
4 DISTRIBUTIVNI KABLOVSKI VODOVI

UVOD

Elektroenergetski kablovi su u upotrebi preko 100 godina [L.1].

Prvi kabl je konstruisan 1850. godine i bio je namenjen telefoniji. **Izolacija** je bila od gutaperke sa dozvoljenom radnom temperaturom od 45 °C. Tridesetak godina kasnije, gutaperka je zamenjena jutom impregnisanom vazelinom. Za zaštitu od prodora vlage korišćen je olovni omotač. U Engleskoj je 1890. godine konstruisan 10 kV jednofazni kabl sa faznim i koncentričnim neutralnim provodnikom od bakra i izolacijom od papira impregnisanim ozokeritom.

Prvi trožilni kabl 10 kV izrađen je 1892. godine sa žilama izolovanim papirom impregnisanim visokoviskoznim uljnim kompaundom. Sve tri žile su bile izolovane zajedničkom pojasnom izolacijom preko koje je urađen olovni omotač da spreči prodor vlage u kabl. Ovaj kabl je poznat pod nazivom "pojasni" ili "papirni" kabl. Zbog velike tangencijalne komponente električnog polja ovaj kabl se nije mogao primeniti za više napone.

Prvi kabl sa pojedinačno ekranizovanim žilama za napon 33 kV proizveden je 1913. godine. Međutim, i ova konstrukcija kabla nije mogla da zadovolji uslove eksploatacije za napone veće od 60 kV.

Za visoke napone u periodu od 1924. do 1937. proizvedena su četiri tipa kabla izolovanih impregnisanim papirom:

- uljni kabl (1924),
- gasni kabl sa unutrašnjim pritiskom (1931),
- uljni kabl u cevi (1931), i
- gasni kabl sa spoljašnjim pritiskom (1937).

Uporedo sa razvojem novih konstrukcija visokonaponskih kablova sa izolacijom od impregnisanog papira, počinje i primena sintetičkih materijala za izolaciju kablova. U početku je prednjačila primena polivinil-hlorida (PVC), a od 1933. godine vodeću ulogu preuzima termoplastični polietilen (PE).

Kablovi sa izolacijom od PVC-a koriste se uglavnom za napone do 10 kV. Kabl sa izolacijom od PE-a za napon od 30 kV prvi put je primenjen u Švajcarskoj 1947. godine. Prelomni trenutak za primenu kablova sa sintetičkom izolacijom nastao je 1969. godine, kada je u Francuskoj izgrađen 225 kV kabl sa izolacijom od PE-a. Zatim sledi kabl 275 kV od umreženog polietilena (UPE) u Tokiju, a potom je u Francuskoj proizveden kabl 400 kV sa izolacijom od PE-a.

Trajna radna temperatura provodnika θ_p , odnosno u kratkom spoju θ_k , iznose:

- papirni kablovi: $\theta_p = 65\text{ °C}$ i $\theta_k = 160\text{ °C}$ (140 °C za napon 35 kV);
- PVC kablovi: $\theta_p = 70\text{ °C}$ i $\theta_k = 160\text{ °C}$;
- PE kablovi: $\theta_p = 70\text{ °C}$ i $\theta_k = 150\text{ °C}$;
- UPE kablovi: $\theta_p = 90\text{ °C}$ i $\theta_k = 250\text{ °C}$, a nužni pogon u trajanju od 100 sati godišnje dozvoljen je sa radnom temperaturom od 130 °C.

Vidi se da UPE kablovi imaju superiorne termičke osobine.

Termičke karakteristike PE su osetno slabije, čak su slabije i od PVC izolacije.

Primena energetskih kablova u Srbiji [L.7] započinje devedesetih godina devetnaestog veka sa kablovima izolovanim gutaperkom ili kaučukom, i olovnim omotačem. Do kraja pete decenije prošlog veka su se koristili isključivo uljni kablovi sa papirnom izolacijom, olovnim plaštom i mehaničkom spoljašnjom zaštitom, za sve tada korišćene naponske nivoe. Zatim dolazi do prodora kablova sa izolacijom od sintetičkih materijala: najpre PVC, zatim PE i na kraju UPE. PVC kablovi veoma brzo u potpunosti istiskuju papirne kablove na niskom naponu, donekle konkurišu papirnim kablovima i na naponu 10 kV, ali za više napone su neupotrebljivi zbog slabih termičkih karakteristika, većih dielektričnih gubitaka, ali najviše zbog pojave šupljina u izolaciji koje veoma brzo dovode do parcijalnih pražnjenja i proboja izolacije.

Problem parcijalnih pražnjenja u izolaciji javlja se i kod PE i UPE kablova, ali se uspešno rešava upotrebom kvalitetnih materijala i primenom vrhunske tehnologije (na primer: primena postupka suvog umrežavanja kod UPE kablova).

Prvobitno se kao **materijal za provodnike** energetskih kablova koristio bakar, ali je kasnije uspešno zamenjen aluminijumom. Tačno je da je specifična električna otpornost aluminijuma za 64% veća nego kod bakra ($\rho_{Al} = 28,26 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$, prema $\rho_{Cu} = 17,24 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$), ali je aluminijum znatno lakši (odnos: 2,7 : 8,89). Tako se dobija: ako se za prenos određene snage upotrebi jedan kilogram bakra, tu istu snagu je moguće preneti pod jednakim energetskim uslovima (pad napona i gubitak snage) koristeći pola kilograma aluminijuma. Kako je aluminijum osetno jeftiniji od bakra, a specifična ulaganja u kablovsku mrežu su inače velika, jasno je da zamena bakarnih kablova aluminijumskim donosi ogromne uštede. Ova zamena je u Srbiji intenzivno započeta početkom 70-ih godina. O kakvim uštedama je reč pokazuje primer NN kabla: preporučeni Al kabl tipa PP00-ASJ, preseka $3 \times 150 + 70 \text{ mm}^2$, za oko 50 % je u to vreme bio jeftiniji od do tada korišćenog Cu kabla tipa PP00-S, preseka $3 \times 95 + 50 \text{ mm}^2$. Kod SN kablova razlika u ceni je bila manja (25% do 40%) zbog srazmerno većeg učešća cene izolacije, poluprovodnih slojeva i električne zaštite u ukupnoj ceni kabla. Zato se sada bakar koristi samo izuzetno (pri rekonstrukcijama, a za nabavku 110 kV kabla obično se alternativno zahteva ponuda kabla sa Cu i Al provodnicima).

4.1 Kablovi niskog napona 0,6/1kV

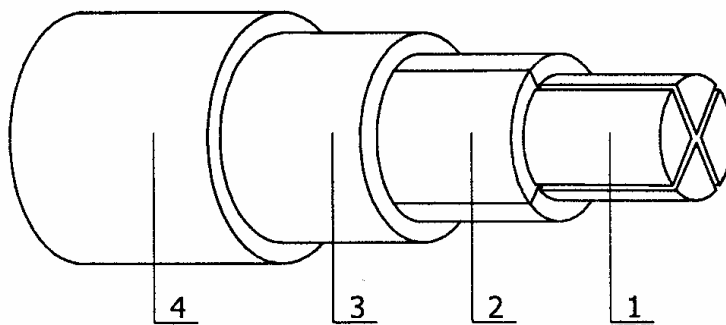
U mrežama NN sada se preporučuje [L.1], [L.3, TP-3] primena dva osnovna tipa kabla naznačenog napona 0,6/1kV:

- Tip PP00-ASJ, i
- Tip XP00-ASJ

Kabl tipa PP00-ASJ je četvorožilni kabl sa jednožičnim sektorskim aluminijumskim provodnicima ("Solidal"), PVC izolacijom, ispunom od gume ili PVC-a i PVC plaštom, sl.4.1.

Kabl tipa XP00-ASJ je iste konstrukcije kao i kabl tipa PP00-ASJ, samo što je izolacija urađena od umreženog polietilena (UPE). Ovaj tip kabla ima prednost za upotrebu na delu konzuma sa velikom gustinom opterećenja, kao i na mestima sa

velikim termičkim naprezanjima kabla (polaganje više kablova u isti rov, polaganje u blizini toplovoda itd.).



1 - aluminijumski jednožični sektorski provodnik; 2 - PVC ili UPE izolacija;
3 - ispuna od gume ili PVC; 4 - PVC plašt

SI.4.1 Niskonaponski kabl 0,6/1 kV

Dozvoljeno je korišćenje i kablova sa višežičnim aluminijumskim provodnicima (na primer PP00-AS ili XP00-AS), ali su prednosti jednožičnih (punih) provodnika u odnosu na ove konstrukcije značajne: geometrijski presek provodnika je za oko 12% manji, što čini da je spoljašnji prečnik kabla, težina i cena manji za 5% do 10%. Puni provodnik je mnogo otporniji na koroziju jer ima manju površinu od pouzrenog provodnika, a otporniji je i na kratke spojeve.

Na mestima gde se očekuju povećana mehanička napreznja kabla (gradilišta, provizorijumi itd.) koriste se kablovi sa armaturom od dve čelične trake tipa PP41-ASJ ili XP41-ASJ, a za mesta sa izuzetnim mehaničkim napreznjima kabla (klizišta, vertikalna polaganja u dužini preko 30 m) kablovi sa armaturom od čeličnih žica tipa PP44-ASJ ili XP44-ASJ.

4.2 Kablovi srednjeg napona 6/10 kV, 12/20 kV i 20/35 kV

Za srednjenaponske (SN) kablove [L.1], [L.3, TP-3] se kao izolacija koristi **impregnisani papir ili umreženi polietilen (UPE)**.

Za SN kablove je karakteristično da poseduju slaboprovodni sloj (ekran kabla), koji se postavlja ispod i iznad izolacije i služi za radijalno oblikovanje i ograničenje električnog polja u kablju. Izuzetak je trožilni "papirni" kabl za naznačeni napon 6/10 kV koji se i dalje koristi kao neekranizovan.

Konstrukcija SN kabla sa UPE izolacijom obavezno sadrži i električnu zaštitu - to je metalni sloj, obično preseka 16 mm^2 Cu ili 25 mm^2 Cu, koji služi za ograničenje električnog polja, za odvođenje struje zemljospoja i zaštitu od indirektnog dodira.

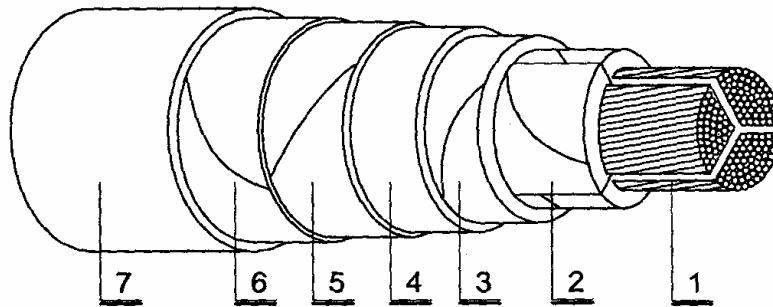
U distributivnim mrežama Srbije izvršena je opšta tipizacija jednožilnih konstrukcija UPE kablova za naponske nivoe od 10 kV do 35 kV [L.3, TP-3] zato što se lako polažu i izrađuju u većim dužinama (potreban manji broj spojnika), pa se za magistralni vod po pravilu koriste tri jednožilna UPE kabla položena u trouglastom snopu.

Trožilne konstrukcije UPE kablova se ne upotrebljavaju zato što je težina trožilnog kabla (a to znači i cena) za preko 30 % veća od težine tri jednožilna kabla iste konstrukcije i istih preseka provodnika i električne zaštite.

U distributivnoj mreži nazivnog napona 10 kV preporučuje se primena sledećih tipova kablova naznačenog napona 6/10 kV:

- Tip NPO 13-AS, i
- Tip XHE 49-A.

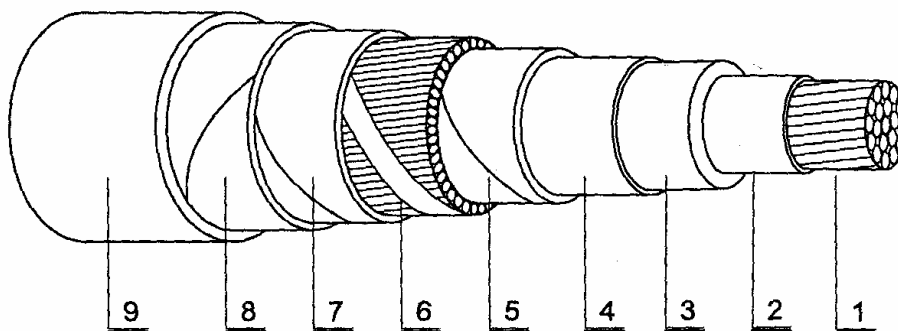
Kabl tipa NPO 13-AS je trožilni kabl sa sektorskim aluminijumskim provodnicima i izolacijom od naročito impregnisanog papira (polučvrsti kompaund), sa olovnim plaštom, armaturom od dve čelične trake i antikorozivnom zaštitom od slojeva jute i bitumena, sl.4.2.



- 1 - aluminijumski sektorski provodnik; 2 - izolacija žile od naročito impregnisanog papira (NP);
3 - pojasna izolacija; 4 - olovni plašt; 5 - impregnisani papir ili juta; 6 - čelična armatura;
7 - impregnisana juta.

Sl.4.2 Trožilni kabl 6/10 kV sa papirnom izolacijom NPO 13-AS

Kabl tipa XHE 49-A je jednožilni kabl sa aluminijumskim okruglim provodnikom i izolacijom od umreženog polietilena, sa slaboprovodnim slojem ispod i iznad izolacije, sa električnom zaštitom od bakarnih žica i trake, sa slaboprovodnom bubrećom trakom ispod i iznad električne zaštite, sa aluminijumskom polimer trakom i spoljašnjim polietilenskim plaštom visoke gustine, sl.4.3.



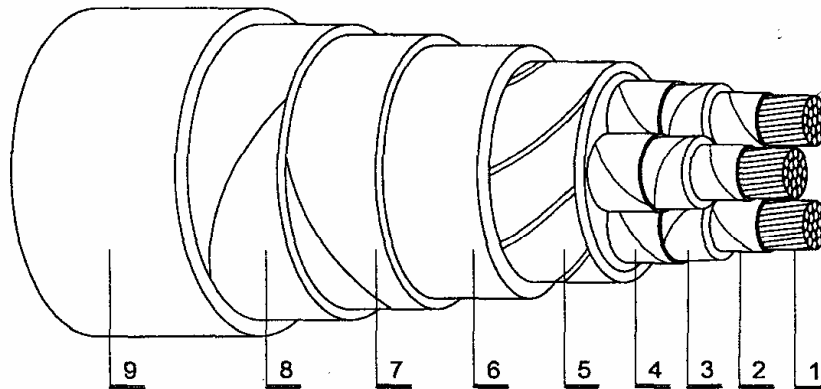
- 1 - aluminijumski provodnik; 2 - slaboprovodni sloj provodnika; 3 - UPE izolacija; 4 - slaboprovodni sloj izolacije; 5 - slaboprovodna bubreća traka; 6 - električna zaštita od bakarnih žica i trake;
7 - izolaciona bubreća traka; 8 - aluminijumska polimer traka; 9 - PE plašt.

Sl.4.3 Jednožilni kabl srednjeg napona sa UPE izolacijom XHE 49-A

U distributivnoj mreži nazivnog napona 20 KV preporučuje se primena sledećih tipova kablova naznačenog napona 12/20 KV:

- Tip XHE 49-A (identične konstrukcije kao i za napon 6/10kV, slika 4.3), i
- Tip NPHO 13-A.

Kabl tipa NPHO 13-A je trožilni kabl sa aluminijumskim okruglim provodnicima i izolacijom od naročito impregnisanog papira (polučvrsti kompaund), sa slaboprovodnim slojem ispod i iznad izolacije, sa olovnim plaštom, armaturom od dve čelične trake i antikorozivnom zaštitom od slojeva jute i bitumena, sl.4.4.



1 - aluminijumski okrugli provodnik; 2 - slaboprovodni sloj provodnika; 3 - izolacija od naročito impregnisanog papira (NP); 4 - slaboprovodni sloj izolacije; 5 - pojasna izolacija; 6 - olovni plašt; 7 - impregnisani papir ili juta; 8 - čelična armatura; 9 - impregnisana juta.

