1	6,5	6,0	6,0
3,6/6	23,5	18,5	18,0
6/10	34,0	25,0	25,0
8,7/17	-	37,0	37,0
12/20	-	50,0	50,0
18/30	-	76,0	76,0
Trajanje ispitivanja (min)	5	5	15

Tab. 27.3. Ispitni jednosmerni napon visokonaponskih kablova prema DIN VDE

Naznačeni napon kablova (kV)	Najviši napon opreme (kV)	Naznačeni podnosivi atmosferski udarni napon (temena vrednost) (kV)	Jednosmerni napon (kV)		
			Uljni kabl DIN VDE 0256	Gasni kabl DIN VDE 0257,0258	Kablovi sa sintetičkom izolacijom DIN VDE 0263
26/45	52,0	250	117	117	78
36/60	72,5	325	162	162	108
64/110	123,0	450	225	288	192
		550	275		
76/132	145,0	450	225	342	228
		550	275		
		650	305		
87/150	170,0	550	275	392	261
		650	325		
		750	350		
127/220	245,0	750	375	508	-
		850	425		
		950	475		
		1050	520		
220/380	420,0	1050	525	-	-
		1175	590		
		1300	650		
		1425	715		
Trajanje ispitivanja (min)			30	60	15

Prema IEC 141-1 i 141-4 za uljne kablove jednosmerni ispitni naponi su kao u DIN VDE 0256 samo što je vreme ispitivanja kraće: 15 min. Za gasne kablove prema IEC 141-2 i 141-3 jednosmerni ispitni naponi su niži nego prema odgovarajućim DIN VDE 0257 i 0258.

Za kablove sa sintetičkom izolacijom prema IEC-Pub. 20A - 122 jednosmerni ispitni naponi su kao u DIN VDE 0263. Međutim, ostavlja se mogućnost ispitivanja sa naznačenim naponom kabla U u trajanja 5 min i naponom U_0 u trajanju 24 h (IEC 840-Test for power cables with extruded insulation for rated voltages above 30 kV ($U_m = 36$ kV) up to 150 kV ($U_m = 170$ kV)).

Našim nacionalnim standardima visina i trajanje ispitnog napona kablova posle polaganja svrstani su u tri grupe zavisno od tipa kabla:

- kablovi izolovani impregnisanim papirom do $U_0 = 35$ kV,
- PVC kablovi i
- PE, XPE i EPR kablovi.

Ovi propisi su saglasni sa IEC 502 i IEC 55-1 izuzev za PVC kablove koji se našim standardima posebno obrađuju i daju niže vrednosti nego za PE i XPE kablove.

ISPITIVANJE KABLOVA SA IZOLACIJOM OD PAPIRA IMPREGNISANOG U ULJNOM KOMPAUNDU

Ispitivanje kablova sa izolacijom od papira impregnisanog u uljnom kompaundu za napone do 60 kV određeno je našim nacionalnim standardom JUS N. C5. 025 (1976.), i to za kablove sa električnom zaštitom (sa radijalnim električnim poljem) i za tzv. "pojasne" kablove (sa neradijalnim električnim poljem).

Tab. 27.4. Ispitivanje papirnih kablova sa električnom zaštitom, odnosno metalnim plaštom prema JUS N.C5.025

Vrsta ispitnog napona	Naznačeni napon kabla U_0/U (kV)						Trajanje ispitivanja (min)
	0,6	3,6	6	12	20	35	
Jednosmerni (kV)	6	18,5	25	50,5	84	147	5

Tab. 27.5. Ispitivanje papirnih kablova sa "pojasnom" izolacijom, prema JUC N. C5.025

Vrsta ispitnog napona	Naznačeni napon kabla U_0/U (kV)			Trajanje ispitivanja (min)
	0,6	3,6	6	
Jednosmerni (kV)	7	24	34	5

Za ispitivanje kablova sa električnom zaštitom ispitni napon se priključuje između provodnika i njegove električne zaštite. Kod "pojasnih" kablova ispitni napon se priključuje redom između jednog provodnika i svih ostalih provodnika međusobno spojenih sa metalnim omotačem.

Ovim standardom se daje mogućnost ispitivanja i naizmeničnim naponom, ali se preporučuje ispitivanje jednosmernim naponom.

ISPITIVANJE KABLOVA SA IZOLACIJOM OD PVC

Ispitivanje kablova sa izolacijom od PVC, za napone do 10 kV određeno je našim nacionalnim standardom: JUS N.C5.225 (1983.).

