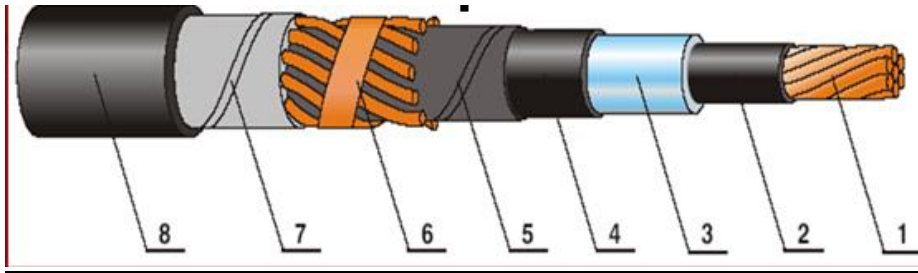


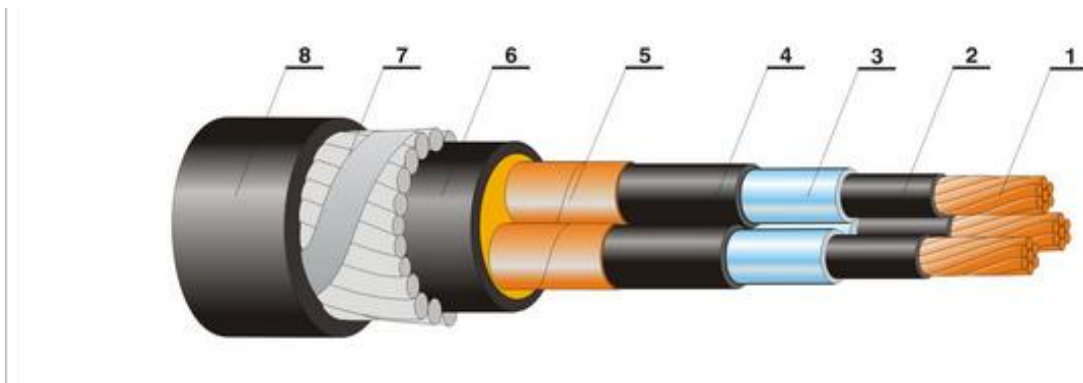
Uvodna razmatranja



Sl.U1. Jednožilni kabl sa izolacijom od umreženog polietilena

1. Provodnik,
2. Ekran provodnika, poluprovodni sloj na provodniku (poluprovodni umreženi polietilen - XLPE),
3. Izolacija, umreženi polietilen -XLPE
4. Ekran izolacije, poluprovodni sloj na provodniku (poluprovodni umreženi polietilen - XLPE)
5. Separator, bubreva poluvodljiva traka
6. Električna zaštita – metalni ekran, bakarne žice i kontraspirala od bakarne trake
7. Separator, bubreva poluvodljiva traka
8. Spoljašnji plašt

Provodnik je izrađen od bakra ili aluminijuma. Ekрани oko provodnika i izolacije izrađeni su od poluprovodnog materijala čija je uloga da učini električno polje homogenim. Izolacija je umreženi polietilen (XLPE). Separator je izrađen od poluprovodne bubreće trake, radi povećanja zaštite od prodora vlage. Spoljašnji plašt izrađen je od PE (polietilen) ili HDPE (high density- visoke gustine PE) materijala.



Sl.U2. Trožilni sa izovacijom od umreženog polietilena i PVC plaštem, armirani s okruglim čeličnim žicama

1. provodnik: Al ili Cu uže
2. ekran provodnika: poluprovodni sloj na provodniku (poluprovodni umreženi polietilen - XLPE),
3. izolacija: umreženi polietilen (XLPE)
4. ekran izolacije: poluprovodni sloj na izolaciji (poluprovodni umreženi polietilen - XLPE),
5. električna zaštita/ekran: od Cu trake
6. unutarnji plašt: PVC
7. armatura: čelične pocinčane okrugle žice i spirala-zavojnica od pocinčane čelične trake
8. spoljašnji plašt: PVC

*****Dakle, električni se kabel sastoji od jednog ili više provodnika s vlastitom izolacijom i dodatnim slojevima za zaštitu (mehaničku i električnu) provodnika i izolacije, kao i od od pribora i materijala za postavljanje, spajanje i završavanje. Provodnici kablova su najčešće bakarne ili aluminijske žice odnosno užad.**

Kablovi se polažu u

- zemlju,
- vodu ili u
- posebne kablovske kanale,

nakon čega su teško dostupni i zbog toga moraju biti dobro zaštićeni od hemijskih i mehaničkih uticaja te uticaja vlage.

Kablovi za distribuciju i prijenos električne energije su nazivnog (naznačenog) napona od NISKO NAPONA (<1 kV, najčešće 0,4 kV) do VEOMA VISOKOG NAPONA 0,6/1 kV do 430/750 kV (podzemni, nadzemni (SNKS) i podvodni),

Postoji više razloga zašto se sve češće u prenosu koriste kablovi, npr:

- Širina kablovske trase je uska i nije vidljiva tako da se zemljište može koristiti i za neke druge namjene,
- Ne postoji štetni uticaj magnetskog i električnog polja kao kod nadzemnih elektroenergetskih vodova,
- Kablovski sistemi znatno su sigurniji za ljude koji ih održavaju kao i za javnost,
- Pouzdanost napajanja preko kablovskih sistema znatno je veća jer su izloženi manjim oštećenjima a također su jeftiniji za održavanje,
- Kablovski sistemi imaju puno manje gubitke u prijenosu uz što imaju i velik životni vijek.

Na Slici 3. [x] prikazan je 400 kV kablovski tunel ispod centra Berlina.



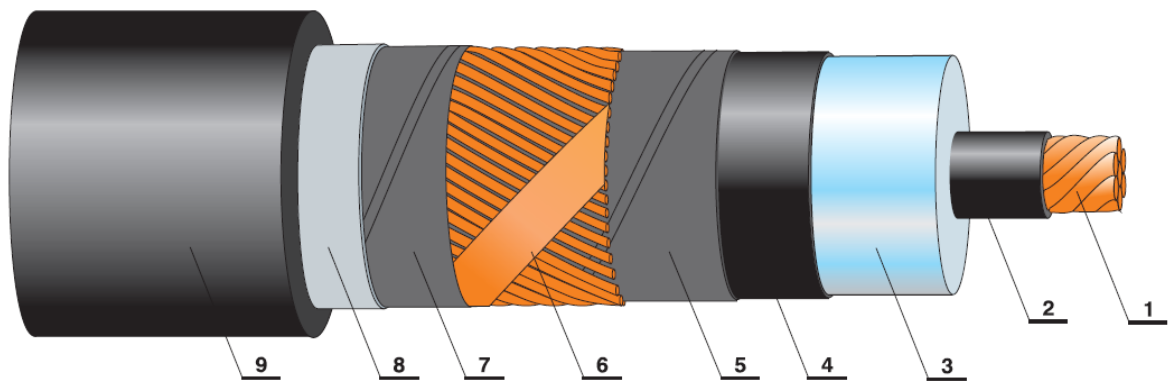
Slika U3. 400 kV kablovski sistem u tunelu dužine 6.3 km ispod centra Berlina

Žile kabla obložene su sa tri sloja (umreženi polietilen) XLPE, poluprovodni sloj na provodniku, izolacija i zatim poluprovodni sloj na izolaciji. Navedeni slojevi su međusobno čvrsto zalijepljeni pri čemu prostor između njih niti u jednom trenutku tokom proizvodnje nije izložen u smislu onečišćenja.

Električna zaštita, odnosno ekran ili zaslon, izvodi se helikoidalno omotanim bakarnim žicama sa kontra spiralom od bakarne trake. Kako bi se postigla uzdužna vodonepropusnost, ispod i iznad žica omataju se trake sa materijalom bubrivim u vodi ili se u tu svrhu koriste drugi materijali (SEPARATOR ispod i iznad ekrana).

Poprečna vodonepropusnost postiže se polaganjem aluminijske trake sa slojem kopolimera koja se zalijepi za plašt (laminirani plašt – aluminijska ili bakrena traka s kopolimerom). U području ekrana također se mogu ugraditi svjetloprovodne niti za prenos podataka ili mjerenje temperature u kabelu tokom rada

Energetski kabele s XLPE izolacijom i PE plaštom s uzdužnom i poprečnom vodonepropusnom izvedbom električne zaštite namijenjeni su za polaganje u zemlju osobito u vlažne terene, kanale, na konzole gdje se ne očekuju mehanička oštećenja i gdje kabel nije izložen vlačnim naprezanjima.



Sl.U4. Jednožilni kabl

1. Provodnik – bakarno ili aluminijsko kompaktirano ili segmentirano uže,
2. Ekran provodnika – poluprovodni umreženi polietilen (XLPE),
3. Izolacija – umreženi polietilen,
4. Ekran izolacije – poluprovodni umreženi polietilen (XLPE),
5. Separator – bubriva poluprovodna traka ispod metalnog ekrana,
6. Metalni ekran – bakarne žice i kontraspirala od bakarne trake,
7. Separator – bubriva poluprovodna traka iznad metalnog ekrana,
8. Laminirani plašt – aluminijska ili bakrena traka s kopolimerom,
9. Spoljašnji plašt – crni PE.