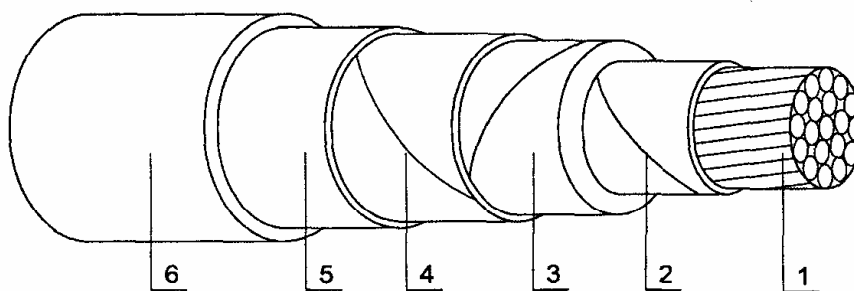
Sl.4.4 Trožilni kabl 12/20kV sa papirnom izolacijom NPHO 13-A

U distributivnoj mreži nazivnog napona 35 kV preporučuje se primena sledećih tipova kablova naznačenog napona 20/35 kV:

- Tip XHE 49-A, i
- Tip NPHA 03-A.

Kabl tipa XHE 49-A je identične konstrukcije kao i za napon 6/10 kV, sl.4.3.

Kabl tipa NPHA 03-A je jednožilni kabl sa aluminijumskim provodnikom i izolacijom od naročito impregnisanog papira (polučvrsti kompaund), sa poluprovodnim slojem ispod i iznad izolacije, sa plaštom od bezšavne aluminijumske cevi i spoljašnjim polietilenskim plaštom visoke gustine, sl.4.5.



1 - aluminijumski okrugli provodnik; 2 - slaboprovodni sloj provodnika; 3 - izolacija od naročito impregnisanog papira (NP); 4 - slaboprovodni sloj izolacije; 5 - aluminijumski plašt; 6 - PE plašt.

Sl.4.5 Jednožilni kabl 20/35 kV sa papirnom izolacijom NPHA 03-A

4.3 Poređenje NPO i UPE kablova

Prednosti NPO kablova:

Velika pouzdanost (dugovečnost), potvrđena u višedecenijskoj upotrebi. Niska cena u vreme masovne upotrebe. Posebna prednost kod rešavanja problema uzemljenja: olovni plašt sa armaturom se ponaša kao odličan prirodni uzemljivač, kabl ima mali redukcionni faktor (ispod 0,2) i dobro prigušuje potencijal koji može da se iznese iz transformatorske stanice.

Nedostaci NPO kablova:

Velika težina i otežana montaža, komplikovana izrada spojnika i završnica. Prisustvo ulja sve više svrstava papirne kablove u "prijavu tehnologiju", pa se njihova primena postepeno napušta.

Prednosti UPE kablova:

Mali dielektrični gubici i superiorne termičke osobine za uslove trajnog i "nužnog" pogona, a posebno za kratak spoj. Jednostavna montaža, posebno pri izradi spojnika i završnica korišćenjem prefabrikovanih elemenata. Pomoću električne zaštite UPE kablovi galvanski povezuju uzemljivače susednih TS i tako smanjuju impedanse sistema uzemljenja u obe TS.

Nedostaci UPE kablova:

Osetljivost na prodor vode i kasniju pojavu parcijalnih pražnjenja, ali se problem uspešno rešava primenom polietilenskog plašta i vodozaptivnih ("bubrečić") traka. Izrazite termičke prednosti ne mogu u potpunosti da se iskoriste zbog pojave isušivanja tla, što može da se reši korišćenjem specijalne mešavine za posteljicu kabla, ali to poskupljuje kablovski vod.

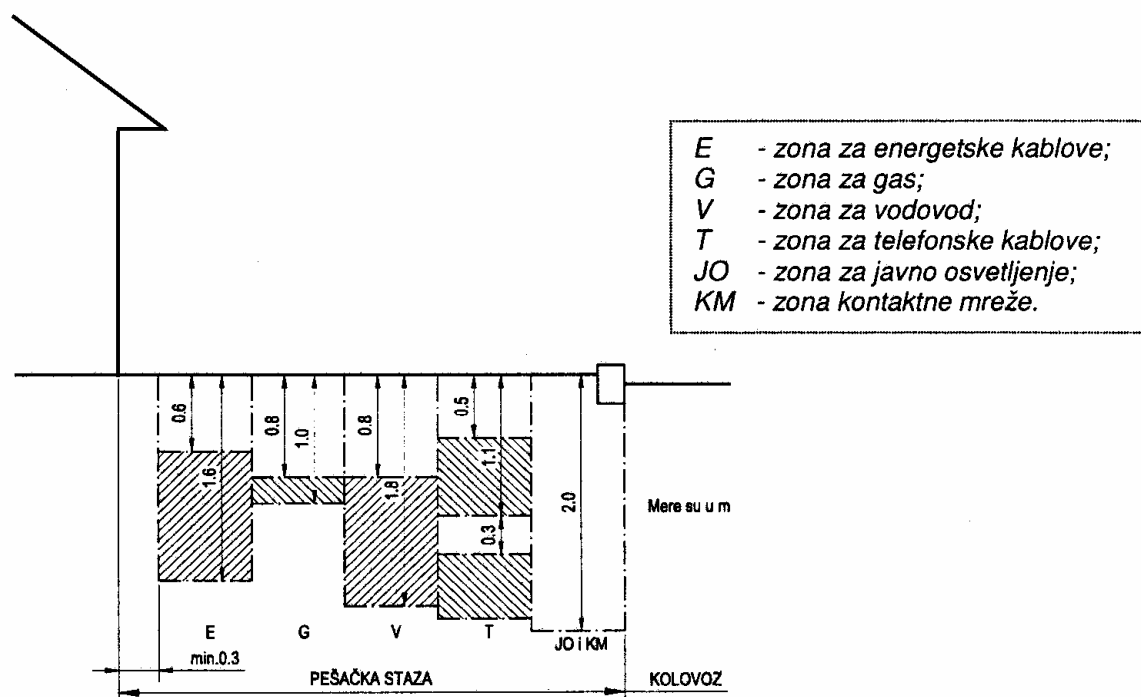
4.4 Polaganje energetskih kablova

Energetski kablovi se polažu u zemlju, u kanale, u kablovsku kanalizaciju, na regale, na stubove itd.

Trasa kabla treba da ispunjava optimalne tehničke i ekonomske uslove, i uslovljena je [L.1], [L.3, TP-3]:

- fizičko-hemijskim sastavom zemljišta,
- toplotnom otpornošću zemljišta,
- blizinom drugih infrastrukturnih instalacija,
- klizištima i podzemnim vodama,
- prelaskom vodenih tokova i mostova, i
- uzdužnim profilom trase.

Za polaganje podzemnih infrastrukturnih instalacija u urbanizovanim naseljima preporučuje se **podela raspoloživog prostora na zone**. Uobičajena širina zone za energetske kablove iznosi 0,7 m, dok širina zone za ostale instalacije zavise od kapaciteta tih instalacija i raspoloživog prostora. Na sl.4.6 dat je primer podele pešačkog trotoara na zone. Polaganje energetskog kabla paralelno sa zidom ili temeljom zgrade vrši se na rastojanju od najmanje 0,3 m.



Sl.4.6 Podela pešačkog trotoara na zone

Polaganje energetskog kablo vrši se ručno ili primenom mehanizacije.

Vučenje kablo vrši se pomoću zatezne čarape, ili pomoću stezaljke vezane za proizvodnike ili armaturu od čeličnih žica. Nije dozvoljeno vučenje kablo motornim vozilom, vučenje kablo po zemlji i upredanje kablo.

Pri polaganju moraju da se ispune zahtevi o dozvoljenim poluprečnicima savijanja prema tabeli 4.1 i o dozvoljenim vučnim silama prema tabeli 4.2.

Poluprečnici savijanja energetskih kablova ne smeju da budu manji od datih u tabeli 4.1, sem u slučajevima kada se savijanje izvodi šablonima kada mogu da se smanje za 30 % (na primer pri uvodu u kablovsku završnicu).

Tabela 4.1: Dozvoljeni poluprečnici savijanja energetskih kablova

Naznačeni napon kablo [U_0/U_n]	Tip kablo	Dozvoljeni poluprečnik savijanja [mm]
0,6/1 kV	PP00-ASJ, PP41-ASJ	15 · D
	XP00-AS, XP41-AS	12 · D
6/10 kV, 12/20 kV i 20/35 kV	NPO 13-AS, NPZO 13-A	15 · D
	XHE 49-A	15 · D1
	NPHA-03	25 · D1

D - spoljašnji prečnik višežilnog kablo [mm];
D1 - spoljašnji prečnik jednožilnog kablo [mm].

U tabeli 4.2 date su **dozvoljene vučne sile** energetskih kablova u zavisnosti od načina vučenja.

Tabela 4.2: Dozvoljene vučne sile energetskih kablova

Način vučenja kabla	Tip kabla	Doz. vučna sila [N]
Preko zatezne čarape	PP00-ASJ, PP41-ASJ XP00-AS, XP41-AS, XHE 49-A	$5 \cdot D^2$
	NPO 13-AS, NPHO 13-A NPHA-03, NPZO-13A	$3 \cdot D^2$
Preko provodnika kabla	svi tipovi kablova	$30 \cdot S_{Al}$
		$50 \cdot S_{Cu}$
Preko čelične armature	PP44-ASJ, XP44-ASJ	$150 \cdot S_{\epsilon}$
<i>D - spoljašnji prečnik kabla [mm]; S_{Al} - ukupan presek Al provodnika za koje se vuče kabl [mm²]; S_{Cu} - ukupan presek Cu provodnika za koje se vuče kabl [mm²]; S_{ϵ} - presek čelične armature za koju se vuče kabl [mm²].</i>		

Zatezna vučna sila kontroliše se pomoću dinamometra, a vitlo mora da ima osigurač (graničnik) koji prekida vučenje u slučaju prekoračenja dozvoljene vučne sile. Za smanjenje vučne sile koriste se kablovske rolne koje se postavljaju duž trase na međusobnom rastojanja od 2 m do 3 m.

Najniža temperatura okoline pri kojoj je dozvoljeno polaganje energetskog kabla iznosi:

- +5 °C za papirne kablove (NPO 13-AS itd.) i kablove sa PVC izolacijom i/ili PVC plaštom (PP00-ASJ, XHP 48 itd.);
- -10 °C za kablove sa UPE izolacijom i PE plaštom (XHE 49-A itd.).

Ako ne može da se izbegne polaganje kabla kada su temperature okoline ispod predhodno navedenih vrednosti, tada kabl pre polaganja treba da se zagreje držanjem u toploj prostoriji ili zagrevanjem odgovarajućim grejnim telima, odnosno propuštanjem električne struje kroz provodnike.

Zagrejan kabl treba što brže da se transportuje i položi.

Posle polaganja kabla treba da se izvrši naponsko ispitivanje kablovskog voda i da se u digitalnom obliku snimi trasa kablovskog voda.

Obavezno je **vođenje katastra kablovskih vodova** na grafičkom planu, sa posebno označenim mestima ukrštanja sa drugim kablovima i podzemnim instalacijama, spojnim mestima, tačnim dužinama, sa unetim osnovnim podacima o kablovskoj kanalizaciji (mesto, dužina, broj cevi, broj rezervnih cevi) itd.

Preporuke za polaganje jednožilnih SN kablova tipa XHE 49-A i NPHA 03-A:

Preporučuje se polaganje **u trouglastom snopu**. Snop se formira provlačenjem kablova kroz odgovarajuću matricu pri odmotavanju sa tri kalema. Formirani snop se na svakih 1 m do 2 m omotava obujmicom, samolepljivom trakom i sl.

Na kraćim deonicama dozvoljeno je polaganje i u horizontalnoj ravni.

Dozvoljeno je pojedinačno provlačenje jednožilnog kabla kroz cev od nefero-magnetnog materijala, pod uslovom da cev nije duža od 20 m. Kroz čeličnu cev dozvoljeno je samo provlačenje snopa koji čine jednožilni kablovi sve tri faze.

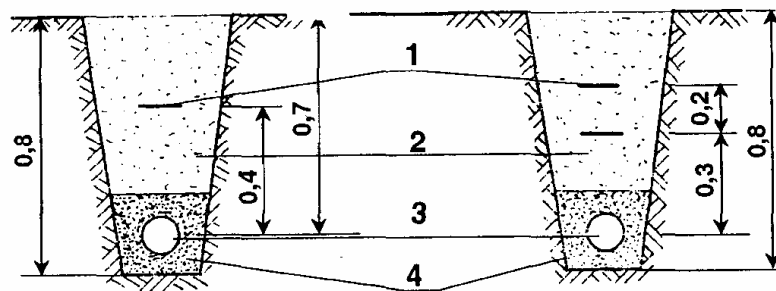
Za pričvršćenje jednožilnog kabla se koristi obujmica samo od neferomagnetnog materijala, kao: bakar, aluminijum, plastika itd.

Na oba kraja kablovskog snopa treba galvanski da se povežu metalni plaštovi ili električne zaštite sva tri jednožilna kabla, i da se uzemlje ovi spojevi.

4.5 Polaganje energetskih kablova u zemlju i u kablovsku kanalizaciju

Preporučuje se **direktno polaganje energetskih kablova u zemlju** [L.1], [L.3, TP-3], u kablovski rov čije dimenzije zavise od naznačenog napona kabla, vrste tla, kao i od broja kablova koji se polažu u isti rov. Normalna dubina rova iznosi 1,1 m za kablove 35 kV i 0,7 m do 0,8 m za kablove do 20 kV. Odstupanja su dozvoljena pri ukrštanju sa drugim kablovima i instalacijama, kao i u slučajevima nepovoljnih uslova polaganja (kamenito tlo itd.). Ako se zbog raznih prepreka i instalacija kabl polaže na manju dubinu, treba da se postavi dodatna zaštita kabla od mehaničkih oštećenja primenom zaštitnih cevi, betonskih kablovica itd.

Kabl se polaže tako da bude u sredini sloja posteljice debljine 0,2 m, koja se stavlja na dno kablovskog rova kao na sl.4.7. Za nabijanje sloja posteljice koriste se isključivo ručni nabijači. Za posteljicu se koristi **mešavina peska i šljunka** koji imaju dobre karakteristike odvođenja toplote (visok sadržaj kvarca).



a) na regulisanim površinama b) na neregulisanim površinama
1 – upozoravajuća traka; 2 – zemlja nabijena u slojevima; 3 - kabl; 4 - posteljica.

mere su u [m]

SI.4.7 Direktno polaganje kabla u zemlju

U slučaju teških uslova odvođenja toplote i opasnosti od isušivanja tla (polaganje više kablova u isti rov, ukrštanje sa toplovodom itd.) koriste se posteljice od specijalnih mešavina, na primer: mešavina šljunka i peska sa dodatkom do 15% mlevenog krečnjaka, mešavina peska i cementa itd.

Kabl se polaže vijugavo u rov, tako da dužina kabla bude najviše 2 % veća od dužine trase.

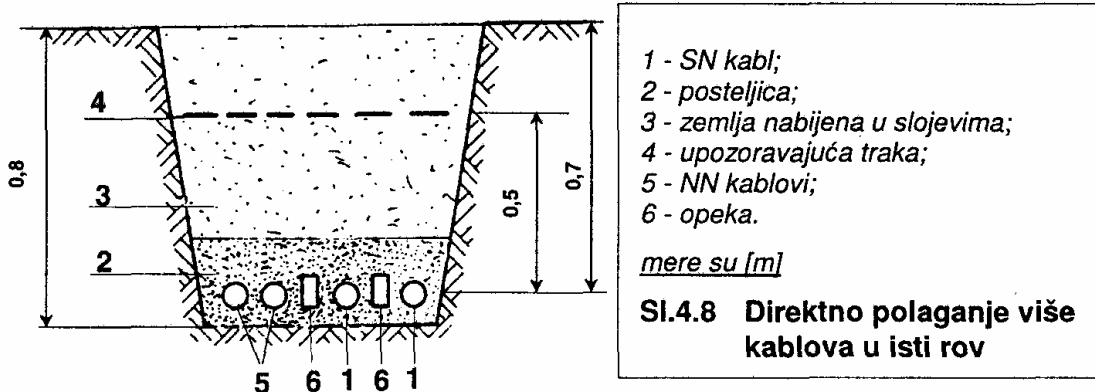
Kablovski rov se kopa kao otvoreni rov, izuzev u slučaju ukrštanja kabla sa tramvajskom ili železničkom prugom, kao i sa putem ili ulicom kada ne sme da se ometa saobraćaj, i tada se buši otvor za cev kroz koju se provlači kabl.