*Tab. 27.6. Ispitivanje kablova sa izolacijom od PVC
prema JUS N.C5.225*

Vrsta ispitnog napona	Naznačeni napon kablova U_p/U (kV)			Trajanje ispitivanja (min)
	0,6	3,6	6	
Jednosmerni (kV)	4,5	14,5	24	15
Naizmenični (kV)	2,5	7,5	10,5	15

Spoljašnji omotač kablova se ispituje kod kablova 3,6/6 kV i 6/10 kV jednosmernim naponom 5 kV u trajanju od 5 min.

ISPITIVANJE KABLOVA SA IZOLACIJOM OD XPE, PE I EPR

Ispitivanje kablova sa izolacijom od XPE, PE i EPR za napone od 1 kV do 35 kV određeno je našim nacionalnim standardima JUS N.C5.235 (1987.) i N.C5.245 (1987.).

*Tab. 27.7. Ispitivanje kablova sa izolacijom od XPE, PE i EPR
prema JUS N.C5.235 i 245*

Vrsta ispitnog napona	Naznačeni napon kablova U_p/U (kV)					Trajanje ispitivanja (min)
	0,6	3,6	6	12	20	
Jednosmerni (kV) ¹⁾	6	18	25	50	84	15
Naizmenični (kV)	1	6	10	20	35	5
Naizmenični fazni (kV)	0,6	3,6	6	12	20	1440 (24 h)

¹⁾ Primena jednosmernog ispitnog napona za nazivne napone 6, 12 i 20 kV se ne preporučuje iako se ovim standardom navode (napomena autora).

27.2. ISPITIVANJE SPOLJAŠNJEG PLAŠTA KABLOVA

Ne retko se smatra da se naponskim ispitivanjem spoljašnjeg PVC ili PE plašta kabla garantuje dugotrajna zaptivenost kabla od prodora vode u njega. Normalno je da se od ovoga isključuju slučajevi naknadnih građevinskih radova na trasi ispitanog kablovskog voda kao što su ukrštanja sa drugim podzemnim instalacijama ili opravke na samom kablju kada može doći do oštećenja plašta kabla.

Istraživanja su pokazala da ispitivanja plašta kabla povišenim jednosmernim naponom ne moraju da otkriju oštećena mesta na njemu ako se obavljaju u suvom periodu, kad nema kiša a tlo je suvo.

Neke inostrane firme (F&G) zbog sleganja rova, eventualnih oštećenja plašta kabla pri naknadnim građevinskim radovima i sl. predlažu ispitivanje plašta jedanput godišnje.

Preporuka IEC 229 (1982.) predviđa za ispitivanje spoljašnjeg plašta jednosmerni napon 4 kV po mm debljine plašta, a ne veći od 10 kV u trajanju od 1 min.

28. ODREĐIVANJE GREŠAKA NA KABLOVIMA

28.1. OPŠTE

Određivanje greške na kablju zavisi od više činilaca: vrste izolacije kabla, konstrukcije kabla, tipa električne mreže i primenjene zaštite, načina uzemljenja zvezdišta električne mreže, veličine struje kratkog spoja i td.

Kod izolacije kabla od PVC, PE i XPE postoje znatne teškoće u prevođenju greške u niskoomsku. Razlog ovome leži u činjenici da se ove izolacije tope pri pregorevanju. Impregnisani papir u ovim slučajevima se drukčije ponaša, jer se pri pregorevanju obrazuje most od ugljenisanog papira. Ipak ako određivanje greške duže traje na mesto greške meže doći ulje tako da će se povećati otpor greške i otežati određivanje njenog mesta.

Kod kabla bez metalnog plašta ili električne zaštite kao što su niskonaponski kablovi, većina grešaka se pretvara u međufazne spojeve ili spojeve faze sa "0" provodnikom. I kad dođe do proboja faze prema zemlji zaštita kabla - osigurači uglavnom neće reagovati zbog nedovoljne struje kvara kojoj se suprotstavljaju relativno visoki otpori.

Kod papirnih kablova sa neradijalnim električnim poljem greške mogu biti jednopolni kratki spojevi ili zemljospojevi ili međufazni kratki spojevi. Ako je zvezdište električne mreže izolovano onda su u pitanju vrlo male struje zemljospoja, pa je mesto greške relativno slabo određeno. Kod zvezdišta uzemljenih preko rezistanse stanje je povoljnije, jer se ovde radi o strujama jednopolnog kratkog spoja od nekoliko stotina ampera.

Kad su u pitanju kablovi sa radijalnim električnim poljem onda su greške jednopolni kratki spojevi ili zemljospojevi ako se radi o izolovanom zvezdištu. Iz ovoga sledi da u proces određivanja greške na kablju treba uključiti uzimanje podataka o reagovanju zaštite, jer saznanje koja je zaštita reagovala (zemljospojna ili kratkospojna) može pomoći u bržem određivanju greške.