Osnovni električni podaci za ovaj kabl

Presjek provodnika i ekrana mm ²	1x500/95	1x1000/95
Otpor provodnika DC 20 °C, AC 20 °C, Ω/km	0,0605 0,0794	0,0291 0,0412
Otpor ekrana DC 20 °C, Ω/km	0,215	0,215
Maksimalni iznos električnog polja, kV/mm	6,1	5,6
Kapacitivnost, μF/km	0,18	0,24
Induktivitet trougao – linija razmak 2D, mH/km	0,40 - 0,58	0,36 – 0,55

1. OSNOVNI POJMOVI I KARAKTERISTIKE KABLOVA

Pod kablom se podrazumjevaju provodnici koji su električno izolovani i smješteni u zajednički omotač za zaštitu od spoljašnjeg uticaja (vlaga, mehanička oštećenja, korozija i dr).

Kablovski vod je dio (element) elektroenergetskog sistema koji se sastoji od kabla, ili kablova međusobno povezanih kablovskim spojnica, čiji se krajevi preko kablovskih završnica (kablovskih glava) priključuju na druge elemente, odnosno djelove (generator, transformator, potrošač i dr) elektroenergetskog sistema.

Osnovna podjela kablova je prema odnosno osobinama električne energije koju provode, na:

- **elektroenergetske (ili enetgetske) kablove** i
- **telekomunikacione kablove.**

Elektroenergetski (ili energetska) kablovi služe za provođenje električne energije u okviru EES, odnosno sistema za proizvodnju, prenos, distribuciju i potrošnju električne energije. To je električne energije naponskih nivoa: NN (≤ 0.4 kV), SN (reda 10, 20, 35 kV), VN (reda 110 kV) i VVN (reda 220, 400 kV), frekvencije 50 Hz (60 Hz) i struja do više stotina pa i par hiljada ampera, a koja se na potrošačkom naponskom nivou koristi za pogon najraznovrsnijih potrošača električne energije u domaćinstvima, pratećoj potrošnji, industriji, infrastrukturnim objektima i dr. (termički potrošači, elektromotori, električne rasvjete, savremeni elektronski uređaji, napajanje telekomunikacionih i drugih infrastrukturnih postrojenja i dr.).

Telekomunikacioni kablovi služe za prenos telegrafskih, telefonskih, radio, TV i drugih signala. U te svrhe koristi se električna energija napona do 500 V i frekvencija do više MHz i struje do nekoliko stotina ampera.

Pojavom optičkih vlakana i poluprovodničkih lasera otvoreno je novo poglavlje u razvoju modernih telekomunikacija. Pojava i karakteristike optičkih vlakana omogućile su da danas imamo **integralne energetska-telekomunikaciona**, odnosno **integralne energetska-optičke kablove**, kao posebnu vrstu kablova.

U okviru ovog predmeta izučavaju se **elektroenergetski (ili energetska) kablovi, kao elementi distributivnih i prenosnih mreža EES**

Osnovna namjena elektroenergetskih kablova je prenos i distribucija električne energije od napojnih i distributivnih transformatorskih i razvodnih postrojenja do potrošačkih centara, odnosno do grupnih i pojedinačnih potrošača električne energije. Takođe se koriste i kao povezni element elektrana i postrojenja, unutar razvodnih postrojenja, unutar pogona većih (industrijskih) potrošača i dr., kao i na prenosnom nivou u specijalnim slučajevima, npr. podmorski kablovi.

Osnovne konstrukcione karakteristike elektroenergetskih kablova

Elektroenergetski kabl, kao element EES treba da je saglasan ostalim elementima, što se tiče naponskog nivoa i strujnog opterećenja.

Konstrukcija elektroenergetskog kabla prvenstveno zavisi od:

- naponskog nivoa, odnosno naznačenog napona i
- uslova polaganja (ispod zemlje, pod vodom, u agresivnoj sredini, u prostorijama – na regalima, u cijevima, ispod maltera i sl.).

Energetska kablovi koji se polažu u prostorijama kao elementi električnih instalacija **su izolovani provodnici** i konstrukciono se razlikuju, prvenstveno u zaštitnim slojevima, od elektroenergetskih kablova koji se postavljaju ispod zemlje ili ispod vodenih površina (mora, jezera, rijeka), a koji su predmet našeg izučavanja i za koje ćemo ubuduće koristiti kraći termin – **kablovi**.

Osnovni konstruktivni elementi kabla su:

- **Provodnik** je metalni dio kabla namjenjen provođenju struje. Provodnik može biti puni, kada se sastoji od jedne žice (do 16 mm^2 presjeka) ili uže, kada se sastoji od više žica (višežični).
- **Žica** je osnovni sastavni element provodnika, načinjen od provodnog materijala (bakar - Cu ili aluminijum - Al).
- **Izolacija** je sloj od izolacionog materijala koji služi za električno izolovanje provodnika.
- **Žila** je izolovani metalni (višežični) provodnik. Sastoji od provodnika, izolacije i slaboprovodnih slojeva, ako postoje.
- **Jezgro kabla** je skup použenih žila, sa odgovarajućom ispunom, ako postoji.
- **Ispuna** je element kabla kojim se ispunjava međuprostor između žila višežilnih kablova, da bi se dobio kružni presjek kabla.
- **Plast (omotač)** je zaštitni sloj od polivinilhlorida (PVC) ili polietilena (PE) koji štiti elemente kabla od vlage i hemijskih uticaja, a u manjoj meri i od mehaničkih oštećenja.
- **Metalni plast** je bešavna cijev od olova ili aluminijuma koja se postavlja preko jezgra kabla sa ciljem da štiti izolaciju od vlage i hemijskih ili mehaničkih oštećenja.
- **Armatura** je sloj od metalnih traka ili žica koji štiti kabl od prekomjernih mehaničkih naprezanja i oštećenja kabla.
- **Slaboprovodni sloj (ekran kabla)** je sloj koji se postavlja ispod izolacije i iznad izolacije i služi za radijalno oblikovanje i ograničenje električnog polja.
- **Električna zaštita** je metalni sloj koji služi za ograničenje električnog polja, za odvođenje struje zemljospoja i zaštitu od indirektnog dodira. Kod jednožilnih kablova električna zaštita se postavlja iznad slaboprovodnog sloja izolacije, dok kod trožilnih kablova ona može da se postavi preko svake žile ili da bude zajednička za sve žile.

Osnovne prednosti i nedostaci elektroenergetskih kablova u odnosu na nadzemne vodove

Prednosti:

- nema vizualne degradacije prostora, osim prilikom instalacije kablova,
- imaju veću pogonsku pouzdanost zbog činjenice da nisu izloženi udarima gromova i ostalim atmosferskim uticajima,
- zaštićeni su od namjernog uništavanja.

Nedostaci:

- najčešće daleko veće cijene (reda 10 puta na višim naponskim nivoima) u odnosu na cijenu nadzemnih vodova,
- u slučaju kvara koji može nastupiti negdje na kablju, teže je locirati mjesto kvara, a potrebno je i daleko više vremena za uklanjanje kvara.

Osnovne električne veličine i parametri kabla:

Osnovne električne veličine, za koje se kabl projektuje, gradi i bira:

- Nazivni (naznačeni) napon U_n [kV] – napon za koji je projektovan i izrađen kabl, odnosno izolacija kabla,
- Nazivna struja I_n [A] – dozvoljeno strujno opterećenje za odgovarajući tip i presjek kabla, definisano na osnovu dozvoljene temperature provodnika za normalne (naznačenim ili nominalnim) uslovima polaganja.

Npr. za trožilni 10kV kabl sa PVC izolacijom, za presjek provodnika 95 mm^2 , nazivna struja iznosi 245 A, i odnosi se na normalne uslove polaganja i opterećenja: pojedinačno položen kabl u zemlju, dubina polaganja 70 cm, specifični toplotno otpor zemlje 100°C cm/W , specifični toplotni otpor PVC izolacije 600°C cm/W , temperatura provodnika 65°C , distributivno opterećenje DO – opterećenje gdje poslije dnevnog perioda od 10 h sa pretežno punim (maksimalnim ili vršnim) opterećenjem slijedi period najmanje istog trajanja sa najviše 60% vršnog opterećenja.

- Dozvoljeno strujno opterećenje kabela I_t [A] - najveća struja kojom se kabal može trajno opteretiti, uslovljena dozvoljenim zagrijavanjem kabla s obzirom na stvarne uslove polaganja (mjesto, okolina, razmak, blizina ostalih kablova, temperatura okoline...).

Električni parametri kabla, odnosno parametri prenosnih jednačina i zamjenskih šeme kabla su:

- otpornost (aktivna otpornost) R [Ω],
- induktivnost L [mH],
- kapacitivnost C [μ F],
- odvodnost G [S].

Prema položaju u zamjenskim šemama,

- otpornost i induktivnost su "uzdužni" parametri,
- kapacitivnost i odvodnost su "poprečni" parametri

Prema nastanku aktivnih gubitaka:

- otpotnost i odvodnost su parametri sa gubicima
- induktivnost i kapacitivnost su parametri sa gubicima.