Zatrpavanje kablovskog rova vrši se zemljom iz otkopa ili dopremljenom zemljom, u slojevima od po 0,3 m, pri čemu za prvi sloj koji se stavlja iznad posteljice treba da se koristi sitnozrnasta zemlja. Slojevi zemlje iznad posteljice pojedinačno se nabijaju

mehaničkim nabijačima, tako da najmanja zbijenost zemlje u rovu bude 92 %. Pri zatrpavanju, iznad kabla duž cele trase treba da se postave plastične upozoravajuće trake.

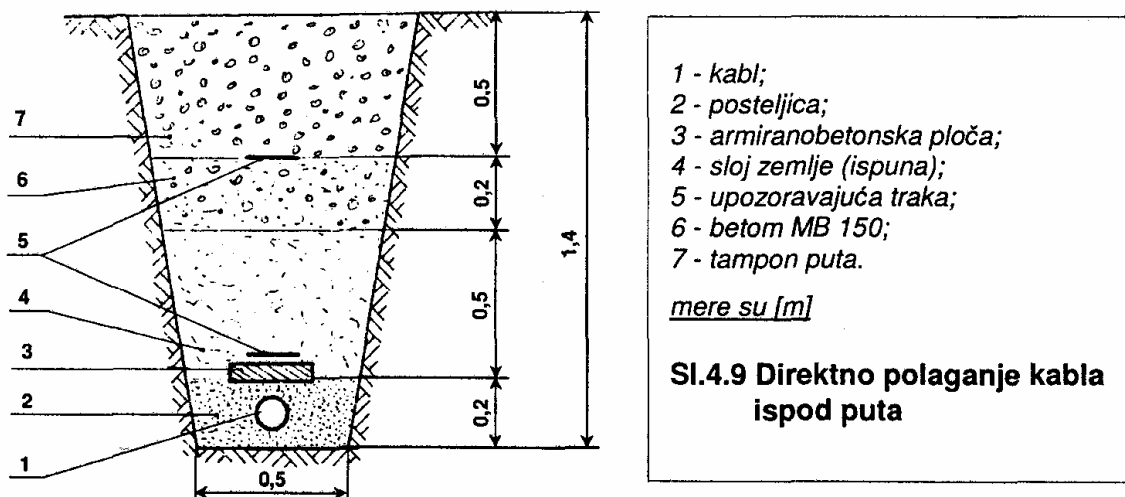
Raspored upozoravajućih traka u slučaju polaganja jednog kabla u rovu na regulisanim i neregulisanim površinama treba da bude kao na sl.4.7. Plastična upozoravajuća traka je crvene boje, sa utisnutim upozorenjem da se ispod trake nalazi energetska kabl i od materijala koji garantuje vek trajanja trake od 30 godina.

Ako se u isti rov polaže više kablova, tada broj upozoravajućih traka i njihov međusobni razmak treba da se odabere tako da svi kablovi budu "pokriveni" ovim trakama (slika 4.8).



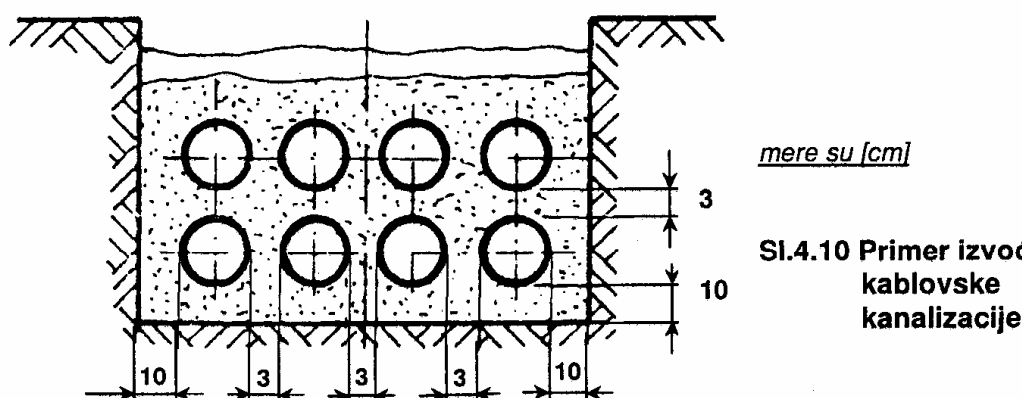
Međusobni razmak energetskih kablova u istom rovu ne sme da bude manji od 0,07 m za paralelno vođenje i 0,2 m pri ukrštanju.

Za prelaz ispod puta u urbanizovanim naseljima, umesto kablovske kanalizacije, može da se koristi direktno polaganje kabla u zemlju, u rov dubine 1,4 m. U rov se postavlja posteljica kabla, iznad koje se postavljaju armiranobetonske ploče, sloj zemlje (ispuna) i sloj mršavog betona MB 150, sl. 4.9.



Na prelazu ispod kolovoza ulice, puta, tramvajskih koloseka, železničke pruge, kroz dvorište zgrade, kao i kada ne mogu da se postignu dozvoljena odstojanja kabla u odnosu na druge instalacije koristi se kablovska kanalizacija.

Kablovska kanalizacija se sastoji od plastičnih cevi ili prefabrikovanih betonskih elemenata (kablovice). Na sl.4.10 prikazan je primer izvođenja kablovske kanalizacije korišćenjem 8 plastičnih cevi.



Sl.4.10 Primer izvođenja kablovske kanalizacije

Minimalni unutrašnji prečnik cevi mora da bude najmanje 1,5 puta veći od spoljašnjeg prečnika kabla. Unutrašnji zid cevi mora da bude gladak. Ako se cevi nastavljaju, tada prošireni kraj cevi mora da bude vidljiv. Kabl se obavezno provlači sa proširenog kraja cevi. Otvor cevi koja se ne koristi treba da se zatvori plastičnim čepom.

Ako se u kablovsku kanalizaciju polažu kablovi različitih naponskih nivoa, tada se kablovi nižih napona polažu u viši nivo kanalizacije.

Kablovi koji se polažu ranije zauzimaju najniže otvore u kanalizaciji.

Kod većih dužina kablovske kanalizacije, zbog otežanih uslova odvođenja toplote, treba da se uvaži korekcionni faktor za dozvoljeno strujno opterećenje. Ovaj faktor ima vrednost 0,8 ako se u cevi nalaze višezilni kablovi i 0,85 ako se u cevi nalaze tri jednožilna kabla.

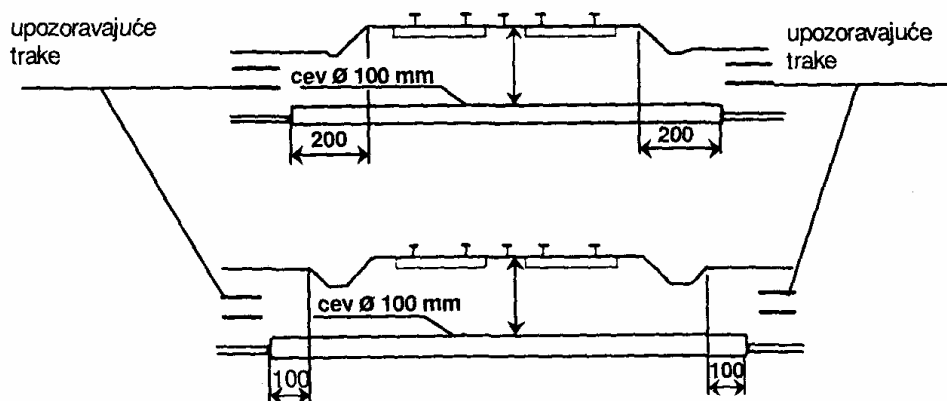
Na mestima promene pravca ili nivoa kablovske kanalizacije, kao i na pravoj deonici kablovske kanalizacije koja je duža od 40 m, koristi se kablovsko okno.

Kablovsko okno se izvodi u trotoaru, a izuzetno i u kolovozu ulice. Veličina kablovskog okna zavisi od broja kablova, uslova rada u oknu, dozvoljenog poluprečnika savijanja kablova itd. Na dnu okna treba da bude drenažni otvor, dok je minimalni ulazni otvor dimenzija 0,65 x 0,65 m.

4.6 Približavanje i ukrštanje energetskih kablova sa železničkom i tramvajskom prugom i putem

Na mestu ukrštanja kablovskog voda sa železničkom ili tramvajskom prugom [L.1], [L.3, TP-3] kabl se polaže u betonski kanal, odnosno u betonsku ili plastičnu cev uvučenu u horizontalno izbušen otvor nasipa. Na ovaj način se omogućava zamena kabla bez raskopavanja donjeg stroja pruge. Ukrštanje kablovskog voda sa železničkom ili tramvajskom prugom treba da se izvede pod pravim uglom, tako da kabl bude najmanje 1 m ispod gornje ivice šine.

Primer ukrštanja kablovskog voda sa železničkom prugom dat je na sl.4.11.



SI.4.11 Ukrštanje energetskog kabla sa železničkom prugom

Kod paralelnog vođenja kablovskog voda sa pružnim postrojenjem sa pogonom na jednosmerni napon treba da se uzme u obzir negativan uticaj jednosmerne lutajuće struje na kabl. Za sprečavanje neželjenih efekata, treba obezbediti što bolju izolovanost šina u odnosu na zemlju i obezbediti udaljenje kabla od šine od najmanje 2 m, ili kabl provući kroz plastičnu cev.

Ukrštanje kablovskog voda sa putem izvan naselja vrši se polaganjem kabla u betonski kanal, odnosno u betonsku ili plastičnu cev uvučenu u horizontalno izbušeni otvor, tako da je moguća zamena kabla bez raskopavanja puta.

Vertikalno rastojanje između gornje ivice kablovske kanalizacije i površine puta treba da iznosi 0,8 m. Udaljenost kablovskog voda od puta izvan naselja pri paralelnom vođenju iznosi za autoput i put prvog reda najmanje 5 m i za puteve iznad prvog reda najmanje 3 m. Rastojanje u slučaju približavanja kablovskog voda i autoputa i puta prvog reda iznosi najmanje 3 m i za puteve iznad prvog reda najmanje 1 m.

4.7 Približavanje i ukrštanje energetskog kabla sa telekomunikacionim kablom i sa cevima vodovoda i kanalizacije

Rastojanje između energetskog i telekomunikacionog kabla [L.1], [L.3, TP-3] pri paralelnom vođenju je najmanje 0,5 m za kablove 1 kV, 10 kV i 20 kV, i najmanje 1 m za kabl 35 kV. Ukrštanje energetskog i telekomunikacionog kabla vrši se na razmaku od najmanje 0,5 m. Ugao ukrštanja treba da bude u naseljenim mestima najmanje 30° (po mogućstvu što bliže 90°) i van naseljenog mesta najmanje 45°. Ukoliko ova rastojanja ne mogu da se postignu, tada se energetski kabl provlači kroz zaštitnu cev, ali i tada razmak ne sme da bude manji od 0,3 m.

Predhodno navedeni razmaci ne odnose se na optičke kablove i na telekomunikacione kablove koji služe isključivo za potrebe elektroprivrede, i oni se polažu sa razmakom od najmanje 0,3 m, odnosno 0,2 m, respektivno u odnosu na energetski kabl.

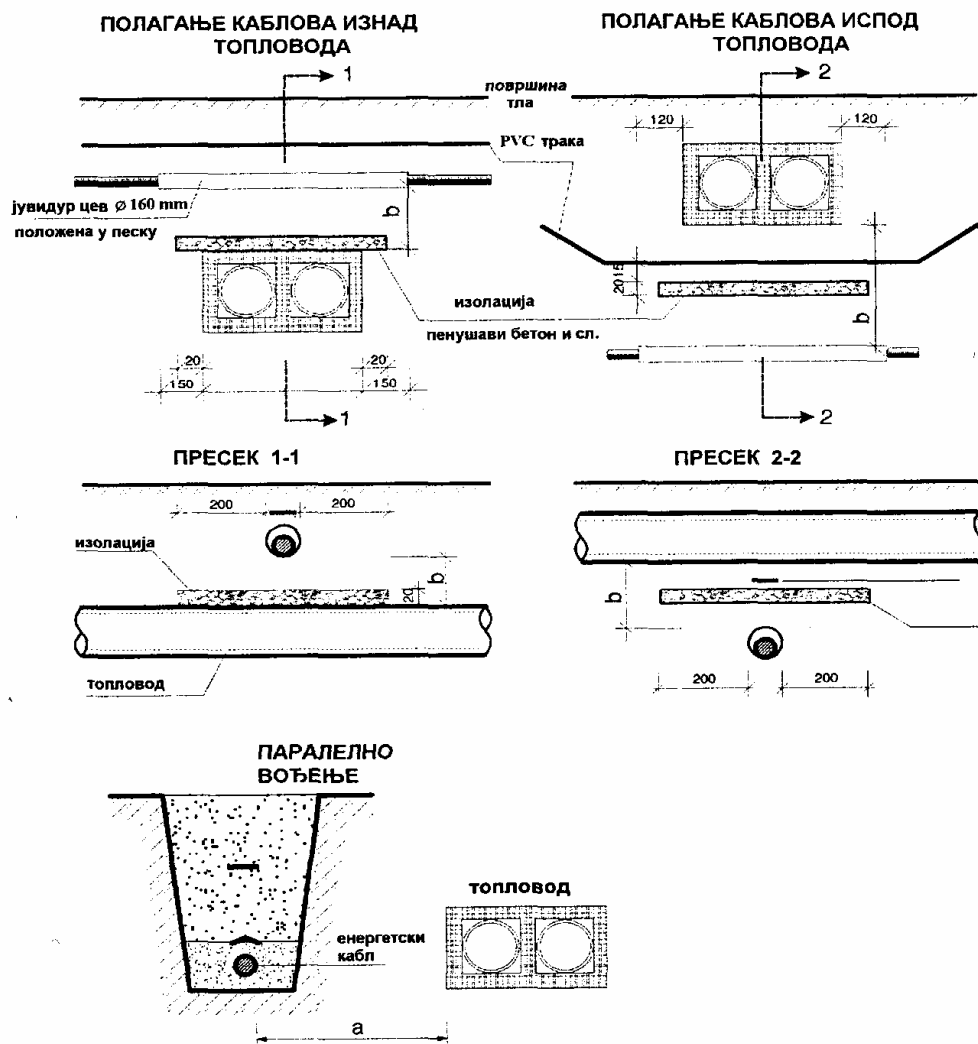
Pri ukrštanju, energetski kabl može da bude položen ispod ili iznad vodovodne ili kanalizacione cevi na rastojanju od najmanje 0,4 m za kabl 35 kV, odnosno najmanje 0,3 m za kablove 1 kV, 10 kV i 20 kV.

Horizontalni razmak energetskog kabla od vodovodne i kanalizacione cevi pri paralelnom vođenju treba da iznosi najmanje 0,5 m za kabl 35 kV, odnosno 0,4 m za kablove 1 kV, 10 kV i 20 kV. Ukoliko ne mogu da se postignu ovi razmaci, na tim mestim kabl se provlači kroz zaštitnu cev.

4.8 Približivanje i ukrštanje energetskih kablova sa toplovodom i gasovodom

Pri ukrštanju energetskog kabla sa toplovodom, kabl se montira iznad toplovoda, a izuzetno i ispod toplovoda. Između energetskog kabla i toplovoda se pri ukrštanju postavlja toplotna izolacija od poliuretana ili penušavog betona.

Horizontalni razmak energetskog kabla od spoljašnje ivice kanala za toplovod pri paralelnom vođenju [L.1], [L.3, TP-3] treba da iznosi najmanje 0,7 m za kablove 35 kV, odnosno najmanje 0,6 m za kablove 1 kV, 10 kV i 20 kV.