Takođe mogućnost da se električna mreža može sekcionisati i izdvojiti deonice u kvaru olakšava određivanje mesta greške. Kablovske mreže sa "T" kablovskim spojnicama predstavljaju poseban problem za određivanje mesta greške.

Ovde treba istaći da svako izlaganje kabla povišenom naponu nije preporučljivo, jer doprinosi dodatnom naprezanju izolacije kabla. Ovo je naročito izraženo kod kablova sa tzv. čvrstim dielektrikom (PE i XPE), jer u njima pri povišenom jednosmernom naponu ostaju vezana električna opterećenja koja mogu kasnije biti uzrok električnom probouju. Stoga se preporučuje da se određivanje greške na kablju sprovodi s malim naponom, manjim nego pri ispitivanju. Zavisno od situacije treba težiti da ni trajanje određivanja greške povišenim naponom ne bude duža od vremena propisanog za ispitivanje posle polaganja i montaže kabla.

Određivanje mesta greške na kablju ima tri faze:

- ustanovljavanje greške,
- predodređivanje mesta greške i
- tačno određivanje mesta greške.

Kvarovi koji dovode do ispada kabla iz pogona, ili pak upozorenja preko odgovarajuće signalizacije su:

- jednopolni kratak spoj ili zemljospoj između faznog provodnika i "0" provodnika ili metalnog plašta kabla,
- višefazni kratki spoj između dva i više provodnika,
- oštećenje ili prekid provodnika,
- oštećenje ili prekid metalnog plašta kabla,
- curenje ulja ili gasa (kod uljnih odnosno gasnih) kablova.

Električne greške su omskog karaktera i kreću se od 0 do ∞ vrednosti zavisno od prirode greške. Sa gledišta određivanja grešaka na kablovima, može se uzeti vrednost otpora greške od 0 do 5 k Ω kao niska a iznad 50 k Ω kao visoka vrednost.

Razlikuju se dve vrste grešaka:

- intermitirajuće i
- stalni električni preskok.

Pored ovih grešaka postoje greške na spoljašnjem zaštitnom plaštu kabla za koje ne postoji najava ili signalizacija.

Garancija od prodora vlage u kabl je dobra zaptivenost kabla spoljašnjim izolacionim plaštom, na primer od PVC ili PE.

28.2. PREDODREĐIVANJE MESTA GREŠKE NA KABLOVIMA

Pod predodređivanjem mesta greške na kablju podrazumeva se:

- određivanje vrste greške (međufazni ili zemljospoj odnosno, jednopolni kratki spoj),
- ocena visine električnog otpora greške,
- izbor metode za predodređivanje mesta greške i njena primena i
- izbor metode za tačno određivanje mesta greške.

Rezultati merenja otpora izolacije i otpora električnog kola predstavljaju koristan podatak na osnovu koga se može izabrati odgovarajuća metoda za predodređivanje greške na kablju.

Predodređivanje mesta greške na kablju omogućuje primenu odgovarajuće metode za njeno tačno određivanje.

OTPOR IZOLACIJE

Otpor izolacije kabla zavisi od više faktora:

- vrste izolacije,
- debljine izolacije,
- preseka provodnika,
- dužine kablovskog voda,
- temperature,
- postojanju vlage u kablju i sl.

Visina izolacionog otpora, uopšteno posmatrano nije pouzdana mera sigurnosti kabla. Prisustvo vlage u kablju prouzrokuje niže izolacione otpore.

Specifični električni otpori izolacije za pojedine vrste izolacije date su u poglavlju 12.6. OTPOR IZOLACIJE.

Električno odvođenje duž kabla je mera kvaliteta njegove izolacije. Kod kablova električno odvođenje je dato izrazom:

$$G = \frac{2\pi \rho_i}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \quad (28.1.)$$

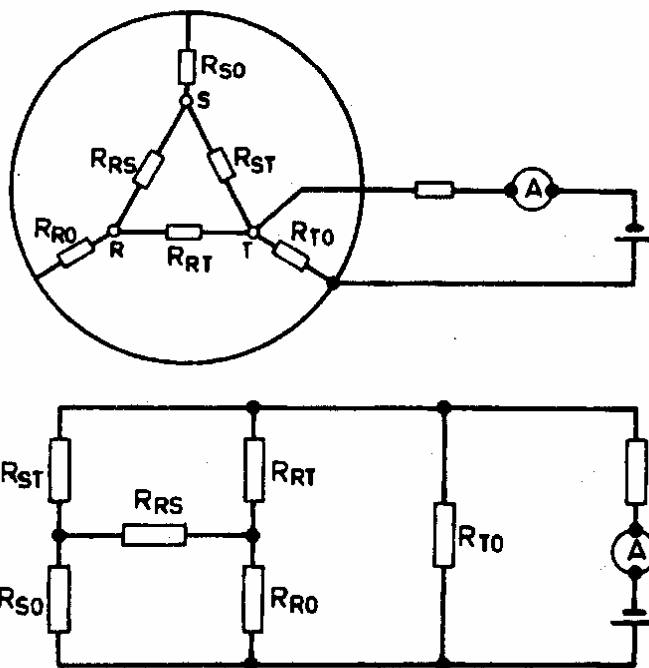
gde je:

- ρ_i - specifični električni otpor izolacije pri 20° C (Ωm),
- d_1 - prečnik unutrašnjeg slaboprovodljivog sloja,
- d_2 - spoljašnji prečnik izolacije u jedinici kao i d_1 ,

Ukoliko je dužina kablovskog voda veća utoliko je električan odvod veći, te je njegov izolacioni otpor manji.

Uticao temperature na otpor izolacije je znatan. U stvari otpor izolacije raste sa padom temperature (vidi poglavlje 12.6. OTPOR IZOLACIJE).

Mereći otpor izolacije "pojasnog" kabla ne meri se samo otpor priključene žile već i ostali otpori.

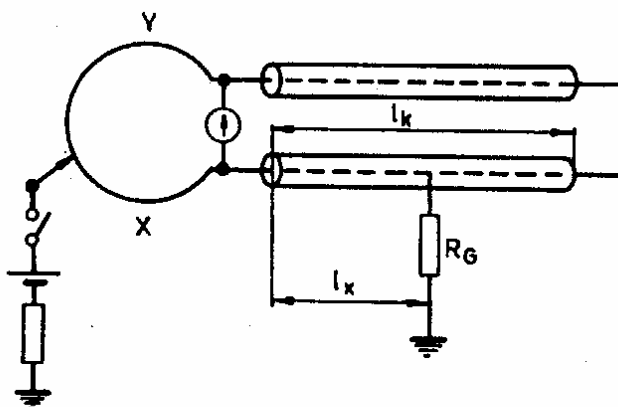


Sl. 28.1. Šematski prikaz merenja otpora izolacije "pojasnog" kabla

KLASIČNE METODE

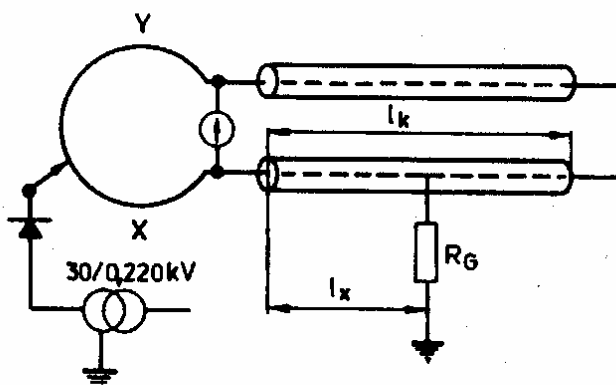
Primena mernih mostova iako je poznata već više decenija može i sada biti od koristi. Za otpore greške manje od 50 kΩ može se koristiti više mernih mostova kao: Graf-ov, Murray-ov, Thomson-ov, Wheatston-ov i sl. Oni moraju imati pomoćne veze. Za njih se mogu koristiti posebno položene veze ili još praktičnije, paralelno već položeni vodovi. Kod Murray-ovog mosta traženo rastojanje od greške određuje se na osnovu izraza:

$$l_x = \frac{2l_k}{Y} \left(1 + \frac{R_G}{X} \right) \quad (28.2.)$$



Sl. 28.2. Murray-ov merni most
R_G - otpor greške

Za veće otpore greške od 50 kΩ koristi se visokonaponski most koji je u principu isti kao i Murray-ov most s tim da se napajanje izvodi transformatorom za podizanje napona na 30 kV i jednim ispravljačem.



Sl. 28.3. Visokonaponski Murray-ov most

IMPULS-EHO POSTUPAK

Pre oko 40 godina prvi put je primenjen impuls-eho postupak za određivanje grešaka na kablovima. Proizvođači merne opreme ovu metodu često nazivaju impulsno-refleksiona. Impuls-eho postupak se zasniva na prelamanju visokofrekventnih impulsa na mestu promene talasnog otpora kabela. Impulsni talasi određenog oblika i u određenim intervalima šalju se u kabl i na mestu promene talasnog otpora prelamaju se i odbijaju nazad kao ehoimpuls. Na osnovu vremena putovanja talasa određuje se mesto promene talasnog otpora tj. greške na kابلu:

$$l_x = t_x \cdot \frac{v}{2} \quad (28.3.)$$

gde je:

- l_x - rastojanje od mesta greške (m)
- t_x - vreme prostiranja talasa (s),
- v - brzina prostiranja impulsa (m/s),

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (28.4.)$$

- c - brzina svetlosti (m/s),
- ϵ_r - relativna dielektrična konstanta dielektrika kabela

U poglavlju 12.3. KAPACITET date su vrednosti relativne dielektrične konstante.