Kriterijumi za izbor i dimenzionisanje kabla

- **Mehanički** (utiče mjesto i način polaganja, kao i svi mogući spoljašnji uticaji: opasnost na mehanička oštećenja, opasnost od korozije, izloženost vibracijama, izbjegavanje velikog broja spojnica duž kablovske trase, savitljivost i otpornost na savijanje, mogućnost strmog i okomitog polaganja, itd.)
- **Električni** (nazivni napon, maksimalni pogonski napon, udarni napon – rješava se izborom i dimenzionisanjem izolacije; strujna opteretivost – rješava se izborom materijala i presjeka provodnika, vodeći računa o konstrukciji kabla i odvođenju toplote, odnosno uslovima polaganja).
- **Ekonomski** (cijena kabla, troškovi polaganja, održavanja, pogona - gubici).

2. Razvoj kablova

Viši naponi su se uvijek prvo primjenjivali na nadzemne vodove, pa tek onda na kablovske, a uzrok tome je složenija tehnologija izrade odgovarajućih kablova.

Prvi nadzemni 110 kV vod pušten je u pogon 1908. godine u SAD, dok su se za uvođenje 110 kV kablovskog voda stekli uslovi tek 1918. godine, kada je italijanski naučnik Emanueli konstruisao prvi uljni kabl.

Tridesetak godina kasnije imamo pojavu 500 kV nadzemnog voda u SSSR-u, 1966. godine se pojavljuje i 700 kV vod u Kanadi. Osamdesetih godina prošlog vijeka imamo već i vodove od 1000 kV u Rusiji, dok je u današnje vrijeme razvijeni i nadzemni vod naponskog nivoa 1500 kV (u Americi).

Osnovni problem prelaska na vrlo visoke napone u kablovskoj tehnici jeste u smanjenju dielektričnih gubitaka. Sa klasičnom papirno-uljnom izolacijom strujno opterećenje kablova 500-600 kV počinje naglo da opada, te se on pokazuje sasvim nerentabilan za više naponske nivoe. Međutim umjesto smanjenja gubitaka, može se opteretljivost kablova povećati boljim odvođenjem toplote sa njih samih. To se postiže primjenom tzv. tečnog prinudnog hlađenja: sa površine kabla posrednim ili neposrednim putem ili direktno sa provodnika. Dielektrični gubici se takođe mogu smanjiti povećanjem debljine izolacije, ali to ima za posledicu smanjenje kapaciteta. Međutim, cijevni kablovi sa gasom SF₆ (sumpor heksafluorid) praktično nemaju gubitke, pa danas oni i preovlađuju u elektroenergetskim sistemima većine država. U nekoj skorijoj budućnosti predviđa se upotreba superprovodnih kablova, koji nemaju nikakvih gubitaka.

Elektroenergetski kablovi već su u upotrebi preko 150 godina.

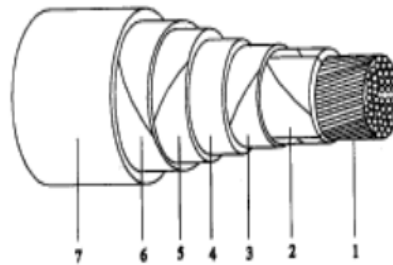
Prvi kabl sa izolacijom od gutaperke (vrsta prirodne gume) konstruisan je 1850. godine, a bio je namijenjen telefoniji i telegrafiji. Zbog svoje niske radne temperature od svega 45°C gutaperka kao izolacija energetskih kablova nije našla širu primjenu. Nekih 30 godina kasnije gutaperka je zamijenjena jutom impregnisanom vazelinom. Kao zaštita od prodora vlage korišćen je olovni omotač.

U Engleskoj je 1890. godine Feranti konstruisao 10 kV jednofazni kabl, što je bilo uslovljeno prelaskom sa jednosmjernog na naizmjenični sistem napajanja. Za izolaciju je korišćen papir u trakama impregnisan ozokeritom. Interesantno ja da je kabl bio konstruisan od odlaznog i povratnog koncentričnog Cu-cijevnog provodnika, međusobno izolovanih u dužinama od po 6m, tako da je za 43 km, koliko je iznosila dužina voda, bilo potrebno čak preko 7000 spojeva.

1892. izgrađen je prvi trofazni kabl 10 kV, tzv. pojasni kabl. Svaka od žila kabla je bila izolovana **papirom impregnisanim visokoviskoznim uljnim kompaundom**, a sve tri žile bile su izolovane zajedničkom **pojasnom izolacijom**. Olovni pojas je služio da se spriječi prodor vlage u kabl.

Pojasni kabl:

- 1) Al-provodnik,
- 2) izolacija žile,
- 3) pojasna izolacija,
- 4) olovni omotač,
- 5) unutrašnja zaštita (papir ili juta),
- 6) čelične trake,
- 7) impregnisana juta.



Slika 1. Pojasni kabl

Međutim, ovaj kabl je za više napone imao velike nedostatke, jer mu **električno polje nije bilo radijalno**. Ovo je za posljedicu imalo velike tangencijalne jačine električnog polja.

Sa potrebom za višim naponima javljaju se problemi:

- **raspodjele električnog polja,**
- **jaka električna polja i električna pražnjenja,** koja dovode do proboja izolacije,
- **povećanje strujnog opterećenja** (prenosa snage) koje razvija visoke temperature, što zahtijeva izolaciju sa većom dozvoljenom radnom temperaturom, ili bolje rashladne sisteme.

Da bi se riješio **problem raspodjele električnog polja** realizuju se kablovi kod kojih su žile pojedinačno **ekranizovane** i na taj način je ostvareno radijalno električno polje.

Ekranizovanje se ostvaruje sa slaboprovodnim slojem (ekran kabla) koji se postavlja ispod izolacije i iznad izolacije i služi za radijalno oblikovanje i ograničenje električnog polja. Primjenjuje se za kablove iznad 10 kV.

1913. godine je izgrađen 33 kV kabl sa ekraniziranim žilama od izbušenog metaliziranog papira, što je omogućilo nesmetano kretanje ulja u kابلu.

Nedugo posle toga je ustanovljeno da i ovakva vrsta kablova ne zadovoljava uslove viših napona iznad 60 kV, jer su se u šupljinama izolacije javljala jaka električna pražnjenja koja su brzo dovodila do električnog proboja izolacije. Zbog toga se tokom 15 narednih godina na tržištu pojavilo više tipova kablova bez električnih pražnjenja:

- 1924. godine uljni kabl (Emanueli)
- 1931. godine gasni kabl s unutrašnjim pritiskom
- 1931. godine uljni kablovi u cijevima (*Oilstatic*)
- 1937. godine gasni kabl s unutrašnjim pritiskom (*Fisher i Aktinson*)

U želji da se poveća strujna opteretljivost kablova 1950. godine u Engleskoj je razvijeno više tipova kablova sa prinudnim hlađenjem.

Zahvaljujući naglom razvoju hemijske industrije, počinje se 30-ih godina prošlog vijeka sa primjenom **vještačkih materijala za izradu izolacije kablova:**

- **polivinil-hlorida (PVC),**
- **polietilen (PE),**
- **umreženi polietilen (UPE)**

Pednjači primjena polivinil-hlorida (PVC). Ubrzo je ustanovljeno da PVC nije pogodan sa više napone od 6 kV, mada se u nekim zemljama izrađuju od poboljšanog PVC i kablovi napona 30 kV

Razvoj kablova sa čvrstom izolacijom (čvrsti dielektrici), započet uvođenjem PVC izolacije, nastavlja se polietilenskom (PE). 1933. godine u Engleskoj je otkriven polietilen (PE) koji će kasnije preuzeti vodeću ulogu u izradi izolacije kablova.

U Švajcarskoj je 1947. godine primijenjen kabl napona 30 kV izolovan sa PE. Smatra se da je preloman trenutak nastao 1969. godine kad je u Francuskoj izgrađen visokonaponski kabl 225 kV izolovan sa PE. Pet godina kasnije proizveden je i 400 kV kabl s ovom vrstom izolacije.

Odlične električne, ali ne i termičke karakteristike, ograničile su širu primjenu PE izolacije u proizvodnji kablova visokih i veomavisoki napona.

Poseban napredak u razvoju kablova sa čvrstom izolacijom nastaje proizvodnjom kablova sa izolacijom od **umreženog polietilena (UPE)**, od 1960 god. Jedan od prvih je 275 kV UPE kabl proizveden u Tokiju. Veoma dobre električne i termičke karakteristike ove izolacije, dovele su do razvoja kablova izolovanih UPE i za napone preko 500 kV.

Iako je u upotrebu uvedena homogena izolacija ipak nije u potpunosti riješen problem električnih parcijalnih pražnjenja.

Problem prelaska na vrlo visoke napone u kablovskoj tehnici se sastoji, između ostalog u pronalaženju rješenja za smanjenje dielektričnih gubitaka.

Umjesto smanjenja gubitaka, opteretivost kabla može se povećati i boljim odvođenjem toplote sa njega. To se postiže primjenom tzv. **prinudnog hlađenja**. Intenzivnim hlađenjem višestruko se smanjuje otpor provodnika. Tu su posebno značajna

Posebno su za prenos velikih snaga značajni **cijevni kablovi sa SF6 gasom**. Kao veoma važno za prenos velikih snaga, smatra se puštanje u pogon 1971. godine prve cijevne dionice kabla sa gasom SF6.