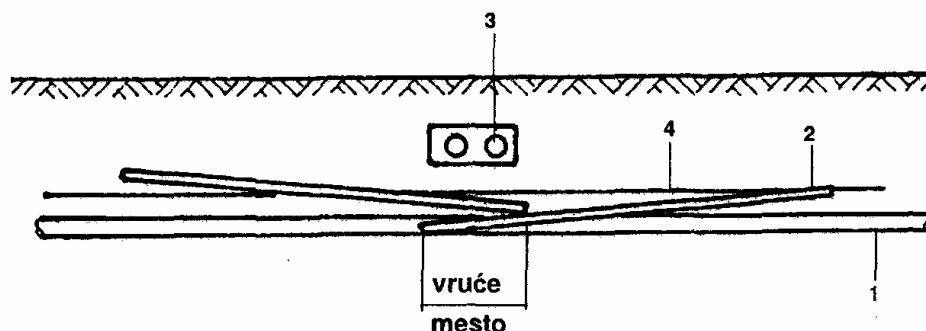
Slika 4.12 Ukrštanje i paralelno vođenje energetskog kabla sa toplovodom

Rastojanje pri ukrštanju i paralelnom vođenju energetskog kabla za javno osvetljenje i toplovoda je najmanje 0,3 m.

Ukoliko pri paralelnom vođenju energetskog kabla i toplovoda ne mogu da se

postignu najmanji razmaci, tada se primenjuju dodatne zaštitne mere kojima se obezbeđuje da temperaturni uticaj toplovoda na kabl ne bude veći od 20 °C.

Najčešće primenjivane mere za smanjenje toplotnog uticaja su primena metalnih ekrana (cevi) između kabla i toplovoda (sl.4.13) i primena posteljice od specijalnih mešavina (mešavina šljunka i peska sa dodatka do 15% mlevenog krečnjaka ili cementa).



1 - kabl; 2 - metalne cevi; 3 - toplovod; 4 - upozoravajuća traka.

Sl.4.13 Primena metalnih ekrana između kabla i toplovoda

Razmak između energetskog kabla i gasovoda pri ukrštanju i paralelnom vođenju treba da iznosi 0,8 m u naseljenim mestima i 1,2 m izvan naseljenih mesta.

Razmaci mogu da se smanje do 0,3 m ako se kabl položi u zaštitnu cev dužine najmanje 2 m sa obe strane mesta ukrštanja, ili celom dužinom paralelnog vođenja.

4.9 Ukrštanje energetskog kabla sa vodotokom i polaganje preko mosta

Ukrštanje energetskog kabla sa vodotokom (reka, kanal itd.) izvodi se polaganjem preko mostova. Izuzetno, ukrštanje sa vodotokom može da se izvede polaganjem kabla na dno ili ispod dna vodotoka.

Polaganje energetskog kabla na dno vodotoka izvodi se na mestu gde je brzina vode najmanja i gde ne postoji mogućnost većeg odrona zemlje ili nasipanja mulja. Za ovo polaganje moraju da se koriste kablovi koji su mehanički pojačani armaturom od čeličnih žica, na primer kabl tipa XHE 49/84-A.

Polaganje energetskog kabla ispod dna vodotoka izvodi se pomoću specijalne mehanizacije ("krtica") provlačenjem kabla kroz cev na dubini od najmanje 1,5 m ispod dna vodotoka. Ova tehnika je, na primer, uspešno primenjena za kablovsko premošćenje reke Save u Beogradu radi povezivanja Ade Ciganlije sa Novim Beogradom.

Polaganje preko mosta je najekonomičniji način premošćavanja vodotoka [L.3, TP-3]. Za tu namenu se koriste kablovi sa polimernom izolacijom i polimernim plaštom (XP00-AS, XHE 49-A), ali je dozvoljeno korišćenje i jednožilnih "papirnih" kablova sa aluminijumskim plaštom, tipa NPHA 03-A.. Za polaganje energetskih SN kablova preko mosta sa intenzivnim vibracijama preporučuje se korišćenje trožilnih kablova tipa XHE 49/84-A (tri použena jednožilna kabla XHE 49-A armirana sa okruglom pocinkovanom žicom).

Energetski kablovi se preko mosta polažu u kanale ili cevi ispod pešačkih staza.

Kroz ove kanale (cevi) mora da bude omogućeno prirodno hlađenje kablova. Kod većih mostova uobičajeno je da se u unutrašnjosti predvidi poseban tunel sa konzolama za nošenje kablova. Dozvoljeno je i slobodno polaganje energetskih kablova po konstrukciji mosta ako su nepristupačni nestručnim licima i ako su zaštićeni od direktnog sunčevog zračenja. Na mestima prelaza energetskog kabla sa čelične konstrukcije mosta na obalne oslonce mosta, kao i na prelazima preko dilatacionih delova mosta, treba da se predvidi odgovarajuća rezerva kabla.

Energetske kablove treba polagati bez spojnica na mostu, koje treba da budu udaljene najmanje 10 m od krajeva mosta. Ako je postavljanje spojnica na mostu iznuđeno rešenje, spojnicu treba montirati na noseći stub ili na neko drugo stabilno mesto.

4.10 Toplotni procesi u kablju

Provođenje toplote kroz čvrsto telo posledica je temperaturne razlike koja postoji u njemu. Diferencijalna jednačina provođenja toplote za telo bez unutrašnjeg toplotnog izvora je [L.8]:

$$-\frac{k}{\gamma \cdot c} \operatorname{div}(\operatorname{grad}\theta) = \frac{\partial\theta}{\partial t}, \quad (4.1)$$

gde je:

k [W/K·m] - specifična toplotna provodnost tela;

γ [kg/m³] - gustina tela i

c [cal/kg °C] - specifična toplota tela.

Ukoliko u telu postoje izvori toplote, tada je diferencijalna jednačina provođenja toplote:

$$-\frac{k}{\gamma \cdot c} \operatorname{div}(\operatorname{grad}\theta) + \frac{Q}{\gamma \cdot c} = \frac{\partial\theta}{\partial t}, \quad (4.2)$$

gde je:

Q [cal/m³] - količina toplote u jedinici zapremine.

Analitičko rešenje jednačina (4.1) i (4.2) u mnogim slučajevima praktično nije moguće, pa se često koriste numeručke metode uz uvođenje odgovarajućih početnih i graničnih uslova.

Za stacionarno stanje desne strane jednačina (4.1) i (4.2) postaju jednake nuli, pa se rešavanje diferencijalne jednačine svodi na određivanje prostorne raspodele temperature. Posebno, jednačina (4.1) za stacionarne procese postaje dobro poznata Laplaceova jednačina i njenim rešavanjem može se razmotriti provođenje toplote kroz cilindrični zid. Naime, određivanjem raspodele temperature iz (4.1) može se odrediti snaga toplotnog provođenja, a potom i toplotni otpor cilindričnog zida [L.1], [L.9] iz:

$$R_T = \frac{\rho_t}{2\pi} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad (4.3)$$

gde je:

R_T [Km/W] - toplotni otpor cilindričnog zida;
 ρ_t [Km/W] - specifična toplotna otpornost cilindričnog zida;
 r_2 [mm] - spoljašnji poluprečnik cilindra i
 r_1 [mm] - unutrašnji poluprečnik cilindra.

Toplotni otpor cilindričnog zida sa više slojeva određuje se kao zbir toplotnih otpora pojedinih slojeva:

$$R_T = \frac{1}{2\pi} \cdot \sum_{i=1}^n \rho_{ti} \cdot \ln \frac{r_{i+1}}{r_i} \quad (4.4)$$

Predhodni izrazi biće iskorišćeni za određivanje toplotnih otpora slojeva kabla.

4.10.1 Toplotni otpori slojeva kabla

Za potrebe proračuna strujnog opterećenja kablovi se u termičkom smislu mogu predstaviti sa dva ili tri sloja:

- izolacijom;
- slojem preko metalnog plašta (NPO kabl) ili ekrana (XHE kabl) i
- slojem preko mehaničke zaštite (armature) kod trožilnih konstrukcija.

Toplotni otpor izolacije R_{T1} kod jednožilnih kablova je [L.1], [L.9]:

$$R_{T1} = \frac{\rho_{ti}}{2\pi} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad (4.5)$$

gde je:

ρ_{ti} [Km/W] - specifična toplotna otpornost izolacije;
 r_2 [mm] - spoljašnji poluprečnik izolacije i
 r_1 [mm] - unutrašnji poluprečnik izolacije (poluprečnik preko provodnika).

Kod trožilnih kablova sa sektorskim provodnicima i pojasnom izolacijom toplotni otpor izolacije R_{T13s} je [L.9]:

$$R_{T13s} = \frac{3 \cdot \rho_{ti}}{2\pi} \cdot F \cdot \ln \frac{d_p}{2r_p}, \quad (4.6)$$

gde je:

d_p [mm] - spoljašnji prečnik pojasne izolacije;
 r_p [mm] - poluprečnik kruga opisanog preko sva tri provodnika i
 F - faktor koji je:

$$F = 1 + \frac{6 \delta_p}{2\pi \cdot (d_x + 2\delta_p) - 2\delta_p}, \quad (4.7)$$

gde je:

δ_p [mm] - debljina izolacije preko jednog provodnika i
 d_x [mm] - prečnik ekvivalentnog kružnog provodnika površine poprečnog preseka kao i sektorski provodnik.

Za trožilne pojasne kablove sa provodnicima kružnog preseka pored izraza (4.6) i (4.7) za toplotni otpor izolacije R_{T13k} moguće je koristiti i izraz [L.9]:

$$R_{T13k} = \frac{\rho_{ii}}{2\pi} \cdot \left(0,85 + 0,2 \frac{\delta_{pi}}{\delta_p} \right) \cdot \ln \left[\left(8,3 - 2,2 \frac{\delta_{pi}}{\delta_p} \right) \cdot \frac{\delta_p}{r_{p1}} + 1 \right], \quad (4.8)$$

gde je:

δ_{pi} [mm] - debljina pojasne izolacije;

δ_p [mm] - debljina izolacije preko jednog provodnika i

r_{p1} [mm] - poluprečnik jednog provodnika.

Toplotni otpori izolacije za trožilne pojasne kablove R_{T13s} i R_{T13k} , dati izrazima (4.6) i (4.8) odnose se na jednu žilu, tako da je ukupni toplotni otpor izolacije trožilnog kabla R_{T1} dat izrazima [L.9]:

$$R_{T1} = \frac{R_{T13s}}{3} \quad i \quad (4.9)$$

$$R_{T1} = \frac{R_{T13k}}{3} . \quad (4.10)$$

Toplotni otpor sloja preko metalnog omotača (plašta ili ekrana) R_{T2} i toplotni otpor sloja preko mehaničke zaštite R_{T3} (kod NPO kablova) određuju se primenom izraza (4.3) sa adekvatnim vrednostima za poluprečnike i specifičnu toplotnu otpornost cilindričnog sloja.

4.10.2 Strujno opterećenje energetskih kablova položenih u zemlju

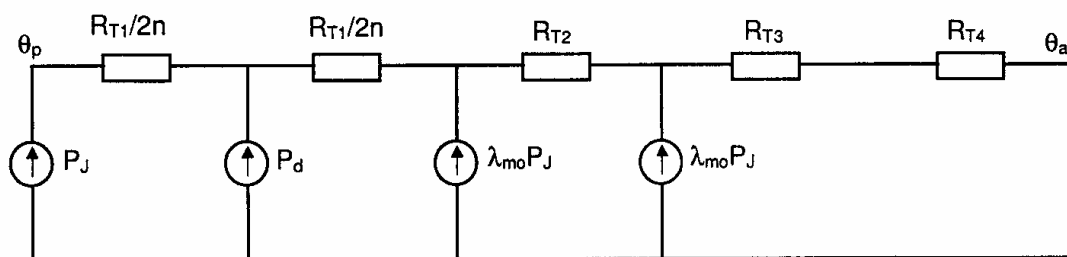
Termički trajno dozvoljena struja kabla u stacionarnom režimu određena je sa trajno dozvoljenom temperaturom izolacije. Uzrok zagrevanja kabla su:

- Džulovi gubici P_j u provodniku;
- dielektrični gubici P_d u izolaciji;
- gubici zbog cirkulacionih struja u metalnom plaštu (ekranu) i
- gubici zbog vihoranih struja i histerezisa u mehaničkoj zaštiti.

Dielektrični gubici su raspodeljeni po celoj zapremini izolacije, ali se može smatrati da je izvor ovih gubitaka koncentrisan na mestu koje deli toplotni otpor izolacije na dva jednaka dela. **Gubici u metalnom omotaču i mehaničkoj zaštiti** iskazuju se pomoću koeficijenta srazmernosti sa Džulovim gubicima u provodniku λ_{mo} i λ_{ar} , respektivno. Ekvivalentna šema za **toplotni proračun kabla položenog u zemlji**, sa gubicima i toplotnim otporima kao što je predhodno definisano, prikazana je na slici 4.14. Toplotni otpor ambijenta (okolne zemlje) označen je sa R_{T4} , dok je sa n označen broj provodnika u kابلu.

Pad temperature od površine provodnika θ_p do tačke u okolnoj sredini (zemlji) sa konstantnom temperaturom θ_a je [L.9]:

$$\theta_p - \theta_a = \left(P_j + \frac{P_d}{2} \right) \cdot \frac{R_{T1}}{n} + [P_j \cdot (1 + \lambda_{mo}) + P_d] \cdot R_{T2} + [P_j \cdot (1 + \lambda_{mo} + \lambda_{ar}) + P_d] \cdot (R_{T3} + R_{T4}). \quad (4.11)$$



Sl.4.14 Ekvivalentna šema za toplotni proračun kablova položenog u zemlju

Predhodni izraz se može predstaviti pomoću fiktivnih toplotnih otpora prema:

$$\theta_p - \theta_a = P_j \cdot (1 + \lambda_{mo} + \lambda_{ar}) \cdot (R_{Tki} + R_{T4}) + P_d \cdot (R_{Tkd} + R_{T4}), \quad (4.12)$$

gde je fiktivni toplotni otpor za gubitke izazvane strujom

$$R_{Tki} = \frac{\frac{R_{T1}}{n} + (1 + \lambda_{mo}) \cdot R_{T2}}{1 + \lambda_{mo} + \lambda_{ar}} + R_{T3} \quad (4.13)$$

fiktivni toplotni otpor za dielektrične gubitke

$$R_{Tkd} = \frac{R_{T1}}{2n} + R_{T2} + R_{T3}. \quad (4.14)$$

Takođe, može se uvesti i pojam efektivnog električnog otpora provodnika R_{ef} kojim se svi gubici izazvani strujom lociraju u provodniku:

$$P_j = n \cdot R_{ef} \cdot I^2, \quad (4.15)$$

gde je

$$R_{ef} = R \cdot (1 + \lambda_{mo} + \lambda_{ar}). \quad (4.16)$$

Konačno, iz izraza (4.11), (4.12), (4.13), (4.14), (4.15) i (4.16) može se dobiti **intezitet termički trajno dozvoljene struje** kablova I [A] položenog u zemlju:

$$I = \sqrt{\frac{(\theta_p - \theta_a) - P_d \cdot (R_{Tkd} + R_{T4})}{n \cdot R_{ef} \cdot (R_{Tki} + R_{T4})}}. \quad (4.17)$$

Izraz (4.17) se može znatno uprostiti eliminisanjem dielektričnih gubitaka za sve kablovske mreže napona do 110 kV:

$$I = \sqrt{\frac{\theta_p - \theta_a}{n \cdot R_{ef} \cdot (R_{Tki} + R_{T4})}}. \quad (4.18)$$

Toplotni otpor okolne zemlje R_{T4} odredićemo za slučajeve polaganja u zemlju jednog trofaznog kablova (sistema) i više trofaznih kablova (sistema) za konstantno strujno opterećenje i kada nema isušivanja zemljišta. Proces isušivanja zemljišta se kod kablovskih vodova eliminiše polaganjem kablova u posteljicu sa specijalnom

mešavinom kojom se sprečava migracija vlage. Uticaj promenljivog dijagrama opterećenja je detaljno opisan u [L.1] i [L.9], dok će u ovoj knjizi biti obuhvaćen u praktičnim izrazima za dozvoljeno strujno opterećenje pomoću faktora opterećenja.