Brzina prostiranja impulsa kroz razne vrste dielektrika kreće se od: 100 do 200 m/μs. Za kablove PP 00, 1 kV iznosi od 100 do 170 m/μs, a za kablove IPO, 10 kV od 150 do 160 m/μs (vidi 12.7. TALASNA IMPEDANSA).

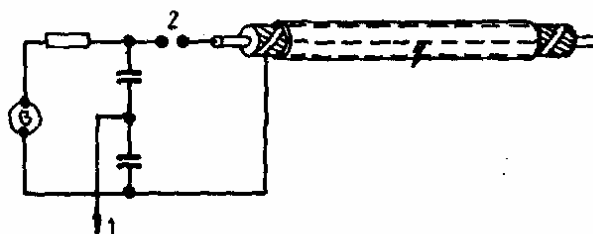
Ako je provodnik u kratkom spoju ili zemljospoju odbijen talas je negativan. Kod prekida provodnika odbijeni talas je pozitivan.

Otpor greške ove metode predstavlja ograničenje, jer je primenljiva za male otpore svega do oko 500 Ω. Stoga je uobičajeno da se najpre odredi priroda i vrednost otpora greške, pa ako je otpor visok da se pristupi njegovom pregorevanju.

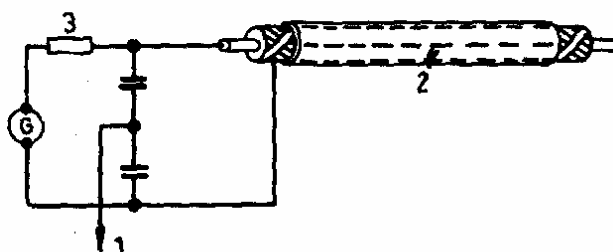
Sa uređajem za pregorevanje otpor greške se može sniziti praktično na kratku vezu (<1 Ω) i to zahvaljujući obrazovanju ugljenisanog mosta. To

je slučaj kod papirnih kablova, gde se otpor za jedno određeno vreme bitno ne menja. Međutim, i ovde može doći do promene - povećanja otpora greške ako ima mogućnosti da uljni kompaund natopi mesto greške. Takav slučaj je spoj u kablovskoj spojnici ili glavi, gde uljni kompaund okružuje mesto greške. U ovakvim slučajevima što duže traje određivanje mesta greške to su manji izgledi da se ona odredi, jer otpor greške može znatno porasti. Kod plastičnih materijala (PVC, XPE i sl.) pregorevanje ne daje dobre rezultate zbog prirode ovih materijala. Posebne teškoće nastaju ako je kabl bez metalnog plašta (kablovi PP 00 i sl.) jer se u pregorevanje mesta greške uključuje i samo zemljište.

Pregorevanje mesta greške ranije je bilo dosta korišćeno ali uvođenjem zvučne metode, kojom se tačno određuje mesto greške, ono je izgubilo na značaju. Ova metoda pretpostavlja mogućnost električnog preskoka na mestu greške, a time i uslov da je otpor greške višeomski.



Sl. 28.4. Metoda sa udarnim generatorom
G - generator; 1 - veza na merni impuls-eho uređaj; 2 - varničar



Sl. 28.5. Oscilatorna metoda
1 - veza na merni impuls-eho uređaj; 2 - mesto greške - rasterećenja električnog opterećenja kablova; 3 - visokoomski otpor ($10 \times Z$ talasna impedansa voda)

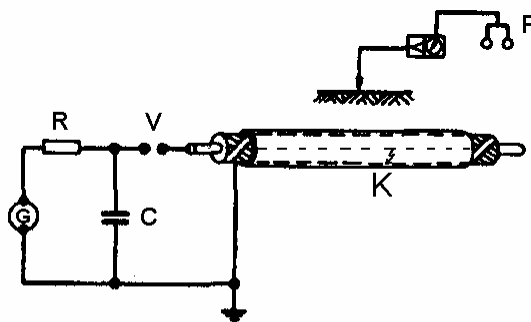
Takođe je u primeni i tzv. strujno impulsna metoda, gde se koristi strujni transformator za merenje visokofrekventnih učestanosti na mesto kapacitivnog delitelja napona.

28.3. TAČNO ODREĐVANJE MESTA GREŠKE

U principu tačno određivanje mešta greške predstavlja rutinski posao ako je predodređivanje greške izvedeno korektno.