Za prenos veoma velikih snaga, poseban značaj ima razvoj kriogenih kablova, baziranih na postizanju niskih temperatura u čijem području su Joulovi gubici daleko manji, a kod nekih metala i legura, pod određenim okolnostima, sasvim isčezavaju (superprovodnici). Razvoj kriogenih kablova je usmjeren u dva pravca:

- kriogenezistentni kablovi,
- superprovodni kablovi.

3. Podjela energetskih kablova

Rekli smo da je osnovna podjela kablova prema karakteristikama električne energije koja se prenosi kablovima..

Prema osobinama električne energije koju provode, kablove dijelimo na:

- energetske
- telekomunikacione.

Energetski kablovi služe za provođenje električne energije koja se koristi za pogon termičkih potrošača, elektromotora, električne rasvjete, telekomunikacionih postrojenja i niza drugih potrošača električne energije. Učestanost je 50 (60 Hz), a najčešći potrošački naponski nivo 400/230 V, a naponski nivoi u procesu proizvodnje, prenosa i distribucije su od veoma visokog napona npr. 400 kV, preko visokog napona npr. 110 kV i srednjeg napona npr. 10 kV do potrošačkih napona.

Kod nas se upotrebljavaju kablovi nazivnih napona 1 kV, 3 kV, 6 kV, 10 kV, 35 kV, 60 kV, 110 kV i 220 kV, a u svijetu najviši pogonski naponi dostižu 500 kV. Najveće struje koje kablovi najvećih presjeka mogu trajno podnositi iznose do reda 2000A.

Izolovani vodovi se primjenjuju u kućnim instalacijama. Bitno je istaći razlike između izolovanih vodova i energetskih kablova: izolovani vodovi se za razliku od kablova nikad ne polažu u zemlju; kod energetskih kablova se kao pogonski naponi primjenjuju naponi do oko 500kV, dok se izolovani vodovi primjenjuju uglavnom za napone do 1kV.

Telekomunikacioni kablovi služe za prenos telekomunikacionih, telegrafskih, telefonskih, radio, TV i drugih signala. U te svrhe koristi se električna energija napona do 500 V i frekvencija do više MHz i struje do nekoliko stotina ampera.

Pojavom **optičkih vlakana** i poluprovodničkih lasera otvoreno je novo poglavlje u razvoju modernih telekomunikacija. Pojava i karakteristike optičkih vlakana omogućile su da danas imamo **energetsko-telekomunikacione**, odnosno **energetsko-optičke kablove**, kao posebnu vrstu kablova.

U okviru ovog predmeta izučavaju se **elektroenergetski** (ili **energetski**) **kablovi** kao elementi distributivnih i prenosnih mreža EES, koji se u osnovi polažu ispod zemlje ili druge sredine. Njih ćemo najkraće nazivati **kablovima**.

Energetski kablovi se dalje mogu podijeliti prema više kriterijuma: preme namjeni, prema mogućnosti premještanja, prema konstrukciji osnovnih elemenata, prema naponskom nivou i sl.

3.1. Prema namjeni, energetski kablovi se dijele na:

- Prenosne kablove – za prenos električne energije,
- Distributivne kablove – za distribuciju električne energije,
- Rudarske kablove – za napajanje rudarske opreme,
- Specijalne kablove –za nuklearne elektrene, kablovi za naftnu industriju, vatrootporni kablovi, podmorski kablovi i dr.

3.2. Prema mogućnosti premještanja, energetski kablovi su

- Nefleksibilni kablovi, koji tokom čitavog vijeka ostanu na jednom mjestu (u rovu pod zemljom, u kablovske cijevi i sl) i
- Fleksibilni kablovi, koji se mogu pomjerati i koristiti za različite potrošače na raznim mjestima

Ovdje se proučavaju **elektroenergetski kablovi (kraće, kablovi)**, kao elementi EES, a koji se polažu u zemlju i čija je funkcija prenos, odnosno distribucija električne energije u okviru mreža EES, kao i ostvarivanje veza između elemenata EES.

3.3. Prema konstrukciji, kablovi se razlikuju po:

- građi provodnika
- građi izolacije
- građi zaštitnih slojeva.

3.2.1. Građa provodnika

Kablovi se izvode sa:

- jednim,
- dva,
- tri,
- četiri ili sa
- pet provodnika.

Za napone do 1 kV upotrebljavaju se kablovi sa jednim do pet provodnika. Kod kablova sa četiri (četvorožilni) ili pet (petožilni) provodnika jedan ili dva provodnika mogu biti manjeg presjeka.

U distributivnim mrežama NN to su uobičajeno četvorožilni kablovi, sa tri fazna i nultim provodnikom.

Za napone od 1 do 35 kV upotrebljavaju se najčešće kablovi sa tri provodnika (**trožilni kablovi**).

Kablovi za najviše napone izvode sa jednim provodnikom (jednožilni).

Provodnici kablova se izrađuju najčešće kao višezična užad sa žicama od:

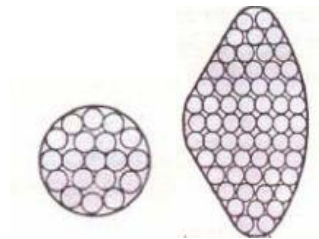
- aluminijuma (Al) ili
- bakra (Cu).

Najčešći oblici presjeka provodnika su:

- okrugli i
- sektorski (Slika 2),

a primjenjuju se i cijevni (šuplji).

Sektorski oblik presjeka provodnika omogućava da spoljašnji prečnik kabla bude manji. Time se mogu postići značajne uštede u materijalu za izolaciju i zaštitne slojeve. Upotrebljavaju se najčešće za napone do 10 kV.



Slika 2. Oblici presjeka višezičnih provodnika kablova

Cijevni oblik provodnika upotrebljava se kod kablova najviših napona (kablovi sa uljem ili gasom pod pritiskom), jer omogućava bolje hlađenje, a i manji je uticaj skin efekta.

3.2.2. Građa izolacije

Osnovna vrsta izolacije kod kablova je **čvrsta izolacija**, dok se kod kablova VN i VVN kao izolacija primjenjuje i **ulje ili gas pod pritiskom**.

S ozirom na vrstu čvrste izolacije, razlikujemo kablove:

- sa **sintetičkom (polimer) izolacijom** i

- izolovane **impregnisanim papirom**.

3.2.3. Građa zaštitnih slojeva

Zaštita provodnika i njegove izolacije, kao i zajedničke izolacije kod pojasnih kablova, od mehaničkih oštećenja i opterećenja, hemijskih i temperaturnih uticaja, kao i od prodora stranih tijela (prvenstveno vode) postiže se izradom jednog ili više zaštitnih slojeva oko izolacije u zavisnosti od mjesta na koje se polaže kabl i od načina polaganja.

Zaštitni slojevi su:

- metalni plašt,
- unutrašnji zaštitni sloj (ili posteljica),
- armatura,
- spoljašnji plašt.

Metalni plašt je bešavna cijev od olova ili aluminijuma koja se postavlja preko jezgra kabla, sa ciljem da štiti izolaciju od vlage i hemijskih ili mehaničkih oštećenja. Ako je ispunjena od slaboprovodnog materijala, ona služi kao provodna veza između električne zaštite i slaboprovodnih slojeva oko žila kabla

Unutrašnji zaštitni sloj služi za razdvajanje metalnog plašta od armature (za zaštitu metalnog plašta). Izrađuje se najčešće od: kompaund mase, impregnisane papirne trake, impregnisane tekstilne trake, termoplastične ili kao termoplastični plaševi.

Armatura štiti kabl od mehaničkih oštećenja i opterećenja. Izrađuje se najčešće od čelične trake ili žice okruglog ili pljosnatog oblika.

Spoljašnji plašt prekriva armaturu i osnovni mu je zadatak da zaštiti armaturu i ostale djelove kabla prvenstveno od hemijskih, odnosno korozivnih uticaja. On je najčešće izrađen od kompaund mase, impregnisanih slojeva papirne trake ili jute ili kao termoplastični plaševi.

Zavisno od mjesta na kojem se polaže kabl, kao i od načina polaganja kabla, primjenjuju se pojedini tipovi kablova sa odgovarajućim brojem i karakteristikama zaštitnih slojeva.

3.3. Prema naponu za koji je kabl izrađen razlikuju se

- **niskonaponski,**
- **srednjenaponski i**
- **visokonaponski kablovi.**

3.3.1. VN KABLOVI

Osnovna konstrukcija visokonaponskih kablova su:

- **uljni kablovi niskog pritiska,**
- **uljni kablovi visokog pritiska,**
- **kablovi sa unutrašnjim pritiskom gasa,**
- **kablovi sa spoljašnjim pritiskom gasa.**

Gasni kablovi u cijevima mogu biti sa unutrašnjim i spoljašnjim pritiskom gasa, najčešće azota, a danas i SF₆ gasa.

Upotreba papirnih kablova, tj. impregniranog papira u uljnom kompaundu je ograničena do 60 kV.

Primjena čvrste izolacije za visokonaponske kablove došla je kao odgovor na neke pogonske mane uljnih kablova. Uljni kablovi niskog pritiska imaju sistem napajanja uljem koji mora da je pod stalnim nadzorom. Takođe se pokazalo da je otkrivanje mjesta curenja ulja kod ovih kablova relativno dug i komplikovan postupak. Uljni kablovi u cijevima, zbog sve većeg pritiska i količine ulja predstavljaju stalnu opasnost za okolinu u slučaju curenja ulja.