Toplotni otpor zemlje se može odrediti pomoću teorije likova sa površinom zemlje kao osom simetrije. Primenom teorije likova (metode ogledanja) pokazuje se da se sa dovoljno tačnosti kabl može posmatrati kao linijski toplotni izvor postavljen u osi kabla, tako da se toplotna otpornost zemlje R_{T4} može iskazati u obliku:

$$R_{T4} = \frac{\rho_{tz}}{2\pi} \cdot \ln \frac{4h}{d_k}, \quad (4.19)$$

gde je:

ρ_{tz} [K·m/W] - specifična toplotna otpornost zemlje;
 h [m] – rastojanje ose kabla od površine zemlje i
 d_k [m] - spoljašnji prečnik kabla.

U opštem slučaju za proizvoljan broj kablova (kablovskih sistema) toplotni otpor zemlje je:

$$R_{T4} = \frac{\rho_{tz}}{2\pi} \cdot \left(\ln \frac{4h}{d_k} + \sum_{j=1}^{n_j} \chi_j \cdot \ln \frac{c'_{jk}}{c_{jk}} \right), \quad (4.20)$$

gde je:

n_j - broj drugih kablova (kablovskih sistema) položenih pored posmatranog kabla;
 χ_j - količnik gubitaka snage j-tog izvora toplote i posmatranog kabla;
 c'_{jk} - rastojanje između kabla i j-tog izvora toplote i
 c_{jk} - rastojanje između kabla i lika j-tog izvora toplote.

U posebnom slučaju se izraz (4.20) za tri jednožilna kabla položena u zemlji može napisati kao:

$$R_{T4} = \frac{\rho_{tz}}{2\pi} \cdot \left(\ln \frac{4h}{d_k} + 2 \ln k_a \right), \quad (4.21)$$

gde se konstanta k_a izračunava iz

$$k_a = \sqrt{\left(\frac{2h}{a}\right)^2 + 1}, \quad (4.22)$$

gde je:

a [m] - rastojanje između osa kablova.

Karakteristike zemljišta u okolini polaganja kabla se obično određuju merenjem, ali ako rezultati merenja nisu dostupni mogu se koristiti podaci iz tabele 4.3.

Tabela 4.3 Specifične toplotne otpornosti i gustine pojedinih materijala.

Materijal	Specifična toplotna otpornost ρ_{tz} [K·m/W]	Gustina γ [kg/m ³]
normalno vlažno zemljište	0,4 - 0,7	1780
normalno suvo zemljište	1,3	1490
suvi pesak	1 - 1,2	1460
vlažan pesak	0,5 - 0,6	1860
suva glina	1,4	1520
vlažna glina	0,8	1710
suv rečni pesak	3	1650
normalno vlažan rečni pesak	0,9 - 1	1800
rečni pesak zasićen vlagom	0,75	2000

Za stacionarne režime, sa dovoljno tačnosti za inženjerske proračune, **dozvoljeno strujno opterećenje I_{doz} [A] kablovskog voda** računa se na osnovu jednakosti proizvedene i odvedene količine toplote, prema izrazu [L.3, TP-3]:

$$I_{doz} = k_{op} \cdot k_{\theta} \cdot k_p \cdot k_{bk} \cdot I_{nd} \quad (4.23),$$

gde su koeficijenti:

$$k_{\theta} = 1,0 + 0,007 \cdot (20 - \theta_t) \quad (4.24),$$

gde je θ_t temperatura tla (zemlje) na dubini polaganja: $\theta_t = 5$ °C za kablove naznačenog napona do 20 kV i $\theta_t = 8$ °C naznačenog napona 35 kV.

k_p - za specifičnu toplotnu otpornost tla, iz tabele 4.4

k_{bk} - za više od jednog kabla pod naponom u istom rovu, iz tabele 4.5.

Faktor opterećenja m je odnos srednjeg i maksimalnog opterećenja i za promenljivo (distributivno) opterećenje iznosi oko $m = 0,7$ (koeficijent $k_{op} = 1$) i to približno odgovara dnevnom dijagramu opterećenja sa cikličnim smenjivanjem maksimalnog opterećenja u trajanju od 9 sati, sa opterećenjem u visini 60% maksimalnog opterećenja u narednih 15 sati.

Za stalno (industrijsko) opterećenje je $m = 1$ (koeficijent $k_{op} = 0,75$).

Specifična toplotna otpornost tla ρ_t zavisi od vrste tla (šljunak, pesak, zemlja iz otkopa itd.) i sadržaja vlage u tlu u toku godine. U vreme maksimalnog godišnjeg opterećenja distributivnog konzuma (zimski period) računa se sa normalnom vlažnošću tla ispod slobodnih i asfaltiranih površina u kojima se nalazi kabl, tako da se za praktične proračune i prosečne uslove rada distributivne mreže može da usvoji vrednost: $\rho_t \approx 1$ K·m/W ($k_p = 1$), osim za dominantno peskovito tlo kada može da se usvoji: $\rho_t \approx 1,5$ K·m/W i tada je $k_p \approx 0,86$.

Kada se u isti rov polaže veliki broj energetskih kablova, na primer na izlazu iz TS 110/X kV i TS X/0,4 kV, vrednost sačinioaca k_{bk} može da bude veoma mala i prenosna moć kablova znatno umanjena. Takvi slučajevi treba posebno da se analiziraju. Problem se rešava: usvajanjem većeg preseka provodnika voda, primenom UPE kablova i/ili primenom posteljice od specijalnih mešavina.

Tabela 4.4: Koeficijent promene I_{doz} kablovskog voda u zavisnosti od specifične toplotne otpornosti tla ρ_t

ρ_t [K·m/W]	0,70	1,00	1,20	1,50	2,00	2,50	3,00	
k_p	NPO	1,12	1,00	0,94	0,87	0,78	0,71	0,66
	UPE, PVC	1,14	1,00	0,93	0,85	0,75	0,68	0,62

Tabela 4.5: Koeficijent promene I_{doz} kablovskog voda u zavisnosti od broja kablova b_k položenih u rovu

Broj kablova u rovu b_k	2	3	4	5	6	8	10	
k_{bk}	$a = 0,07$ m	0,82	0,72	0,66	0,62	0,59	0,55	0,52
	$a = 0,20$ m	0,86	0,77	0,73	0,69	0,67	0,63	0,61

a - međusobni razmak između kablova u rovu.

Raspored kablova pri polaganju u isti rov može da bude u jednom nivou ili u dva nivoa ("paket" kablova). Korekcionni faktori u oba ova slučaja su približno jednaki za jednak broj kablova u rovu. Zato se polaganje u dva nivoa preporučuje tamo gde je prostor za smeštaj kablova mali i gde postoje uslovi za sigurno otkrivanje kvara u kابلu i njegovu opravku.

U izrazu (4.23) I_{nd} [A] je naznačena vrednost dozvoljene struje za distributivno opterećenje, standardni tip i presek kablova, tabela 4.6, za referentne uslove date u istoj tabeli.

Tabela 4.6: Naznačene vrednosti dozvoljene struje I_{nd} kablova za promenljivo (distributivno) opterećenje

Presek Al provodnika kablova [mm ²]	Naznačena vrednost dozvoljene struje I_{nd} [A]					
	NN kabl		SN kabl			
	PVC	UPE	10 kV i 20 kV		35 kV	
			NPO	UPE	NPO	UPE
50	141	157	-	-	-	-
95	211	233	190	262	185	253
150	270	300	250	333	235	321
240	-	-	325	436	305	419

$\theta_t = 20^\circ\text{C}$; $\rho_t = 1$ K·m/W; $b_k = 1$; $k_{op} = 1$; $h = 0,7$ m ($h = 1$ m za kabl 35 kV);
 NPO kabl: trožilni (NPO 13-AS, NPZO 13-A itd.);
 UPE SN kabl: tri jednožilna u snopu (XHE 49-A itd.).

Dozvoljeno strujno opterećenje kablova u zimskom periodu I_{dozZ} (vreme maksimalnog godišnjeg opterećenja distributivnog konzuma), **odnosno u letnjem periodu I_{dozL}** , za "prosečne" karakteristike tla ($\rho_t = 1$ K·m/W), jedan kabl u rovu, i ostale uslove koji su karakteristični za konzum Srbije, računaju se iz odnosa (primer 1):

- $I_{dozZ} = 1,105 \cdot I_{nd}$ za kablove nazivnog napona do 20 kV i $I_{dozZ} = 1,084 \cdot I_{nd}$ za kablove nazivnog napona 35 kV;
- $I_{dozL} = I_{nd}$ za sve SN kablove.

Primer 4.1

Odrediti zbirne koeficijente k_{kz} i k_{kl} dozvoljenih strujnih opterećenja kablovskog voda položenog u zemlju:

- a) zimi (maksimalno godišnje opterećenje distributivnog konzuma), i
- b) leti.

Rešenje:

a) Prosečna dnevna temperatura tla zimi za naše podnevlje iznosi: $\theta_t = 5^\circ\text{C}$, odnosno $\theta_t = 8^\circ\text{C}$, što je potvrđeno dugogodišnjim merenjima na dubinama koje su približne dubinama polaganja energetskih kablova: 0,7 m za kablove do 20 kV, odnosno 1 m za kablove 35 kV, pa sačinilac promene dozvoljenog strujnog opterećenja kablovskog voda od temperature tla θ_t iznosi:

$$k_\theta = 1 + 0,007 \cdot (20 - \theta_t) = 1 + 0,007 \cdot (20 - 5) = 1,105 \Rightarrow (k_\theta = 1,084 \text{ za kabl } 35 \text{ kV}).$$

U zimskim mesecima, kada je i maksimalno opterećenje distributivnog konzuma, računa se sa normalnom vlažnošću tla, može da se usvoji vrednost specifične toplotne otpornosti tla: $\rho_t \approx 1 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$, pa koeficijent k_p iznosi: $k_p = 1$.

Za promenljivo (distributivno) opterećenje je $k_{op} = 1$, pa dozvoljeno strujno opterećenje, odnosno zbirni koeficijent k_{kz} , kablovskog voda u zimskom periodu iznosi:

$$I_{dozZ} = k_{op} \cdot k_\theta \cdot k_p \cdot k_{bk} \cdot I_{nd} = k_{kz} \cdot I_{nd} = 1,105 \cdot I_{nd} \Rightarrow$$

$$k_{kz} = 1,105 \text{ za kablove do } 20 \text{ kV i } k_{kz} = 1,084 \text{ za kabl } 35 \text{ kV}.$$

b) Izmerena srednja vrednost dnevne temperature tla u letnjem periodu iznosi $\theta_t = 20^\circ\text{C}$, pa sačinilac promene dozvoljenog strujnog opterećenja kablovskog voda od temperature tla θ_t iznosi: $k_\theta = 1$, dok sačiniooci k_p , k_{bk} i k_{op} imaju vrednosti date pod a).

Prema tome, dozvoljeno strujno opterećenje, odnosno zbirni koeficijent k_{kl} , kablovskog voda u letnjem periodu biće:

$$I_{dozL} = k_{op} \cdot k_\theta \cdot k_p \cdot k_{bk} \cdot I_{nd} = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot I_{nd} = k_{kl} \cdot I_{nd} = I_{nd} \Rightarrow$$

$$k_{kl} = 1,0.$$

U tabeli 4.7 daju se rezultati proračuna dozvoljenih strujnih opterećenja kablova sa Al provodnicima u vreme maksimalnog godišnjeg opterećenja distributivnog konzuma - zimski period ($I_{dozZ} = 1,105 \cdot I_{nd}$), odnosno letnji period ($I_{dozL} = I_{nd}$), za "prosečne" karakteristike tla ($\rho_t = 1 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$).

U slučaju napajanja potrošača sa stalnim opterećenjem (industrija koja radi u dve ili tri smene), vrednosti iz tabele 4.7 treba pomnožiti faktorom: $k_{op} = 0,75$.

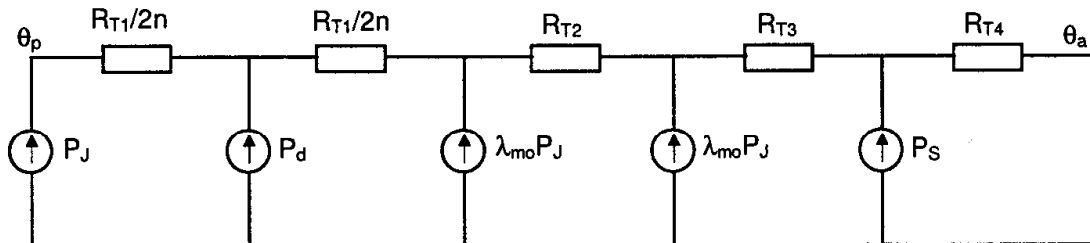
Tabela 4.7 Dozvoljena strujna opterećenja kablova sa Al provodnicima u zimskom i letnjem periodu - distributivni konzum

Izolacija kabla	Presek Al provodnika [mm ²]	Dozvoljena struja kablovskog voda [A]: zimi I_{dozZ} i leti I_{dozL}							
		0,6/1 kV		6/10 kV		12/20 kV		20/35 kV	
		I_{dozZ}	I_{dozL}	I_{dozZ}	I_{dozL}	I_{dozZ}	I_{dozL}	I_{dozZ}	I_{dozL}
PVC	50	156	141	-	-	-	-	-	-
	95	233	211	-	-	-	-	-	-
	150	298	270	271	245	-	-	-	-
	240	-	-	348	315	-	-	-	-
NPO	95	-	-	210	190	210	190	201	185
	150	-	-	276	250	276	250	255	235
	240	-	-	359	325	359	325	331	305
UPE	50	173	157	-	-	-	-	-	-
	95	257	233	290	262	290	262	274	253
	150	331	300	368	333	368	333	348	321
	240	-	-	482	436	482	436	454	419

$\rho_t = 1 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$; $b_K = 1$; $k_{op} = 1$; $\theta_t = 5^\circ\text{C}$ za kablove do 20 kV i $\theta_t = 8^\circ\text{C}$ za kabl 35 kV.

4.10.3 Strujno opterećenje energetskog kabela postavljenog u vazduhu

Određivanje termički trajno dozvoljene struje kabela postavljenog u vazduhu moguće je uraditi na osnovu ekvivalentne šeme sa slike 4.15. Na ovoj šemi je uvedena snaga zagrevanja po jedinici dužine kabela P_s kao posledica izloženosti kabela uticaju sunčevog zračenja, i analitički izrazi za njeno određivanje dati su u poglavlju 5.4.1.



SI.4.15 Ekvivalentna šema za toplotni proračun kabela postavljenog u vazduhu

Primenom postupka koji je izložen za kabl položen u zemlji dobijamo izraz za trajno **dozvoljeno strujno opterećenje kabela postavljenog u vazduhu** [L.9]:

$$I = \sqrt{\frac{(\theta_p - \theta_a) - P_d \cdot (R_{TKd} + R_{T4}) - P_s \cdot R_{T4}}{n \cdot R_{ef} \cdot (R_{TKi} + R_{T4})}} \quad (4.25)$$

Određivanje toplotnog otpora vazduha u literaturi je dato na tri načina:

- zbirnim koeficijentom odvođenja toplote sa površine kabela [L.10];
- koeficijentima odvođenja toplote konvekcijom i zračenjem [L.11] i
- primenom teorije sličnosti sa bezdimenzionim brojevima [L.12].

Toplotni otpor vazduha u ovoj knjizi odredićemo prema [L.11] iz:

$$R_{T4} = \frac{1}{\pi d_k \cdot (f_k \cdot k_k + f_z \cdot k_z)}, \quad (4.26)$$

gde je:

R_{T4} [Km/W] - toplotni otpor vazduha;

d_k [m] - spoljašnji prečnik kabela;

f_k - faktor popravke zbog konvekcije;

f_z - faktor popravke zbog zračenja;

k_k [W/m²·K] - koeficijent odvođenja toplote konvekcijom i

k_z [W/m²·K] - koeficijent odvođenja toplote zračenjem.