ZVUČNA METODA

Sada se smatra da je najuspešnija primena zvučne metode u određivanju tačnog mesta greške na kablju.



Sl. 28.6. Šematski prikaz zvučne metode

G - izvor jednosmerne struje; C - udarni kondenzator; R - otpornik; V - varničar;
K - mesto greške; P - prijemnik, mikrofon sa pojačanjem i slušalicama

Ovom metodom se čak 80% svih grešaka na kablovima uspešno određuje. Princip rada ove metode zasniva se na rasterećenju električnog naboja preko varničara.

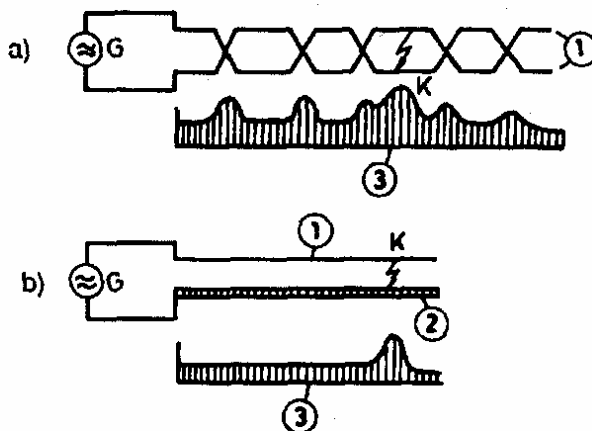
Ovako stvoren putujući naponski talas strmog čela rasterećuje se na mestu greške uz prasak. Pomoću mikrofona, pojačivača i slušalica lako se određuje mesto greške. Ako je u pitanju greška između dva provodnika trofaznog kabla onda se jedan od provodnika mora uzemljiti.

Ova metoda nije primenjivana za greške koje predstavljaju direktan kratak spoj. Takođe nije prikladna ako je kabl duboko položen u zemlju, jer je prasak prigušen.

TONFREKVENTNA METODA

Ovo je relativno stara metoda sa ograničenom upotrebom, jer pretpostavlja da je na mestu greške praktično kratka veza ($< 1 \Omega$). Tonski generator se priključuje ili između dva provodnika ili provodnika i metalnog plašta zavisno o kakvoj se greški radi.

Smetnje prijema signala nastaju zbog drugih metalnih instalacija, cevovoda, kablova i sl. Takođe i nadzemni vod može predstavljati uzrok smetnji.



Sl. 28.7. Šematski prikaz tonfrekventne metode
a) greška između provodnika; b) greška između provodnika i metalnog plašta
G - tonfrekventni generator; K - mesto greške - kratkog spoja; 1 - provodnik;
2 - metalni plašt kablova; 3 - jačina tonskog signala;

28.4. ODREĐIVANJE MESTA PARCIJALNIH PRAŽNJENJA

Dosadašnja saznanja, naročito iskustvena, pokazala su da parcijalna pražnjenja u dielektriku kablova smanjuju njegovu pouzdanost i životni vek. Stoga se u proizvodnji kablova sa čvrstim dielektrikom (PE, XPE), pošto su oni osetljivi na ovu pojavu, sve dužine kablova podvrgavaju ispitivanju na parcijalna pražnjenja. Fabričko ispitivanje kablova po usvojenim standardima u koje je uključeno i ispitivanje na parcijalna pražnjenja predstavljalo bi dobru garanciju za njegov uspešan pogon. Međutim, nestručnom montažom kablovskih spojnica i glava ili oštećenjem kablova pri polaganju, razdvajanjem ili deformacijom poluprovodnih slojeva i sl. mogu se javiti previsoka parcijalna pražnjenja. U stvari sada se smatra da je ispitivanje položenog i montiranog kablova na parcijalna pražnjenja prava potvrda da su kablovske glave i spojnice ispravno montirane i kabl ispravno polagan.

Princip merenja parcijalnih pražnjenja zasniva se na merenju pada napona izazvanog parcijalnim pražnjenjima u šupljini dielektrika kablova. Svaki put kada dođe do paljenja električnog pražnjenja u šupljini dielektrika kablova dolazi do pada napona. Parcijalno pražnjenje se onda gasi a napon poraste te se proces pražnjenja opet uspostavlja. To pulsiranje napona može se meriti na više načina (metoda).