Kod kablova sa čvrstom i homogenom ekstrudovanom izolacijom od PE (polietilena) i UMPE (umreženog polietilena) ovi problemi otpadaju. Međutim, kod viših napona sa debljom izolacijom, u prvi plan izbijaju problemi proizvodnje homogene izolacije, bez šupljina, stranih čestica i nečistoća.

3.3.2. SN KABLOVI

Pod SN kablovima podrazumijevaju se sa gledišta visine napona kablovi od 1 kV do 60 kV.

Starija konstruktivna rješenja za SN kablove su kablovi sa izolacijom od impregnisanog papira (IP ili NP), dok su savremena nova rješenja sa izolacijom od umreženog polietilena (UMPE).

Za SN kablove najrasprostranjenije izolacije su:

- **papir impregnisan u uljnom kompaudu** (impregnisana papirna izolacija - **IP** ili naročito impregnisana papirna izolacija - **NP**) i

Iznad napona 60 kV nije moguće rješavati konstrukcije kablova debljom papirnom izolacijom, zbog postojanja šupljina nastalih uslijed različitih koeficijenata širenja pojedinih materijala kabla.

- **umreženi polietilen (UMPE, oznaka X).**

Posljednji godina preovladava primjena kablova sa izolacijom od UMPE.

Prednosti ovih kablova su:

- manji dielektrični gubici,
- viša radna temperatura,
- mogućnost primjene za velike visinske razlike trase kabla,
- jednostavna izrada kablovskih glava i spojnica,
- nepotrebno održavanje, tj. nalivanje kablovskih glava uljem,
- lako ukrštanje faza kod jednožilnih konstrukcija.

3.3.3. NN KABLOVI

NN kablovi za distributivne mreže, napona 0,6/1 kV, najčešće su četvorožilne konstrukcije, tri fazne žile i jedna nula.

NN kablovi (do 1 kV) se **izrađuju sa PVC izolacijom**, koja ima niz prednosti u odnosu na papirnu izolaciju:

- konstrukcija kabla je jednostavna i laka,
- praktično ne postoji kablovska glava već završeci, pošto otpada problem zaptivanja ulja,
- nije higroskopna kao papir,
- ne podržava gorenje.

Danas se sve više izrađuju i u praksi koriste NN kablovi od UMPE. Glavni razlog koji izbacuje kablove sa UMPE u prvi plan je njegova radna temperatura, koja je znatno viša nego kod PVC kablova.

Provodnici NN kablova mogu da budu okruglog presjeka, izrađeni od žica u konstrukciji 1+6+12+..., ali najčešća je konstrukcija NN kablova sa **sektorskim oblikom provodnika**. Provodnici su od *Al* ili *Cu*. Iz tehničko ekonomskih razloga najčešće se koriste **jednožični Al provodnici sektorskog oblika**, da bi kabl imao manji gabarit i bio lakši.

Izolovani provodnici (**žile kabla**) se pouzavaju i zajedno **ispunom** u međuprostorima žila i s **pojasnom izolacijom**, koja se postavlja preko použenih žola, formiraju **jezgro kabla**.

Za slučaj polaganja kabla u uslovima gdje se očekuju veća mehanička naprezanja, konstrukcija sadrži i **armaturu** (čelične trake, čelične okrugle ili pljosnate žice - zavisno od nivoa mehaničkih naprezanja). Preko armature kabla dolazi antikoroziorna zaštita od **PVC** ili **PE - plašt kabla**.

3.3.4. Prikaz kablovi za niske i srednje napone

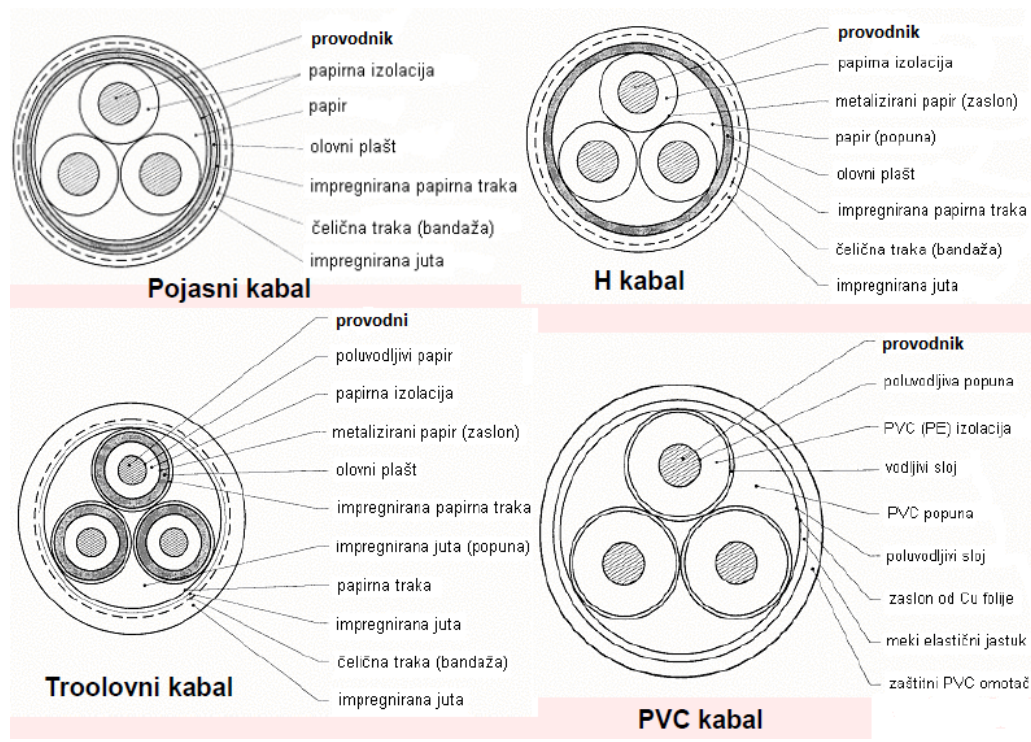
MASENI (za napone do 40 kV – 60 kV)

- pojasni kabl, Višežilni kabl izolovan impregnisanim papirom sa zajedničkom izolacijom preko použenih žila Oblik električnog polja u pojasnom kabl nizeradijalan (do napona 15 kV zbog

neradijalnog polja, linije električnog polja počinju i završavaju na provodnicima i metalnom plaštu, raspodjela linija električnog polja nepravilna, naprezanja u svim smjerovima),

- H kablovi, papirni kabl sa ekraniziranim žilama (za SN; linije električnog polja počinju na provodnicima i završavaju na metalnom plaštu, raspodjela linija električnog polja radijalna, zbog zajedničkog metalnog plašta manje savitljivi),

- troolovni kablovi (za SN – 60 kV; raspodjela linija električnog polja radijalna oko svakog provodnika zbog olovnog plašta oko svakog provodnika, savitljivi i lakši za ugradnju od prethodnog tipa).



Kada koristiti PVC kablove umjesto masenih kablova?

- ako je trasa kratka,
- ako je trasa strma,
- ako se računa s velikim mehaničkim naprezanjima,
- ako se ne mogu izbjeći oštri zavoji,
- ako se zahtjeva djelimična ili potpuna gibljivost kabla,
- ako kabal mora biti lagan, itd.

3.3.5. Kablovi za visoke i veoma visoke napone

Projektovanje i izgradnju kablovskog prenosa (kablovi visokog napona – VN i kablovi veoma visokog napona VVN) karakterišu dva značajna tehnička izazova koja treba prevazići:

- obezbjeđenje adekvatne izolacije i
- smanjenje izolacionih gubitaka na adekvatan nivo, odnosno adekvatno ododjenje toplote.

Dva su osnovna tipa prenosnih kablova danas u upotrebi:

1. Jedan tip su kablovi koji imaju cijev sa gasom ili tečnošću (izolaciono ulje) koji se pumpaju ili cirkulišu kroz i oko kabla sa ciljem upravljanja toplotom i obezbjeđuju adekvatnu izolaciju kabla.

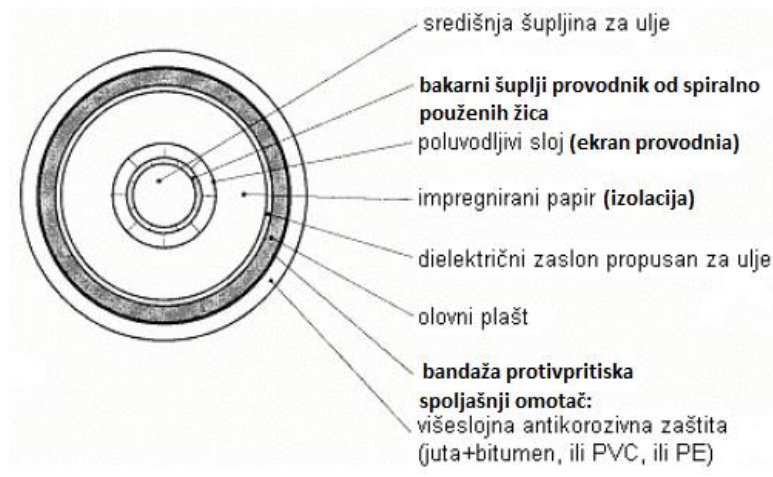
2. Drugi tip su kablovi sa čvrstom izolacijom, odnosno kvalitetnim dielektrikom.