Koeficijent odvođenja toplote konvekcijom određuje se iz:

$$k_k = \left(0,919 + \frac{\theta_k + \theta_a}{2 \cdot 369}\right) \cdot \frac{0,0185}{k \cdot d_k} + 1,08 \cdot \left(1,033 - \frac{\theta_k + \theta_a}{2 \cdot 909}\right) \cdot \left(\frac{\theta_k - \theta_a}{k \cdot d_k}\right)^{0,25}, \quad (4.27)$$

gde je:

θ_k [°C] - temperatura površine kabela;

θ_a [°C] - temperatura ambijenta i

k - koeficijent uzajamnog položaja.

Koeficijent uzajamnog položaja ima vrednost $k = 1$ za "usamljen" kabl ili za kablove koji su međusobno dovoljno udaljeni, odnosno $k = 2$ za tri kabla postavljena u snopu.

Koeficijent odvođenja toplote zračenjem određuje se iz:

$$k_z = \frac{\sigma_c \cdot \varepsilon \cdot [(273 + \theta_k)^4 - (273 + \theta_a)^4]}{\theta_k - \theta_a}, \quad (4.28)$$

gde je:

ε - koeficijent emisije toplotnog zračenja (za kablove $\varepsilon = 0,95$) i
 $\sigma_c = 5,674 \times 10^{-8}$ [W/m²·K⁴] - Stefan-Boltzmanova konstanta.

Faktor popravke zbog konvekcije ima vrednosti:

- $f_k=1$ za "usamljen" kabl i tri kabla u ravni i
- $f_k=2/3$ za tri kabla u snopu.

Faktor popravke zbog zračenja ima vrednosti:

- $f_z=1$ za "usamljen" kabl;
- $f_z=1 - 2\arcsin(d_k/2a)$ za centralni kabl od tri kabla u ravni
 (a - rastojanje između osa kablova) i
- $f_z=2/3$ za tri kabla u snopu.

Izrazi (4.27) i (4.28) za koeficijente odvođenja toplote konvekcijom, odnosno zračenjem, ukazuju da toplotni otpor vazduha R_{T4} , izraz (4.26), nije moguće sračunati bez poznavanja temperature na površini kabla θ_k . Kako je ova veličina zavisna od struje kabla, koju tek treba da sračunamo, jasno je da će postupak izračunavanja strujnog opterećenja biti iterativan sa početnim pretpostavljanjem vrednosti za temperaturu na površini kabla. Kada se sa usvojenom vrednošću za temperaturu na površini kabla odredi toplotni otpor vazduha i sračuna strujno opterećenje, moguće je izračunati i stvarnu temperaturu na površini kabla. Ukoliko je razlika pretpostavljene i stvarne vrednosti temperature na površini kabla manja od neke unapred zadate vrednosti, postupak proračuna se prekida, u suprotnom iterativni postupak za određivanje strujnog opterećenja se nastavlja sa proračunatom kao pretpostavljenom temperaturom na površini kabla.

Dozvoljeno strujno opterećenje kabla postavljenog u vazduhu (ili SKS-a), sa zadovoljavajućom inženjerskom tačnošću, proračunava se pomoću [L.3, TP-8]:

$$I_{doz} = k_{op} \cdot k_{\theta} \cdot k_v \cdot k_{sz} \cdot I_{nd} \quad (4.29)$$

gde je:

I_{doz} = dozvoljeno strujno opterećenje kabla, u [A];

k_{op} = sačinilac promene dozvoljenog strujnog opterećenja kabla od faktora opterećenja m - za kablove postavljene u vazduhu je: $k_{op} = 1$ i $m = 0,7$;

k_{θ} = sačinilac promene dozvoljenog strujnog opterećenja kabla od temperature vazduha (ambijenta) θ_v , i u opsegu: $0^{\circ}\text{C} \leq \theta_v \leq +40^{\circ}\text{C}$ ima vrednost:

- $k_{\theta} = 1 + 0,008 \cdot (30 - \theta_v)$,

gde je θ_v temperatura vazduha, i za distributivno opterećenje se računa sa:

4 Distributivni kablovski vodovi

- $\theta_v = 0^\circ\text{C}$ za zimske uslove (vreme maksimalnog opterećenja konzuma), i
 - $\theta_v = 30^\circ\text{C}$ za letnje uslove.
- $k_v =$ sačinilac promene dozvoljenog strujnog opterećenja kabla od brzine vetra v , i usvaja se prema tabeli 4.8;
- $k_{sz} =$ sačinilac promene dozvoljenog strujnog opterećenja kabla od uticaja direktnog sunčevog zračenja i ima vrednost $k_{sz} = 1$ ako je kabl izložen direktnom sunčevom zračenju, odnosno ima vrednosti koje su date u tabeli 4.8 ako kabl nije izložen direktnom sunčevom zračenju;
- $I_{nd} =$ naznačena vrednost dozvoljenog strujnog opterećenja kabla u [A], koju daje proizvođač, i odnosi se na referentne uslove koji su dati u tabeli 4.9.

Sačinilac promene dozvoljenog strujnog opterećenja k_v od brzine vetra v u opsegu $0 \text{ m/s} \leq v \leq 6 \text{ m/s}$, prema tabeli 4.8, ima vrednosti:

- za potrebe planiranja razvoja distributivnog konzuma računa se sa brziom vetra od $v = 0,6 \text{ m/s}$, pa sačinilac k_v iznosi:
 - $k_v = 1,095$;
- za potrebe operativne energetike distributivnog konzuma: prema tabeli 4.8.

Sačinilac promene dozvoljenog strujnog opterećenja zbog uticaja direktnog sunčevog zračenja k_{sz} složena je funkcija brzine vetra v i u opsegu $0 \text{ m/s} \leq v \leq 6 \text{ m/s}$, prema tabeli 4.8, ima vrednosti:

- za potrebe planiranja razvoja distributivnog konzuma računa se sa brziom vetra od $v = 0,6 \text{ m/s}$, pa sačinilac k_{sz} iznosi:
 - $k_{sz} = 1,145$;
- za potrebe operativne energetike distributivnog konzuma: prema tabeli 4.8.

U svim slučajevima kada je kabl (SKS) izložen direktnom sunčevom zračenju sačinilac k_{sz} ima vrednost: $k_{sz} = 1$.

To je slučaj konstantnog - industrijskog opterećenja kao i slučaj promenljivog - distributivnog opterećenja u letnjim mesecima: jun - septembar.

U tabeli 4.10 dati su podaci o dozvoljenim strujnim opterećenjima SN SKS vodova u zimskom i letnjem periodu, za referentne uslove date u istoj tabeli (primer 2).

Tabela 4.8: Sačiniooci promene dozvoljenog strujnog opterećenja kabla (SKS-a) postavljenog u vazduhu zbog vetra k_v i uticaja direktnog sunčevog zračenja k_{sz}

SKS VOD								
v [m/s]	0	0,6	1	2	3	4	5	6
k_v	1	1,095	1,155	1,260	1,360	1,420	1,490	1,510
k_{sz}	1,174	1,145	1,124	1,091	1,067	1,052	1,050	1,049

$k_{sz} = 1$ ako je vod izložen direktnom sunčevom zračenju.

Tabela 4.9: Naznačene vrednosti dozvoljene struje I_{nd} SKS-a

Naznačeni presek [mm ²]	SN SKS vod I_{nd} [A]
50	176
70	217
95	264
$k_{op} = 1$ (distributivno opterećenje) - direktno sunčevo zračenje	
$\theta_p = 90^\circ\text{C}$, $\theta_v = 30^\circ\text{C}$, $v = 0$ m/s	

Tabela 4.10: Dozvoljena strujna opterećenja SKS-a

Vrsta voda	Presek [mm ² Al]	10 kV (20 kV) SKS				
		I_{nd} [A]	I_{dozZ} [A]	k_{dZ}	I_{dozL} [A]	k_{dL}
SKS	50	176	273	1,55	193	1,095
	70	217	336		238	
	95	264	409		289	
k_{dZ} (k_{dL}) - zbirni sačinilac dozvoljenog strujnog opterećenja u zimskom (letnjem) periodu						
<u>Referentni uslovi u zimskom periodu (vreme maks. opterećeja konzuma):</u>						
I_{dozZ} - dozvoljeno strujno opterećenje u zimskom periodu; $\theta_v = 0^\circ\text{C}$; $v = 0,6$ m/s; bez direktnog sunčevog zračenja.						
<u>Referentni uslovi u letnjem periodu:</u>						
I_{dozL} - dozvoljeno strujno opterećenje u letnjem periodu; $\theta_v = 30^\circ\text{C}$; $v = 0,6$ m/s; direktno sunčevo zračenje.						

Primer 4.2

Odrediti zbirne koeficijente k_{dZ} i k_{dL} dozvoljenih strujnih opterećenja SKS-a postavljenog u vazduhu:

- a) zimi (maksimalno godišnje opterećenje distributivnog konzuma), i
b) leti.

Rešenje:

a) Prosečna dnevna temperatura vazduha zimi za naše podnevlje iznosi: $\theta_v \approx 0^\circ\text{C}$, pa sačinilac promene dozvoljenog strujnog opterećenja kablovskog voda od temperature vazduha θ_v iznosi:

$$k_\theta = 1 + 0,008 \cdot (30 - \theta_v) = 1 + 0,008 \cdot (30 - 0) = 1,24.$$

U zimskim mesecima, kada je i maksimalno opterećenje distributivnog konzuma, računa se sa $v=0,6$ m/s i da SKS nije izložen direktnom sunčevom zračenju pa je (tabela 4.8):

$$k_v = 1,095$$

$$k_{sz} = 1,145.$$

Za promenljivo (distributivno) opterećenje je $k_{op} = 1$, pa dozvoljeno strujno opterećenje,

odnosno zbirni koeficijent k_{dZ} , SKS-a u zimskom periodu iznosi:

$$I_{dozZ} = k_{op} \cdot k_{\theta} \cdot k_v \cdot k_{sz} \cdot I_{nd} = 1 \cdot 1,24 \cdot 1,095 \cdot 1,145 \cdot I_{nd} = 1,55 \cdot I_{nd}$$

$$k_{dZ} = 1,55.$$

b) Izmerena srednja vrednost dnevne temperature vazduha u letnjem periodu iznosi $\theta_v \approx 30^\circ\text{C}$, pa sačinilac promene dozvoljenog strujnog opterećenja SKS-a od temperature vazduha θ_v iznosi: $k_{\theta}=1$, kao i sačinilac od uticaja direktnog sunčevog zračenja $k_{sz}=1$, dok sačinilci k_{op} i k_v imaju vrednosti date pod a).

Prema tome, dozvoljeno strujno opterećenje, odnosno zbirni koeficijent k_{dL} , SKS-a u letnjem periodu biće:

$$I_{dozL} = k_{op} \cdot k_{\theta} \cdot k_v \cdot k_{sz} \cdot I_{nd} = 1 \cdot 1 \cdot 1,095 \cdot 1 \cdot I_{nd} = 1,095 \cdot I_{nd}$$

$$k_{dL} = 1,095.$$

4.10.4 Zagrevanje kabla pri kratkom spoju

Proračuni strujnog opterećenja, koji su dati u predhodnim izlaganjima, odnose se na stacionarno odvođenje toplote, to jest određuje se efektivna vrednost naizmjenične struje. Međutim, za razliku od stacionarnih procesa **pri kratkim spojevima, pored naizmjenične, javlja se i aperiodična komponenta struje kratkog spoja**, što zahteva da se toplotni procesi pri kratkom spoju moraju analizirati korišćenjem izraza za vremensku promenu inteziteta struje kratkog spoja. Za razliku od neophodnosti uvažavanja vremenske promenljivosti struje pri kratkom spoju, prenos toplote sa površine kabla na okolnu sredinu može se zanemariti zbog značajno kraćeg vremena trajanja kratkog spoja od vremenske konstante zagrevanja kabla.

Ovom pretpostavkom o adijabatskom zagrevanju provodnika kabla čini se izvesna greška, ali na stranu sigurnosti.

Korišćenjem zakona o održanju energije, odnosno činjenice da sva proizvedena količina toplote ide na povećanje temperature provodnika, **efektivna vrednost naizmjenične komponente dozvoljene struje kratkog spoja** može da se odredi pomoću izraza [L.9]:

$$I_{ksd} = K \cdot \frac{S}{\sqrt{t_i}} = \frac{1}{k_1} \cdot \frac{1}{k_2} \cdot \frac{S}{\sqrt{t_i}}, \quad (4.30)$$

gde je:

I_{ksd} [kA] - dozvoljena vrednost struje kratkog spoja;

S [mm²] - površina poprečnog preseka provodnika kabla;

t_i [s] - vreme isključenja kvara i

K [kA·mm²·s^{1/2}] - konstanta zavisna od vrste materijala provodnika (k_1) i njegove početne temperature (k_2) i određuje se iz:

$$K = \frac{1}{k_1} \cdot \frac{1}{k_2} = \sqrt{\frac{\gamma \cdot c}{\alpha \cdot k_d \cdot \rho_{20}}} \cdot \sqrt{\ln \frac{1 + \alpha(\theta_{kd} - 20)}{1 + \alpha(\theta_{poc} - 20)}}, \quad (4.31)$$

gde je:

- γ [kg/m³] - gustina materijala provodnika;
 c [J/kg·K] - specifična toplota materijala provodnika;
 α [1/K] - temperaturni koeficijent promene električne otpornosti;
 k_d - koeficijent dopunskih gubitaka usled površinskog i efekta blizine;
 ρ_{20} [Ωm] - specifična električna otpornost na 20 °C;
 θ_{kd} [°C] - kratkotrajno dozvoljena temperatura provodnika i
 θ_{poc} [°C] - temperatura provodnika pre kratkog spoja.

Kako se zbog ne poznavanja režima opterećenja pre kratkog spoja najčešće smatra da je režim sa kvarom nastao iz naznačenog opterećenja kabla, tada veličina K postaje konstanta. Pod ovim pretpostavkama efektivna vrednost naizmenične komponente struje kratkog spoja isključivo je funkcija od vremena isključenja kratkog spoja.

Primer 4.3

Za kabl XHE 49-A, 3x1x150/16 mm², Al/Cu, 6/10 kV odrediti efektivnu vrednost naizmenične komponente struje kratkog spoja za vreme od $t_i=1s$ za:

a) provodnik sa karakteristikama: $\theta_{kdp} = 250$ °C, $\theta_{pocp} = 90$ °C, $\gamma_{Al} = 2700$ kg/m³; $c_{Al} = 920$ J/kgK, $\rho_{20Al} = 2,87 \times 10^{-8}$ Ωm, $\alpha_{20Al} = 0,0042$ K⁻¹;

b) električnu zaštitu sa karakteristikama: $\theta_{kdez} = 250$ °C, $\theta_{poccz} = 80$ °C, $\gamma_{Cu} = 8920$ kg/m³, $c_{Cu} = 385$ J/kgK, $\rho_{20Cu} = 1,78 \times 10^{-8}$ Ωm, $\alpha_{20Cu} = 0,00392$ K⁻¹.