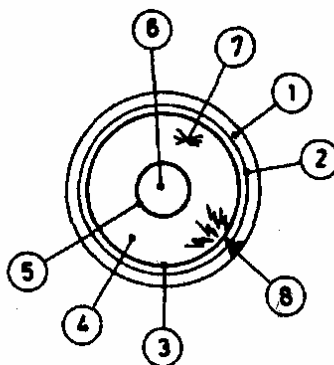
Teškoće u određivanju mesta parcijalnih pražnjenja nastaju kad na kablju postoji više takvih mesta. Na osnovu više putujućih talasa reflektovanih sa više mesta i kraja kabla koji se međusobno preklapaju, na prvi pogled moglo bi se reći da je nemoguće odrediti mesta parcijalnih pražnjenja. Međutim, ako su izabrani instrumenti dobrih karakteristika i ako se poznaju procesi putujućih talasa mogu se uspešno odrediti mesta parcijalnih pražnjenja. Tokom jednog vremenskog perioda svi dolazeći talasi se superponiraju (firma "Tettex" za svoje instrumente daje više od 5 μ s). U vremenskim periodima manjim od ovog vremena može se posmatranje na osciloskopu svesti na prvo, najbliže mesto parcijalnih pražnjenja. I tako redom odrediti sva mesta na osnovu vremena putovanja talasa.

Kako su smetnje van laboratorijskih uslova znatno veće pribegava se posebnim merama kao što je primena autonomnog izvora napajanja, čime se onemogućuju smetnje koje dolaze od napojne elektrodistributivne mreže. Takođe da bi se izbegli glomazni i veliki uređaji za ispitivanje (transformator i sprežni elementi) primenjuje se znatno niža frekvencija: 0,1 Hz. Na taj način u odnosu na 50 Hz snaga uređaja je manja u odnosu 50/0,1 tj. 500 puta. Pokazalo se u praksi da se nastanak i gašenje parcijalnih pražnjenja javlja pri istim naponima za 0,1 i 50 Hz. Povoljnost frekvencije 0,1 Hz je u lakšem odstranjivanju smetnji koje su sinhronne sa frekvencom 50 Hz.

28.5. ODREĐIVANJE MESTA GREŠKE NA SPOLJAŠNJEM PLAŠTU KABLA

Određivanje mesta greške na spoljašnjem izolacionom plaštu kabla je od značaja jer se njime omogućuje otkrivanje mesta gde vlaga može prodreti u kabl i kasnije izazvati koroziju metalnog plašta i električni proboj izolacije kabla. U stvari to su dugotrajni procesi koji mogu trajati godinama. Kad dođe do oštećenja spoljašnjeg plašta kabla, te se naruši radijalno električno polje, započinju dugi procesi parcijalnih pražnjenja. Mesto oštećenja se otkriva posle naponskog ispitivanja spoljašnjeg izolacionog plašta koje se obavlja posle polaganja kabla ili u određenim vremenskim periodima kao preventivno ispitivanje. Kapacitet metalnog plašta kabla prema zemlji, zahvaljujući tankom spoljašnjem plaštu prema dimenzijama kabla je veliki.

Kao vrednost ispravnosti spoljašnjeg PVC plašta smatra se struja odvoda od oko 0,8 mA po kilometru voda odnosno otpor izolacije od 2,5 M Ω .



Sl. 28.8. Oštećenje spoljašnjeg plašta kabela

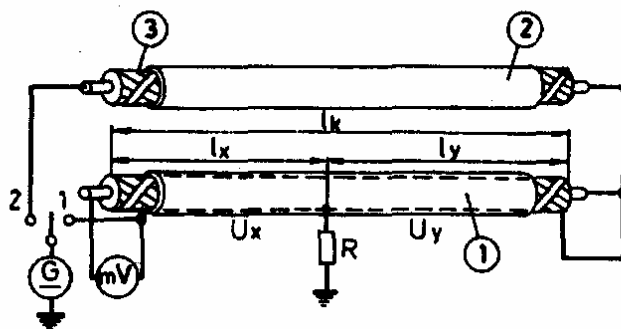
1 - spoljašnji izolacioni plašt; 2 - metalni plašt ili električna zaštita od Cu žice i trake;
3 - spoljašnji slaboprovodljivi sloj; 4 - dielektrik kabela; 5 - unutrašnji slaboprovodljivi sloj;
6 - provodnik; 7 - parcijalna pražnjenja; 8 - oštećenje

Kao i za određivanje greške na dielektriku kabela i ovde se koristi tzv. predodređivanje greške. Na taj način štedi se u vremenu i olakšava tačno određivanje mesta greške. I ovde važi pravilo: što duže traje određivanje greške to su manje šanse da se ona otkrije korišćenom metodom.

PREDODREĐIVANJE MESTA GREŠKE

Kao i kod određivanja greške na dielektriku kabela i ovde se primenjuje tzv. predodređivanje mesta greške. Za ova merenja se mogu koristiti merni mostovi: Murray-ov, Wheatstone-ov i dr.