Za visoke i vrlo visoke napone koriste se: uljni kablovi, gasni kablovi i kablovi sa sintetičom (čvrstom) izolacijom. Kod uljnih i gasnih kablova upotrebljava se kao izolacioni material papir sa impregnatom (kablovsko ulje ili gas) pod pritiskom. Prema konstrukciji, razlikuju se kablovi sa pritiskom impregnanta kroz provodnik i pritiskom impregnanta izvan provodnika.

Uljni kabal:

- ulje je male viskoznosti, lakše cirkuliše u šupljini;
- uljni kablovi niskog pritiska, ulje pod pritiskom 0,03 - 0,6 MPa (za napone 30 – 400 kV);
- uljni kablovi visokog pritiska, ulje pod pritiskom 1 - 2,5 MPa (za napone 110 – 400 V);
- trožilni uljni kablovi izrađuju se samo za napone do 132 kV;
- nepodobni za savladavanje većih visinskih razlika.

Jednožilni uljni kabal



Najrasprostranjenija konstrukcija kabla sa niskim pritiskom ulja, karakteriše se šupljim provodnikom u kome se nalazi ulje pod statičim pritiskom. Kad se temperature kabla mijenja ulje se pomjera i odlazi ili dolazi iz uljnih sudova smještenih na kraju kalovskih dionica. Kad temperature kabla opadne ulje se iz sudova vraća u kabl pod dejstvom pritiska gasnih “jastuka” u sudovima. Izolacija kabla je od papira visokog kvaliteta i različitih debljina radi povećanja dielektrične čvrstoće. Metalni omotač se izrađuje od olova ili aluminijuma. Novije konstrukcije kablova omogućavaju dužine dionica do oko 4 km, sa uljnim sudovima na oba kraja. Sa sudovima samo na jednom kraju, dionica je upola kraća

Uljni kablovi niskog pritiska rade se i u trožilnoj konstrukciji, kod koje se ulje kreće kroz cijevi u međuprostoru žila (ispuni).

Kod uljnih kablova visokog pritiska kablovska žila (jedna kod jednožilnih i tri kod trožilnih ablova) sa papirnom izolacijom impregnoisanom u viskoznom kompaudu Princip rada uljnih kablova visokog pritiska sličan je kao i uljnih kablova niskog pritiska. Ulje se širi pri zagrijavanju i teče u poseban rezervuar na kraju dionice. Pri hlađenju ulje se vraća u čeličnu cijev pod dejstvom pumpne stanice koja održava pritisak od 15 do 17 bar. Ulje na taj način djeluje direktno na izolaciju žile ne dozvoljavajući da se obrazuju prazni prostori. Pumpne stanice mogu napajati ablovske dionice dužine i do 10 km.

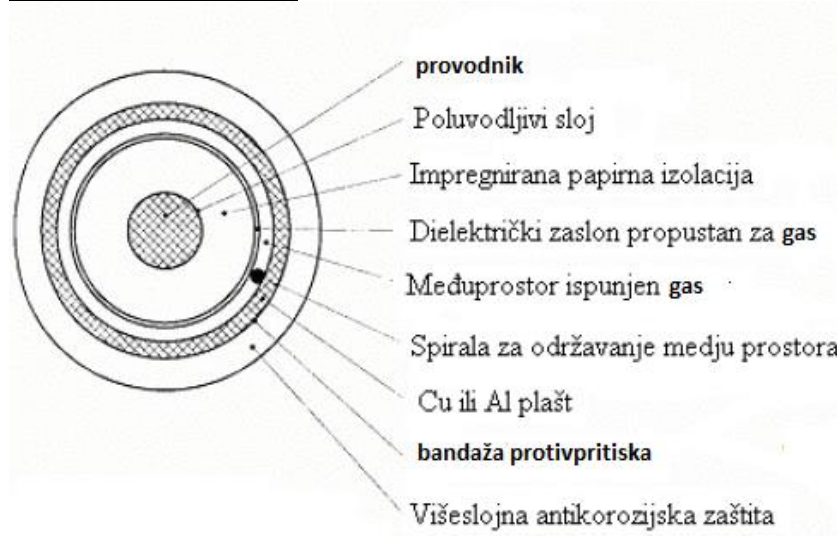
Gasni kabal

- s porastom pritiska raste probojna čvrstoća vazduha i gasova
- azot (dušik), azot + sumpor heksafluorid SF₆, SF₆
- pritisak azota u kablju 1 -1,5 MPa
- za napone do oko 300 kV
- podobni za savladavanje većih visinskih razlika

Dijele se na:

- savitljive kablove s plaštem,
- krute cijevne kablove.

Jednožilni gasni kabl



Danas se i za kablove visokog i veoma visokog napona koriste kablovi sa čvrstom, sintetičom izolacijom, prvenstveno sa izolacijom od umreženog polietilena.

4. Provodnik kabla

Provodnik je metalni dio kabla namjenjen provođenju struje.

Od materijala se u praksi primjenjuju samo **bakar (Cu) i aluminijum (Al)**.

Bakar se do unazad nekoliko desetina godina tradicionalno koristio za izradu provodnika kod kablova. Zamjena bakra aluminijumom kod izolovanih provodnika nije svrsishodna, dok je njegova primjena kod energetskih kablova vrlo efikasna.

Provodnost aluminijuma je oko 2/3 provodnosti bakra, a specifična masa mu je samo 30,4% od specifične mase bakra. Dakle, kabl iste mase provodnika izrađen od aluminijuma ima oko dva puta veće dozvoljeno strujno opterećenje.

Vrijednosti osnovnih električnih karakteristika provodnika:

- Specifična električna otpornost ($\rho[\Omega mm^2 / m]$) na temperaturi $20^{\circ}C$:

$$C_u \quad 0,017241$$

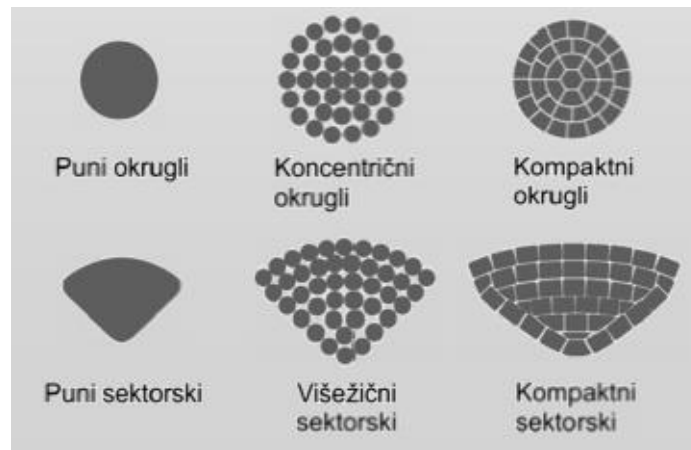
$$Al \quad 0,02845$$

- Temperaturni koeficijent otpora ($\alpha_R[1/^{\circ}C]$), koji predstavlja mjeru promjene električne otpornosti pri porastu temperature :

$$C_u \quad 0,00393$$

$$Al \quad 0,00403$$

Oblik presjeka provodnika (Slika 3) može biti: okrugli, sektorski ili cijevni. Okrugli i sektorski se izvode kao puni, i dominantno kao višežični. Puni okrugli presjeci uobičajeno se rade za presjeke do 16 mm^2 , okrugli višežični za presjeke od 10 do 1000 mm^2 i višežični sektorski za presjeke od 25 do 400 mm^2 .



Slika 3. Oblici presjeka provodnika kablova

Kod označavanja kablova, četvrta grupa oznaka se odnosi na vrstu materijala, oblik presjeka i sastav provodnika:

- Za provodnik od **Cu** ne piše se oznaka
- Za provodnik od **Al** koristi se simbol **A**
- Za višežične okrugle presjeke ne piše se oznaka
- Za višežične sektorske provodnike koristi se simbol **S**

5. Izolacija kabla

Izolaciju kabla čini dobar izolacioni materijal koji se postavlja oko provodnika kabla, prvenstveno radi izolacije provodnika pod naponom, uz odgovarajuće efekte električne i mehaničke zaštite.

Osnovna vrsta izolacije kod elektroenergetskih kablova je **čvrsta izolacija**, dok se kod kablova VN kao izolacija primjenjuje i **ulje ili gas pod pritiskom**.

S ozirom na vrstu čvrste izolacije, razlikujemo:

- kablove sa sintetičkom (polimer) izolacijom i
- kablove izolovane impregnisanim papirom.

Kod kablova sa sintetičkom izolacijom izolacija se nanosi u vidu homogenog bešavnog sloja od:

- **termoplastičnog** ili
- **termostabilnog** materijala.

U termoplastične materijale spadaju:

- **PVC** (mješavina na bazi **polivinilhlorida**) i
- **polietilen (PE)**,

a u termostabilne

- **umreženi polietilen (UMPE ili XLPE- CrossLinked PolyEthylene)**.

Osnovna razlika ove dvije grupe materijala je njihovo ponašanje na povišenim temperaturama.

Mehanička čvrstoća termoplasta značajno opada na **75°C**, a na temperaturi iznad **100°C** dolazi do veoma velikih deformacija. Zato kablove sa termoplastičnom izolacijom treba koristiti tamo gdje je mala opasnost od eventualnog termičkog preopterećenja.