Rešenje:

a) Konstanta materijala za provodnik K_p određuje se iz (4.31):

$$K_p = \sqrt{\frac{\gamma_{Al} c_{Al}}{\alpha_{Al} k_d \rho_{20Al}} \ln \frac{1 + \alpha_{Al} (\theta_{kdp} - 20)}{1 + \alpha_{Al} (\theta_{pocp} - 20)}} = \sqrt{\frac{2700 \cdot 920}{0,0042 \cdot 1 \cdot 2,87 \cdot 10^{-8}} \ln \frac{1 + 0,0042(250 - 20)}{1 + 0,0042(90 - 20)}}$$

$$K_p = 9283,99 \cdot 10^4 \text{ Am}^{-2} \text{ s}^{1/2} = 92,84 \cdot 10^{-3} \text{ kAmm}^{-2} \text{ s}^{1/2}.$$

Dozvoljena efektivna vrednost naizm. komponente struje kratkog spoja za vreme $t_i = 1s$ je:

$$I_{ksdp} = K_p \frac{S_p}{\sqrt{t_i}} = 92,84 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{150}{\sqrt{1}} = 13,92 \text{ kA}.$$

b) Konstanta materijala za električnu zaštitu K_{ez} određuje se iz (4.31):

$$K_{ez} = \sqrt{\frac{\gamma_{Cu} c_{Cu}}{\alpha_{Cu} k_d \rho_{20Cu}} \ln \frac{1 + \alpha_{Cu} (\theta_{kdez} - 20)}{1 + \alpha_{Cu} (\theta_{poccz} - 20)}} = \sqrt{\frac{8920 \cdot 385}{0,00392 \cdot 1 \cdot 1,78 \cdot 10^{-8}} \ln \frac{1 + 0,00392(250 - 20)}{1 + 0,00392(80 - 20)}}$$

$$K_{ez} = 22160,1 \cdot 10^4 \text{ Am}^{-2} \text{ s}^{1/2} = 221,6 \cdot 10^{-3} \text{ kAmm}^{-2} \text{ s}^{1/2}.$$

Dozvoljena efektivna vrednost naizm. komponente struje zemljospoja za vreme $t_i=1s$ je:

$$I_{ksdez} = K_{ez} \frac{S_{ez}}{\sqrt{t_i}} = 221,6 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{16}{\sqrt{1}} = 3,54 \text{ kA}.$$

4.11 Struje u električnim zaštitama za vreme redovnog pogona trofaznih kablovskih vodova izvedenih sa jednožilnim kablovima

Osnovni zadatak električne zaštite jednožilnog energetskog kabla jeste da se spoljašnja površina izolacije faznog provodnika duž cele trase kabla dovede na isti potencijal i da taj potencijal bude praktično jednak potencijalu okolnog tla. Kada se to ostvari, između električne zaštite kabla koji je pod naponom i okolnog tla ne postoji električno polje, što znači da gradijent potencijala postoji samo u izolaciji oko faznog provodnika, a van izolacije ga nema. Zbog toga se kaže da električna zaštita, pored ostalog, "ograničava električno polje unutar kabla".

Međutim, mnogo značajnija posledica izjednačavanja potencijala spoljašnje površine izolacije faznog provodnika je uspostavljanje radialne forme električnog polja u celom kablju, čime se postižu uštede u izolacionom materijalu.

Svaka tačka na električnoj zaštiti može da bude na istom potencijalu samo ako se ponište elektromotorne sile (ems) koje se pod dejstvom vremenski promenljivog magnetskog polja struja faznih provodnika indukuju u električnoj zaštiti. U kablovskomvodu to može da se ostvari na jednostavan, relativno jeftin i efikasan način: kratkim spajanjem sve tri električne zaštite na oba kraja kablovske deonice postiže se da se pod dejstvom indukovanih ems uspostave cirkulacione struje koje padovima napona na impedansama električnih zaštita kompenzuju indukovane ems. Kada se na taj način eliminišu potencijalne razlike između bilo koje dve tačke električne zaštite, izjednačavanje sa potencijalom tla postiže se uzemljavanjem kratko spojenih električnih zaštita bar na jednom njihovom kraju. Prema tome, struja koja za vreme redovnog pogona postoji u električnoj zaštiti trofaznog kablovskog voda normalna je pojava, a svaki izostanak ove struje siguran je znak da vod ne radi u normalnim uslovima.

Međutim, struje u električnim zaštitama stvaraju dodatne Džulove gubitke, što predstavlja cenu kojom se plaća primena ove metode. Kod kablova čiji je presek veći od 500 mm^2 , a to su po pravilu kablovi naznačenog napona 64/110 kV i više, Džulovi gubici u električnoj zaštiti postaju veći od gubitaka u faznom provodniku, pa je za poništavanje indukovanih ems umesto cirkulacionih struja ekonomičnije primeniti **preplitanje električnih zaštita faznih žila**. Naravno, ova metoda podrazumeva primenu dodatne opreme i pribora, što povećava cenu gradnje, tako da se ona isplati u mrežama u kojima je cena dodatnih gubitaka veća od dodatnih investicionih ulaganja potrebnih za preplitanje.

Trofazni kablovski vod, koji je izveden jednožilnim kablovima sa UPE izolacijom, sastoji se od ukupno šest približno paralelnih provodnika: tri fazna provodnika i tri električne zaštite. Kod ovih kablova električna zaštita svake fazne žile izvedena je od bakarnih žica namotanih preko UPE izolacije. Preko ovih žica namotana je u kontraspirali tanka bakarna traka. Ovakva električna zaštita može da se sa dovoljnom tačnošću aproksimira tankim šupljim cilindričnim provodnikom čija se osovina poklapa sa osovinom sopstvenog faznog provodnika.

U ovoj analizi sopstvena (podužna) jedinična impedansa $z_{\alpha\alpha}$ provodnika α [Ω/km] pri frekvenciji $f = 50 \text{ Hz}$ računata je po sledećem izrazu, datom u [L.4]:

$$z_{\alpha\alpha} = r_{\alpha} + \frac{\pi}{25} \cdot P + j \frac{\pi}{50} \left(\ln \frac{D_{\alpha\alpha}^{(lik)}}{SGP_{\alpha}} + 2Q \right) \quad (4.32)$$

Međusobna jedinična (podužna) impedansa $z_{\alpha\beta}$ između provodnika α i provodnika β u [Ω/km] računata je prema izrazu:

$$z_{\alpha\beta} = \frac{\pi}{25} \cdot P + j \frac{\pi}{50} \left(\ln \frac{D_{\alpha\beta}^{(lik)}}{SGR_{\alpha\beta}} + 2Q \right). \quad (4.33)$$

U izrazima (4.32) i (4.33) je:

r_{α} [Ω/km]- jedinična otpornost provodnika α pri frekvenciji $f = 50$ Hz;

SGP_{α} [m] - srednji geometrijski poluprečnik provodnika α ;

$SGR_{\alpha\beta}$ [m] - srednje geometrijsko rastojanje između provodnika α i β ;

$D_{\alpha\alpha}^{(lik)}$ [m] - rastojanje između prov. α i njegovog lika u odnosu na površinu tla;

$D_{\alpha\beta}^{(lik)}$ [m] - rastojanje između prov. α i lika prov. β u odnosu na površinu tla i

P, Q - polinomi čiji su članovi funkcije specifične otpornosti tla, horizontalne projekcije $SGR_{\alpha\beta}$ i rastojanja $D_{\alpha\alpha}^{(lik)}$ i $D_{\alpha\beta}^{(lik)}$.

Polinomi P i Q u izrazima (4.32) i (4.33) definisani su na sledeći način:

$$P = \frac{\pi}{8} - \frac{1}{3\sqrt{2}} k \cdot \cos \theta + \frac{k^2}{16} \cos 2\theta \cdot \left(0,6728 + \ln \frac{2}{k} \right) + \frac{k^2}{16} \cdot \sin 2\theta + \frac{k^3 \cdot \cos 3\theta}{45\sqrt{2}} - \frac{\pi k^4 \cdot \cos 4\theta}{1536} \quad (4.34)$$

$$Q = -0,0386 + \frac{1}{2} \ln \frac{2}{k} + \frac{1}{3\sqrt{2}} \cdot k \cdot \cos \theta - \frac{\pi k^2}{64} \cdot \cos 2\theta + \frac{k^3 \cdot \cos 3\theta}{45\sqrt{2}} - \frac{k^4 \cdot \theta \cdot \sin 4\theta}{384} - \frac{k^4 \cdot \cos 4\theta}{384} \cdot \left(\ln \frac{2}{k} + 1,0895 \right) \quad (4.35)$$

Kada se račun sprovodi prema izrazu (4.32) tada je:

$$k = 2,81 \cdot 10^{-3} D_{\alpha\alpha}^{(lik)} \cdot \sqrt{\frac{f}{\rho}} \quad (4.36)$$

$$\theta = 0 \quad (4.37)$$

Kada se račun sprovodi prema formuli (4.33) tada je:

$$k = 2,81 \cdot 10^{-3} D_{\alpha\beta}^{(lik)} \sqrt{\frac{f}{\rho}} \quad (4.38)$$

$$\theta = \arcsin(SGR_{\alpha\beta} / D_{\alpha\beta}^{(lik)}). \quad (4.39)$$

U izrazima (4.36) do (4.39) je:

ρ [Ωm] - specifična otpornost tla;

$SGR_{\alpha\beta}$ [m] - horizontalna projekcija srednjeg geometrijskog rastojanja između provodnika α i β

Provodnici kablovskih žila mogu radi preglednosti da se respektivno označe indeksima 1, 2 i 3, a njima pripadajuće električne zaštite indeksima 4, 5 i 6. U skladu sa ovim sopstvene jedinične impedanse faznih provodnika biće označene sa Z_{11} , Z_{22} i Z_{33} , a sopstvene jedinične impedanse električnih zaštita sa Z_{44} , Z_{55} i Z_{66} . Nadalje, međusobna jedinična impedansa između faznih provodnika 2 i 3 biće označena sa Z_{23} , međusobna jedinična impedansa između električnih zaštita 4 i 5 biće označena sa Z_{45} itd.

Impedanse $[\Omega]$ faznih provodnika i električnih zaštita trofaznog kablovskog voda dužine l [km] sračunate prema navedenim formulama mogu da se poslažu po rastućim indeksima u kvadratnu matricu impedansi Z_6 koja je formata 6×6 i koja može da se napiše kao:

$$Z_6 = [Z_{ij}] \cdot l, \quad i, j = 1, 2, \dots, 6, \quad (4.40)$$

gde su z_{ij} podužne jedinične impedanse faznih provodnika i električnih zaštita. Elemente glavne dijagonale ove matrice čine sopstvene impedanse pojedinih provodnika, dok vandijagonalne elemente čine njihove međusobne impedanse.

Neka su sada kompleksne struje kroz provodnike faza L1, L2 i L3 kablovskog voda respektivno označene sa I_{11} , I_{21} i I_{31} , a neka su kompleksne struje električnih zaštita faza L1, L2 i L3 označene sa I_{41} , I_{51} i I_{61} . Ovih šest kompleksnih struja mogu u matričnom obliku da se predste kao vektor-kolona formata 6×1 :

$$I_6 = [I_{i1}]^T \cdot l, \quad i = 1, 2, \dots, 6. \quad (4.41)$$

Ako su V_{p1} , V_{p2} , V_{p3} i V_{k1} , V_{k2} , V_{k3} respektivni potencijali na početku i kraju tri faza provodnika, tada suma svih elektromotornih i elektrotopornih sila duž svakog faznog provodnika mora biti jednaka razlici potencijala njegovih krajeva, tj. naponu:

$U_i = V_{pi} - V_{ki}$ koji u provodniku i održava struju I_i . U opštem slučaju, kolo svake od tri električne zaštite sastoji se od zatvorene konture koju čine serijski vezane sopstvena impedansa električne zaštite Z_{ii} , impedansa uzemljenja na početku voda R_p i impedansa uzemljenja na kraju voda R_k .

Suma svih elektromotornih i elektrotopornih sila duž pomenute zatvorene konture mora biti jednaka nuli. Uz navedene pretpostavke, skup koga čine naponi između krajeva faznih provodnika i naponi između krajeva električnih zaštita u matričnom obliku može da se predstavi kao vektor-kolona formata 6×1 :

$$U_6 = [U_1 \ U_2 \ U_3 \ 0 \ 0 \ 0]^T. \quad (4.42)$$

Ako se zanemare vrtložne i kapacitivne struje [L.6], tada se veza između struja i napona u faznim provodnicima i električnim zaštitama posmatranog kablovskog voda čija je dužina l [km], može opisati matričnom relacijom:

$$Z_6 \cdot l \cdot I_6 = U_6. \quad (4.43)$$

Matrica impedansi i vektori struja i napona iz (4.43) mogu strukturalno da se prikažu pomoću pogodno izabranih submatrica i subvektora. Matrica Z_6 može da se prikaže preko matrice impedansi z_f faznih provodnika:

$$z_f = [z_{ij}], \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (4.44)$$

zatim, preko matrice impedansi z_e električnih zaštita i preko matrice međusobnih

impedansi z_m između faznih provodnika i električnih zaštita u [Ω /km]:

$$Z_m = \begin{bmatrix} Z_{14} & Z_{15} & Z_{16} \\ Z_{24} & Z_{25} & Z_{26} \\ Z_{34} & Z_{35} & Z_{36} \end{bmatrix}. \quad (4.45)$$

Uz pretpostavku da su sve tri električne zaštite na oba svoja kraja povezane na isto uzemljenje, tj. da su preko uzemljenja one ujedno i kratko spojene, matrica impedansi z_e električnih zaštita ima oblik matičnog zbira:

$$z_e = [z_{ij}] + \frac{1}{\ell} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot R_z, \quad \text{za } i, j = 4, 5, 6, \quad (4.46)$$

pri čemu je: $R_z = R_p + R_k$, l je dužina kablovske deonice, a R_p i R_k impedanse uzemljenja u na početku i na kraju voda.

Kada se kablovska deonica za koju se vrši proračun sastoji od v segmenata sa različitim rasporedom faznih žila u rovu, tada se matrica z_m umesto po formuli (4.45) izračunava pomoću izraza:

$$z_m = \sum_{k=1}^v z_m^{(k)} p_k, \quad (4.47)$$

a matrica z_e pomoću izraza:

$$z_e = \sum_{k=1}^v z_e^{(k)} p_k + \frac{1}{\ell} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot R_z. \quad (4.48)$$

U formulama (4.47) i (4.48) $z_m^{(k)}$ je matrica međusobnih impedansi između faznih provodnika i električnih zaštita koja odgovara rasporedu faznih žila na segmentu k , a $z_e^{(k)}$ je matrica impedansi z_e električnih zaštita na istom segmentu.

Neimenovan broj p_k u oba izraza definisan je kao količnik:

$$p_k = \frac{\ell_k}{\ell}, \quad (4.49)$$

gde je ℓ_k dužina segmenta k , a l ukupna dužina deonice za koju se izvodi proračun.

Pošto je $\sum_{k=1}^v \ell_k = \ell$ prema definiciji (4.49) uvek mora biti ispunjeno:

$$\sum_{k=1}^v p_k = 1. \quad (4.50)$$

Vektor I_6 može da se prikaže pomoću sledeća dva vektora: vektora–kolone struja kroz fazne provodnike:

$$I_i = [I_{ij}], \quad i = 1, 2, 3 \quad (4.51)$$

i vektora–kolone struja kroz električne zaštite:

$$I_e = [I_{i1}], \quad i = 4,5,6. \quad (4.52)$$

Vektor U_6 može da se prikaže pomoću vektora napona između početka i kraja faznih provodnika L1, L2 i L3:

$$U_f = [U_{ii}], \quad i=1,2,3 \quad (4.53)$$

i nula-vektora formata 3×1 .

Sa navedenim označavanjima posle razbijanja na blokove matična relacija (4.43) može se predstaviti u obliku:

$$\begin{bmatrix} Z_f & Z_m \\ Z_m^T & Z_e \end{bmatrix} \cdot \ell \cdot \begin{bmatrix} I_f \\ I_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_f \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4.54)$$

gde je sa 0 označen nula-vektor.

Jednačina (4.54) razbija se na dve matične jednačine:

$$Z_f \cdot \ell \cdot I_f + Z_m \cdot \ell \cdot I_e = U_f \quad (4.55)$$

$$Z_m^T \cdot \ell \cdot I_f + Z_e \cdot \ell \cdot I_e = 0 \quad (4.56)$$

iz kojih se posle skraćivanja (4.56) sa I i rešavanja po I_e dobija relacija:

$$I_e = -Z_e^{-1} \cdot Z_m^T \cdot I_f \quad (4.57)$$

kojom se matrica struja kroz tri uzemljene električne zaštite izražava u funkciji struja kroz fazne provodnike [L.4], [L.5] i [L.6].

Pomoću (4.57) sažeto se opisuje fizički proces uspostavljanja struja u električnim zaštitama jednožilnih kablova za vreme redovnog pogona: u zatvorenim kolima koja obrazuju električne zaštite i zemlja kao povratni provodnik, indukuju se pod dejstvom naizmeničnih magnetskih polja struja faznih provodnika naizmenične elektromotorne sile $Z_m^T \cdot I_f$, a indukovane ems uspostavljaju u ovim kolima naizmenične struje koje su ograničene impedansama tih kola Z_e . Intenziteti ovih struja ne zavise od sopstvenih i međusobnih impedansi faznih provodnika, budući da u izrazu (4.57) ne figuriše matrica Z_f .

Proračuni cirkulacionih struja kroz električne zaštite koji su dati u [L.4] i [L.6] odnose se na kablove XHE 49-A, $3 \times 1 \times 150 \text{ mm}^2$, 12/20 kV i XHE 49-A, $3 \times 1 \times 1000 \text{ mm}^2$, 64/110 kV, respektivno.