Zbog svoje jednostavnosti u pogledu opreme i proračuna dosta je rasprostranjena primena metode koja se zasniva na merenju pada napona. U tom cilju se koristi milivoltmetar kojim se meri pad napona na električnoj zaštiti kabela levo i desno od greške.



Sl. 28.9. Šematski prikaz predodređenja greške na plaštu pomoću pada napona

1 - kabl na kom se vrši merenje; 2 - pomoćni kabl; 3 - električna zaštita kabela(Cu provodnici);
R - otpor greške

Na osnovu merenja dva stanja prebacivača (pozicija 1 i 2) dolazi se do veze:

$$I_x = I_k \cdot \frac{U_x}{U_x + U_y} \quad (28.5.)$$

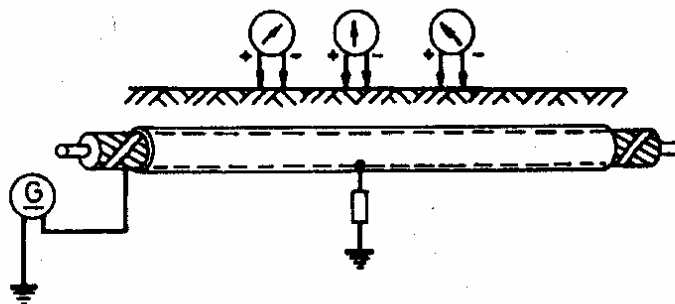
Tačnost ove metode iznosi oko 2% ukupne dužine kablovskog voda, što na 1 km voda iznosi 20 m. Ako postoji više grešaka na plaštu mogu nastati teškoće mada je praksa pokazala da u većini slučajeva nastaje prorada samo jednog mesta greške.

Za pomoćnu vezu koristi se provodnik jednog od dva preostala kabla. Međutim, kod visokonaponskih kablova gde se kablovske glave završavaju u SF₆ postrojenju, pristup provodniku je relativno komplikovan (otvaranje kućišta kablovske glave, ispuštanje gasa SF₆, a po obavljenom merenju nanovo zatvaranje i punjenje gasom i sl.). Zato se može kao pomoćna veza koristiti električna zaštita kabla 2 uz uslov da je spoljašnji plašt ispravan.

Međutim, predodređivanje greške pomoću mernih mostova nudi više prednosti. Oni u principu zahtevaju vrlo male snage izvora, svega nekoliko vati (W), a takođe omogućuju određivanje višeomskih grešaka, baš ono što se metodom pada napona ne može postići. Za određivanje visokoomskih grešaka primenjuju se visokonaponski mostovi.

TAČNO ODREĐIVANJE MESTA GREŠKE

Otpor greške između električne zaštite ili metalnog plašta kabla i zemlje je obično vrlo visok. Pregorevanje mesta greške ne daje uvek izgleda da se greška svede na mali otpor, jer nije moguće lako ostvariti provodni most između metalnog plašta i zemlje.



Sl. 28.10. Šema mernog sistema za određivanju greške na plaštu pomoću tzv. naponskog koraka

Za to bi bila potrebna velika energija koja bi mogla oštetiti i sam kabl i isušiti zemljište. Da bi se ti nedostaci donekle otvonili koristi se jednosmerni generator napona 2 do 4 kV koji šalje impulse u kabl u trajanju od 1 s sa pauzom od 3 s. Na taj način sa ograničenom energijom može se izbeći isušivanje zemljišta i eventualno oštećenje kabla. Za tačno određivanje mesta greške koristi se galvanometar sa sondama. Zahvaljujući utvrđenim intervalima impulsa napona mogu se razlikovati smetnje od mernog impulsa.

Umesto jednosmernog generatora može se upotrebiti i ton-frekventni generator. Njegove prednosti su znatne, jer se svaki prijemni signal može pojačati i na taj način razlikovati od smetnji. Takođe tamo gde je zbog gornje površine ulice (beton, asfalt) teško postaviti sonde koriste se kapacitivne ploče.

Pošto je kapacitet metalnog plašta prema zemlji veliki zbog relativno male debljine spoljašnje izolacije kabla to se za duže deonice može zahtevati veća snaga. Da bi se ona smanjila, kod dužih deonica koristi se niža frekvencija (svega 1 kHz). Za kraće deonice koriste se frekvence do 10 kHz.

Primena zvučne metode kod koje se električni preskok na mestu greške registruje pomoću mikrofona po pravilu se ne primenjuje, jer zbog višeg napona može doći do oštećenja izolacije ili susednog kabla. Takođe može doći do isušivanja zemljišta na mestu greške. Ovo može znatno otežati tačno određivanje mesta greške.