Karakteristike PVC izolacije:

Naponski nivo primjene PVC izolacije je **1–6kV**.

Dozvoljena radna temperatura je **70°C**,

Dozvoljena temperatura pri kratkim preopterećenjima do **90°C**.

U kratkom spoju (najduže 5 s) dozvoljena temperatura iznosi **160°C**.

Relativna dielektrična konstanta je $\epsilon_r = 4 - 6$.

Faktor dielektričnih gubitaka $tg\delta = 0,05 - 0,1$.

Specifični izolacioni otpor, pri 20 °C, je $10^{14} \Omega cm$.

Karakteristike PE izolacije:

Naponski nivo primjene PE izolacije je sve do VN (70 kV kabl u Švajcarskoj i Belgiji, 110 kV u Njemačkoj).

Dozvoljena radna temperatura energetskih **kablova sa PE izolacijom** je $70^\circ C$, a pri kratkim preopterećenjima do $90^\circ C$.

U kratkom spoju dozvoljena temperatura iznosi $130^\circ C$.

Relativna dielektrična konstanta je $\epsilon_r = 2,3$.

Faktor dielektričnih gubitaka $tg\delta = 0,0003$.

Specifični izolacioni otpor, pri 20 °C je $10^{16} \Omega cm$.

Procesom umrežavanja postiže se poboljšanje termičkih karakteristika kod termostabilnih materijala. Zato je kod kablova izolovanih tim materijalima dozvoljeno znatno veće strujno opterećenje u normalnom pogonu, a naročito u kratkom spoju. Takođe je dozvoljeno visoko opterećenje u nužnom (rezervnom) pogonu.

Za provodnike i kablove koji ne smiju sadržati halogene elemente, primjenjuje se specijalni materijal na bazi **poliolefina (H)**.

Umreženi polietilen (UMPE ili XLPE) je jedan od najboljih materijala za izolaciju energetskih kablova. Njegove glavne osobine su dobre električne, mehaničke i toplotne karakteristike.

Naponski nivo primjene XLPE izolacije **3 – 35kV i 110kV**.

Dozvoljena radna temperatura energetskih **kablova sa XLPE izolacijom** je $90^\circ C$, a pri kratkim preopterećenjima do $130^\circ C$.

U kratkom spoju (najduže 5 s) dozvoljena temperatura iznosi $250^\circ C$.

Relativna dielektrična konstanta je $\epsilon_r = 2,3$.

Faktor dielektričnih gubitaka je mali $tg\delta = 0,0005$ i sa promjenom temperature skoro stalan.

Specifični izolacioni otpor, pri 20 °C je $10^{16} \Omega cm$.

UMPE ima veliku otpornost prema hemijskim agensima, otporan je na niske temperature do $-70^\circ C$, upijanje vode je neznatno.

Rad pri temperaturi kratkotrajnog preopterećenja ne smije trajati više od 100 sati unutar 12 uzastopnih mjeseci ni više od 500 sati ukupnog korišćenja kabla.

Kod viših napona i deblje izolacije, osnovni problem je proizvodnja homogene izolacije, bez šupljina i nečistoća.

Osnovni nedostatak PE i UMPE izolacije je **osjetljivost na parcijalna pražnjenja**.

Kod kablova izolovanih impregnisanim papirom izolacija se sastoji od više impregnisanih papirnih traka, helikoidno omotanih oko provodnika. Omotavanje se vrši na mašinama koje obezbjeđuju precizno i čvrsto naleganje papirnih traka, da bi se izbjeglo stvaranje vertikalnih zazora i vazdušnih prostora koji su podložni jonizaciji.

Upotrebljavaju se kod SN kablova, sve do 60 kV

Dozvoljena radna temperatura u trajnom pogonu $65^\circ C$, za više napone manja $60^\circ C$

U ratkom spoju $160^\circ C$, za više napone manje, $140^\circ C$

Postoje papirni kablovi sa :

- **Normalnim kompaudom (IP)**
- **Naročitim kompaudom (NP)**

Kod označavanja kablova početne grupa oznaka odnosi se na izolaciju. Koriste se sljedeći simboli za materijal izolacije kabla:

P – PVC

E – polietilen

X – umreženi polietilen

IP – impregnisana papirna izolacija u normalnom (tečnom) kompaundu

NP - impregnisana papirna izolacija u naročitom (polučvrstom) kompaundu.

Guma, koja je nekad bila u upotrebi, više se ne koristi jer se pokazalo da usled dužeg izlaganja visokim temperaturama postaje krta.

6. Označavanje kablova

Pod označavanjem kablova podrazumijeva se skup oznaka slovima, brojevima i bojama koji omogućuje da se potpuno tačno odredi, tj. raspozna kabl.

Kod nas je u upotrebi označavanje propisano standardom JUS (ali se u svakodnevnoj praksi susrijeće i označavanje prema njemačkim propisima VDE).

Označavanje kablova po JUS-u:

- Prva grupa simbola sadrži slova koja **označavaju materijal za izradu izolacije provodnika i plašta kabela.**

Slovni simboli za vrstu materijala izolacije i plašta:

P - PVC

E - polietilen

X - umreženi polietilen

IP - impregnisana papirna izolacija u normalnom (tečnom) kompaundu

NP - impregnisana papirna izolacija u naročitom (polučvrstom) kompaundu

H - elektrostatička zaštita svake žile (ekran)

O - plašt od olova, olovne legure

A - plašt od aluminijuma

ZO - zaseban olovni plašt svake žile

- Druga grupa daje podatke o njegovim mehaničkim svojstvima i antikorozivnoj zaštiti.

Ovu grupu čine dva broja koja se pišu pored prve grupe

Prvi broj definiše način na koji je izvedena mehanička zaštita a drugi broj definiše antikorozivnu zaštitu. Svaka dekada nosi određena zajednička konstruktivna obilježja:

Simboli od 01 do 09 označavaju zaštitu od korozije preko plašta:

04 - spoljni zaštitni sloj od PVC mase ...

Simboli od 10 do 19 označavaju mehaničku zaštitu od čeličnih traka sa zaštitom od korozije ili bez nje:

11 - armatura od dve čelične trake sa premazom od bitumen-laka

13 - armatura od dve čelične trake i sloj impregnisanog jutanog prediva ili hesijana

14 - armatura od dve čelične trake i spoljni plašt od PVC mase ...

Simboli od 20 do 29 označavaju mehaničku zaštitu od pocinčane okrugle čelične žice sa zaštitom od korozije ili bez nje:

21 - armatura od okruglih pocinkovanih čeličnih žica sa zavojnicom od čelične trake

23 - armatura od okruglih pocinkovanih čeličnih žica i sloj od impregnisanog jutanog prediva ili hesijana

25 - armatura od okruglih pocinkovanih čeličnih žica, sa zavojnicom od čelične trake i spoljni plašt od PVC-a, ...

Simboli od 30 do 39 označavaju mehaničku zaštitu od pocinčane pljosnate čelične žice sa zaštitom od korozije ili bez nje:

31 - armatura od pljosnatih pocinkovanih čeličnih žica sa zavojnicom od čelične trake

33 - armature od pljosnatih pocinkovanih čeličnih žica i sloj od impregnisanog jutanog prediva ili hesijana

35 - armatura od pljosnatih pocinkovanih čeličnih žica sa zavojnicom od čelične trake i spoljni plašt od PVC-a

36 - armatura od specijalnih aluminijumskih okruglih žica i sloj od impregnisanog jutanog prediva

37 - armatura od specijalnih aluminijumskih okruglih žica sa zavojnicom od aluminijumske trake i spoljni plašt od PVC mase, ...

- Treću grupu čine slovni simboli za vrstu materijala i oblik presjeka provodnika: za žile od bakra okruglog preseka ništa se ne piše, za aluminijumske žile - A, sektorskog oblika preseka - S. jednožični provodnik - J

- Četvrtu grupu čine brojčane oznake i ona daje podatke o broju žila i preseku provodnika. Prvi broj je broj žila a sledeći broj je poprečni presek provodnika u mm^2 : $4 \times 25 \text{mm}^2$; Ako je nulti provodnik manjeg preseka od faznog onda je : $3 \times 25 + 16 \text{mm}^2$; $3 \times 25 / 16 \text{mm}^2$ za koaksijalno raspoređen nulti provodnik (fazni provodnici se použe a oko njih se mota helikoidalno nulti provodnik).

- Peta grupa oznaka daje nazivni (naznačeni) napon kabla. Nazivni napon se označava brojem i izražava u kV (uvijek linijski napon).

IPZO 13 3x95mm² 35kV: Energetski kabl izolovan impregnisanim papirom sa zasebnim olovnim plaštom za svaku žilu, sa mehaničkom zaštitom od čeličnih traka, sa provodnicima od bakra, okruglog presjeka, tri provodnika po 95mm^2 , nazivnog napona 35kV.

Primjeri

1. Kabl IPO 13 i IPO 13-A, NPO 13 i NPO 13-A



Energetski kabl izolovan IMPREGNISANIM PAPIROM sa OLOVNIM PLAŠTOM, ARMATUROM OD DVIJE ČELIČNE TRAKE i KOROZIVNOM ZAŠTITOM

Nazivni napon 10 kV. Ispitni napon 18 kV

Opis konstrukcija:

Provodnik: uže od bakra (IPO 13) ili aluminijuma (IPO 13-A).