U tabeli 4.11, za navedene tipove kablova, dati su podaci za struje kroz električne zaštite kablova položenih u ravni za osna rastojanja od 180 mm, odnosno 182 mm, respektivno. Naznačena strujna opterećenja za ove kablove i polaganje u ravni su 310 A i 680 A, respektivno.

Pri proračunima za kablove 12/20 kV razmatrana je specifična električna otpornost tla od $20 \Omega\text{m}$, dok je kod kablova 64/110 kV razmatrana specifična električna otpornost tla od $50 \Omega\text{m}$.

Opterećenja kabla se uvek razmatraju kao simetrična.

Tabela 4.11: Struje kroz električne zaštite za kablove položene u ravni

Tip Kabela	Raspored faza po žilama			Struje u električnim zaštitama [A]			Struja kroz tlo [A]
	A	B	C	Žila A	Žila B	Žila C	
XHE 49-A, 12/20 kV 1x150 mm ² ,	L1	L2	L3	59,3	79,3	71,4	32,4
XHE 49-A, 64/110 kV 1x1000 mm ²	L1	L2	L3	374,5	244,4	315,6	16,7

Za iste tipove kablova proračunate su cirkulacione struje kroz električne zaštite za polaganje u snopu, pri čemu naznačena struja za kablove 12/20 kV iznosi 300 A, a za kablove 64/110 kV iznosi 785 A. Rezultati proračuna dati su u tabeli 4.12.

Tabela 4.12: Struje kroz električne zaštite za kablove položene u snopu

Tip Kabela	Raspored faza po žilama			Struje u električnim zaštitama [A]			Struja kroz tlo [A]
	A	B	C	Žila A	Žila B	Žila C	
XHE 49-A, 12/20 kV 1x150 mm ² ,	proizvoljan			27,4	27,4	27,4	0,03
XHE 49-A, 64/110 kV 1x1000 mm ²	proizvoljan			187,5	187,5	187,5	0

U tabelama 4.11 i 4.12 se lako uočava da vrednosti cirkulacionih struja u električnim zaštitama za visokonaponske kablove nisu beznačajne, pa da se sledstveno tome stvaraju i značajni gubici u električnim zaštitama, što konačno izaziva smanjenje naznačene struje kabla (prenosnog kapaciteta). Zbog toga se za visokonaponske kablove položene u ravni najčešće primenjuje **transpozicija električnih zaštita** (**cross-bonded** system), kao mera za smanjenje struja u električnim zaštitama u redovnom pogonu.

Kada se transpozicija vrši na jednakim dužinama, struje u električnim zaštitama su jednake za kablove položene u ravni, i primenom (4.57) dobija se izraz za struju kroz električnu zaštitu [L.6]:

$$I_e = \frac{Z_{42} - Z_{43}}{3Z_{44} + 4Z_{45} + 2Z_{46}} I_B, \quad (4.58)$$

gde je I_B struja u provodniku srednje žile trofaznog sistema.

Proračunata vrednost struje kroz električnu zaštitu za transpoziciju električnih zaštita kablova trofaznog sistema položenih u ravni iznosi 5,98 A, dok je struja kroz uzemljivač 17,95 A.

Ukoliko su kablovi položeni u snopu i izvrši se transpozicija električnih zaštita na jednakim dužinama, tada je:

$$Z_{42} = Z_{43} \quad (4.59)$$

$$I_e = 0, \quad (4.60)$$

odnosno kroz električne zaštite neće teći cirkulacione struje.

U elektrodistributivnim mrežama Srbije **tipsko rešenje** za polaganje jednožilnih UPE kablova nazivnih napona od 10 kV do 110 kV je **u trouglastom snopu**.

Polaganje kablova u ravni jedino može da bude opravdano za kablove 110 kV radi dobijanja većeg prenosnog kapaciteta, jer je njihova cena visoka, ali se tada u svakom slučaju mora primenjivati transpozicija električnih zaštita.

Pored ova dva načina (polaganje kablova u trouglastom snopu i transpozicija električnih zaštita) za smanjenje gubitaka u električnim zaštitama zbog cirkulacionih struja u elektrodistributivnim mrežama Srbije se ne primenjuje nijedan drugi metod. Naime, cirkulacione struje u električnim zaštitama, a samim tim i gubici, bi se mogle eliminisati izolovanjem jednog kraja električne zaštite. Međutim, ovaj metod se ne koristi jer bi se na električnim zaštitama pojavili visoki potencijali i ne bi se koristila uzemljenja susednih TS SN/NN za smanjenje impedanse uzemljenja u sistemu uzemljenja. Takođe, povećale bi se i vrednosti redukcionog faktora.

Međusobni uticaj drugih paralelnih energetskih kablova na cirkulacione struje u električnim zaštitama posmatranog trofaznog kablovskog sistema je zanemarljiv i ne dostiže 1 % [L.4]. Ovakav rezultat može da se objasni činjenicom da je već na rastojanjima reda 0,3 m od ose posmatranog voda resultantno magnetno polje, koje zajedno stvaraju struje faznih provodnika i struje električnih zaštita, veoma slabo zbog međusobne fazne pomenosti ovih struja, kao i zbog toga što magnetska polja struja električnih zaštita slabe magnetska polja faznih struja.

4.12 Kablovski pribor

Kablovski pribor služi za zatvaranje krajeva kabela radi sprečavanja prodora vlage, što se postiže pomoću kablovskih završnica (glava) i kablovskih spojnika koje služe za nastavljajnje.

Za spajanje provodnika preporučuje se **postupak presovanja**, ali je dozvoljeno korišćenje i specijalnih stezaljki za zavrtnjima. **Stezaljke sa zavrtnjima** koriste se u račvastim spojnica ("T" ili "Y") kao i za priključenje krajeva energetskih kablova niskog napona na sabirnice razvodne table transformatorske stanice ili kablovske priključne kutije.

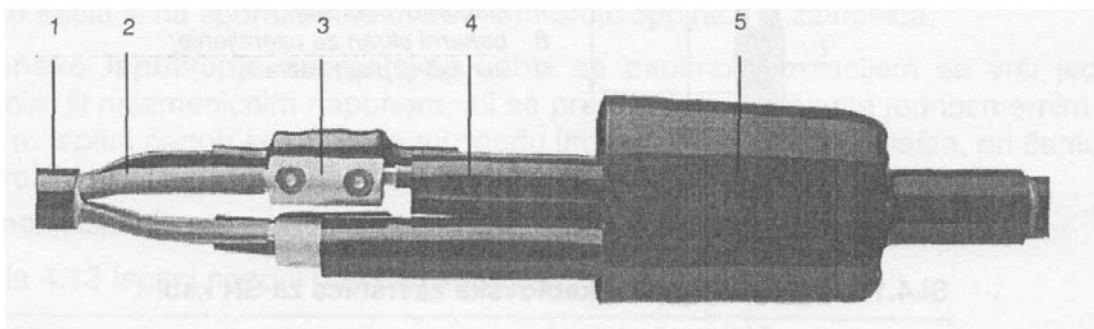
Za NN kablove (PP00-ASJ, XP00-AS) se koriste kablovske spojnice i završnice od toploskupljajućih ili hladnoskupljajućih elemenata [L.3, TP-3].

Za SN kablove (XHE 49-A, NP0 13-AS) se koriste kablovske spojnice i završnice od toploskupljajućih, hladnoskupljajućih ili prefabrikovanih elemenata [L.3, TP-3].

Na sl.4.16 dat je primer izvođenja toploskupljajuće spojnice za NN UPE ili PVC kabl.

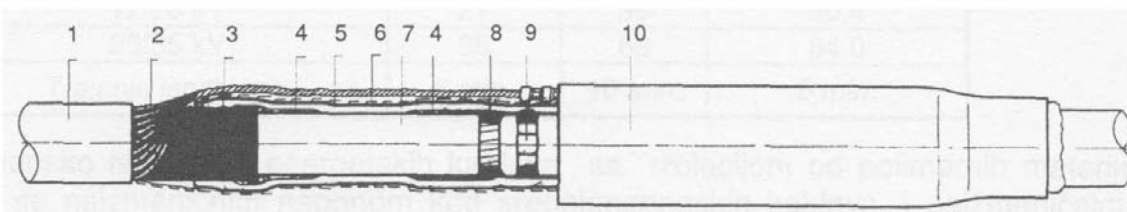
Na sl.4.17 dat je primer izvođenja toploskupljajuće spojnice za SN jednožilni UPE kabl.

Na sl.4.18 dat je primer izvođenja toploskupljajuće završnica za spoljašnju montažu za SN jednožilni UPE kabl.



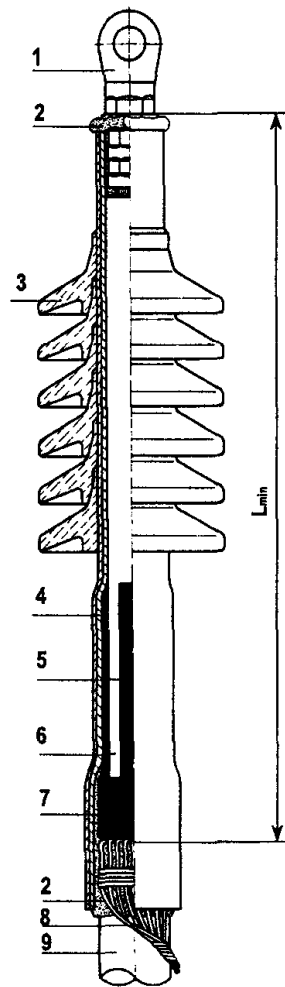
1 spoljašnji plašt kabela; 2 žila kabela; 3 spojna čaura za presovanje;
4 toploskupljajuća cev za žilu kabela; 5 spoljašnja toploskupljajuća cev.

Sl.4.16 Toploskupljajuća kablovska spojnica za NN kabl



1 - spoljašnji plašt kabela; 2 - bakarni ekran; 3 - slaboprovodni sloj; 4 - maramica za regulaciju električnog polja; 5 - dvoslojna kompozitna toploskupljajuća cev; 6 - bakarna mrežasta traka; 7 - izolacija kabela; 8 - slaboprovodna traka; 9 - spojne čaure za presovanje; 10 - spoljašnja zaštitna toploskupljajuća cev.

Sl.4.17 Toploskupljajuća kablovska spojnica za SN kabl



Kabl	L_{min} [m]
10 kV	0,55
20 kV	0,58
35 kV	0,68

- 1 kablovska papuča;
- 2 gumena traka za ispunu i zaptivanje;
- 3 izolacioni članci;
- 4 dvoslojna kompozitna toploskupljajuća cev;
- 5 maramica za regulaciju polja;
- 6 izolacija kabla;
- 7 slaboprovodni sloj;
- 8 bakarni ekran za uzemljenje;
- 9 spoljašnji plašt kabla.

SI.4.18 Toploskupljajuća kablovska završnica za SN kabl

4.13 Ispitivanje energetskih kablova i kablovskog pribora

Ispitivanje kablova i kablovskog pribora vrši se [L.1], [L.3, TP-3] kao ispitivanje tipa, obavezno (komadno) ispitivanje i prijemno ispitivanje.

Ispitivanje tipa je ispitivanje koje vrši proizvođač na novom tipu kabla, spojnice ili završnice, kao predstavniku drugih istih ili sličnih tipova. Ispitivanje tipa se ne vrši ako proizvođač priloži atest ovlaštene nezavisne institucije o ispitivanju na predstavniku tog tipa.

Obavezno (komadno) ispitivanje je ispitivanje koje se vrši na svakoj proizvedenoj dužini kabla ili svakom elementu kablovskog pribora, a obuhvata:

- merenje električne otpornosti provodnika;
- obavezna naponska ispitivanja, tabele 4.13 i 4.14;
- merenje faktora dielektričnih gubitaka za papirne kablove naznačenog napona 12/20 kV i 20/35 kV (NPHO 13-A, NPHA 03-A);
- naponsko ispitivanje plašta sredjenaponskog kabla izrađenog od PVC-a ili polietilena;
- ispitivanje parcijalnih pražnjenja za sredjenaponske kablove sa polimernom izolacijom.

Prijemno ispitivanje je ispitivanje koje se obavlja u prisustvu korisnika (kupca) i po pravilu obuhvata zahteve obaveznog ispitivanja. Vršiti se na najmanje 10 % ukupne dužine kabla ili na sporazumno utvrđenom broju spojnica ili završnica.

Naponsko ispitivanje energetskog kabla sa papirnom izolacijom se vrši jednosmernim ili naizmjeničnim naponom, ali se preporučuje ispitivanje jednosmernim naponom. Ispitni napon se priključuje između jedne žile i metalnog plašta, pri čemu se kod trožilnog kabla preostale dve žile vezuju za metalni plašt.

Vrednosti ispitnih napona i dužine trajanja ispitivanja date su u tabeli 4.13.

Tabela 4.13 Ispitni naponi papirnih kablova

Naznačeni napon kabla [U_0/U]	Ispitni napon [kV]		
	Naizmjenični		Jednosmerni
	50 Hz	0,1 Hz	
6/10 kV	14	18	33,6
12/20 kV	21	36	50,4
20/35 kV	35	60	84,0
Trajanje ispitivanja	5 min.	10 min.	5 min.

Naponsko ispitivanje energetskih kablova sa izolacijom od polimernih materijala vrši se naizmjeničnim naponom kod sredjenaponskih kablova, i naizmjeničnim ili jednosmernim naponom kod niskonaponskih kablova. Ispitni napon se priključuje između žile i električne zaštite kod sredjenaponskih kablova, odnosno između jedne žile i preostalih žila vezanih na kratko međusobno i sa zemljom. Vrednosti ispitnih napona i dužine trajanja ispitivanja date su u tabeli 4.14.

Naponsko ispitivanje plašta SN kabla sa PVC ili PE plaštom vrši se jednosmernim naponom 5 kV u trajanju 1 min.

Tabela 4.14 Ispitni naponi PVC i UPE kablova

Naznačeni napon kablova [U_0/U]	Ispitni napon [kV]			
	Naizmjenični			Jednosmerni
	50 Hz		0,1 Hz	
0,6/1 kV	1,0	0,6	3	6,0
6/10 kV	10,0	6,0	18	-
12/20 kV	20,0	12,0	36	
20/35 kV	35,0	20,0	60	
Trajanje ispitivanja	5 min.	24 h	10 min.	15 min.

Literatura:

- 1 B. Lalević: "Elektroenergetski kablovi", Beograd, 1993. godina.
- 2 B. Lalević: "Priručnik kablovi elektroenergetski", Beograd, 1997. godina.
- 3 "Zbirka tehničkih preporuka ED Srbije", septembar 2001. godine.
- 4 V. Balkovoj: "Struje u električnim zaštitama za vreme redovnog pogona trofaznih 20 kV kablovskih vodova izvedenih jednožilnim kablovima sa PE izolacijom – proračun i merenja", "Elektrodistribucija", br. 1, 2004. godina.
- 5 B. Lalević: "Struje kroz električnu zaštitu 110 kV kablova", "Elektrodistribucija", br. 2, 2000. godina.
- 6 D. Tasić: "Jedan pristup određivanju cirkulacionih struja u električnoj zaštiti jednožilnih kablova", "Elektrodistribucija", br. 3, 2001. godina.
- 7 T. Bojković: "Prikaz rada Tehničkog saveta ED Srbije", Monografija, 1997. godina.
- 8 M. Tanasković: "Proračun temperaturnog polja kod energetskih kablova položenih u zemlju metodom konačnih elemenata", Doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet Beograd, 2003. godina.
- 9 D. Tasić: "Osnovi elektroenergetske kablovske tehnike", Elektronski fakultet u Nišu, 2001. godina.
- 10 * * * : "Calculation of the Continuous Current Rating of Cables", IEC Publication 287, 1982.
- 11 L. Heinhold: "Power Cables and Their Application", Siemens Aktiengesellschaft, Berlin, 1990.
- 12 N. Rajaković, D. Tasić, S. Nikolajević: "Strujna opteretljivost kablova postavljenih u vazduhu", XIII Simpozijum o kablovima, D. Milanovac, septembar 1994. godine.