Žila: Provodnik izolovan papirnim trakama.

Jezgro kabla: Žile použene i omotane slojem papirnih traka, i sve impregnisano normalnim ili naročitim kompaundom.

Plašt: Bešavna cijev od olova ili olovne legure.

Unutrašnja zaštita: Impregnisani papir ili impregnisana juta sa premazima od bitumenske mase.

Mehanička zaštita: Dvije čelične trake.

Spoljna zaštita: Impregnisana juta sa premazima od bitumenske mase.

IZOLACIJA se sastoji od više impregnisanih papirnih traka, helikoidno omotanih oko provodnika. Omotavanje se vrši na mašinama koje obezbeđuju precizno i čvrsto naleganje papirnih traka pa je isključeno stvaranje vertikalnih zazora i vazdušnih prostora koji su podložni jonizaciji.

Za slučaj impregnisane papirne izolacija u normalnom (tečnom) kompaundu – **IP**

Za slučaj impregnisane papirna izolacija u naročitom (polučvrstom) kompaundu - **NP**.

JEZGRO KABLA čine međusobno použene žile kabla, a prostor između žila ispunjen je papirnim kordelom ili jutanim predivom da bi se dobile bolje termičke karakteristike i kružni oblik jezgra kabla.

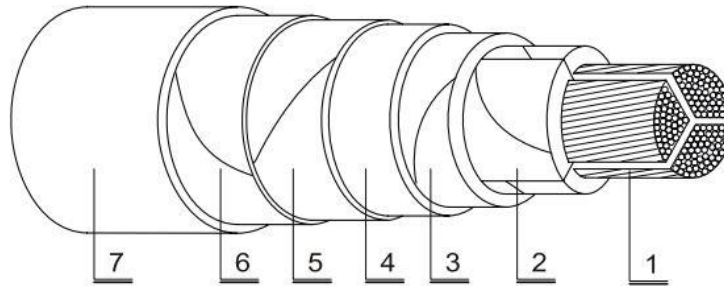
Preko použenih žila kablova nazivnog napona do 10 kV stavlja se izolacija od papirnih traka helikoidno omotanih oko jezgra kabla. Ova pojasna izolacija pored mehaničkog učvršćenja žila povećava i dielektričnu čvrstoću između provodnika i metalnog plašta.

PLAŠT KABLA (metalni) se izrađuje istiskivanjem metala u toplom stanju u vidu bešavne cijevi. Metal može biti olovo ili legura olova. Metalni plašt se izrađuje na hidrauličnoj ili kontinualnoj presi.

ANTIKOROZIVNA ZAŠTITA se sastoji od unutrašnje i spoljne zaštite između kojih se nalazi armatura. Unutrašnja zaštita štiti od korozije metalni plašt a spoljna armaturu kabla. Unutrašnja zaštita se sastoji od impregnisanog papira i bitumenske mase a spoljašnja od impregnisanog vlaknastog materijala i bitumenske mase.

MEHANIČKA ZAŠTITA KABLOVA se sastoji od armature koja se izrađuje od čeličnih traka.

2. Kabl NPO 13-AS ... : Trožilni kabl sa sektorskim aluminijumskim provodnicima i izolacijom od naročito impregnisanog papira (polučvrsti kompaund), sa olovnim plaštom, armaturom od dvije čelične trake i spoljašnjom i unutrašnjom antikorozivnom zaštitom od slojeva jute i bitumena. Najviše upotrebljavan papirni kabl je tzv. pojasni kabl (Slika 4).

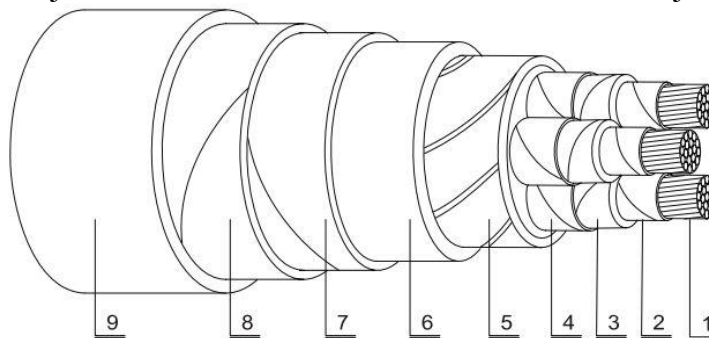


Slika 4: Pojasni kabl (NPO 13-AS, 6/10 kV)

1-Al sektorski provodnik, 2-izolacija žile, 3-pojasna izolacija, 4-olovni omotač, 5-impregnisani papir ili juta, 6-čelična armatura i 7-impregnisana juta

Za napone iznad 15 kV koristi se tzv. ekranizirani kabl sa radijalnim električnim poljem (Slika 5).

3. Kabl NPHO 13-A ...: Trožilni kabl sa aluminijumskim okruglim provodnicima i izolacijom od naročito impregnisanog papira, sa slaboprovodnim slojem ispod i iznad izolacije, sa olovnim plaštom, armaturom od dvije čelične trake i antikorozivnom zaštitom od slojeva jute i bitumena.

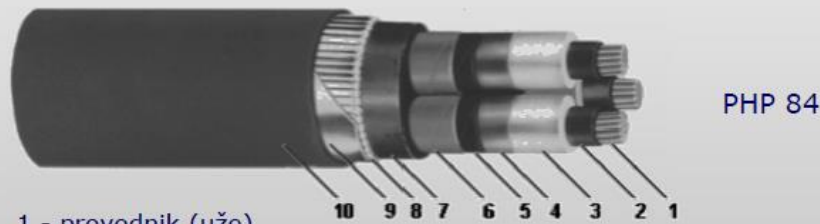


Slika 5: Ekranizirani kabl (NPHO 13-A, 12/20 kV)

1-Al 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 (juta), 8- čelična armatura i 9-impregnisana juta

4. Kabl PHP 84 ...: energetskog kabla za napajanje na mjestima gdje se očekuju velika mehanička naprezanja (predviđen za polaganje u zemlju i kablovske kanale).

➤ Kabel je trožilni, sa izolacijom i plaštom od PVC mase, električnom zaštitom za svaku žilu posebno i armaturom od okruglih pocinkovanih čeličnih žica

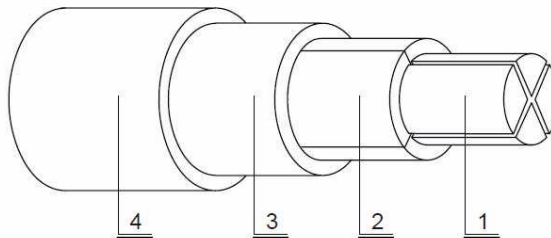


- 1 - provodnik (uže)
- 2 - ekran provodnika (slaboprovodljivi sloj, PVC masa)
- 3 - izolacija provodnika (od termoplastične, PVC mase)
- 4 - premaz poluprovodnom masom
- 5 - omot od poluprovodne trake
- 6 - ekran kabla (električna zaštita, koju čini omot od bakarnih traka)
- 7 - jezgro kabla (od ne vulkanizirane gume preko použenih žila)
- 8 - armatura koju čini omot od okruglih pocinkovanih čeličnih žica
- 9 - armatura od namotane pocinkovane čelične trake
- 10 - plašt koga obrazuje bešavni sloj od PVC mase crvene boje

7. Tehničke preporuke za izbor kablova u elektrodistributivnim mrežama napona 1 kV, 10 kV, 20 kV, 35 kV

Izbor kablova niskog napona 0.6/1 kV

U mreži niskog napona preporučuje se primjena dva osnovna tipa kabla naznačenog napona 0,6/1 kV (slika):



1 aluminiјумski једножиčni sektorски provodnik; 2 PVC или UPE izolacija;
3 ispunа od gume или PVC; 4 PVC plašt

a) Tip PP00-ASJ

To je četvorožilni kabl sa jednožičnim sektorskim aluminijumskim provodnicima, PVC izolacijom, ispunom od gume ili PVC-a i PVC plaštom.

b) Tip XP00-ASJ

To je četvorožilni kabl sa jednožičnim sektorskim aluminijumskim provodnicima, izolacijom od umreženog polietilena (UPE), ispunom od gume ili PVC-a i PVC plaštom.

Ovaj tip kabla ima prednosti na dijelu konzuma sa velikom gustinom opterećenja, kao i na mjestima sa velikim termičkim naprezanjima kabla (polaganje više kablova u isti rov, polaganje u tlo velike specifične toplotne otpornosti, polaganje u blizini toplovođa itd.).

Na mjestima gde se očekuju povećana mehanička naprezanja, kao: gradilišta, provizorijumi, nezaštićeni regali izloženi mogućim udarima itd., preporučuje se primjena kabla sa armaturom od dvije čelične trake, tip PP41-ASJ ili XP41-ASJ, a na mjestima sa izuzetnim mehaničkim naprezanjima, kao za vertikalno polaganje u dužini preko 30 m, na klizištima itd. preporučuje se kabl sa armaturom od čeličnih žica, tip PP44-ASJ ili XP44-ASJ.

Dozvoljena je primjena i odgovarajućih konstrukcija sa višežičnim aluminijumskim provodnicima npr.: PP00-AS, XP00-AS itd.

Obilježavanje žila energetskog kabla izvodi se na sljedeći način:

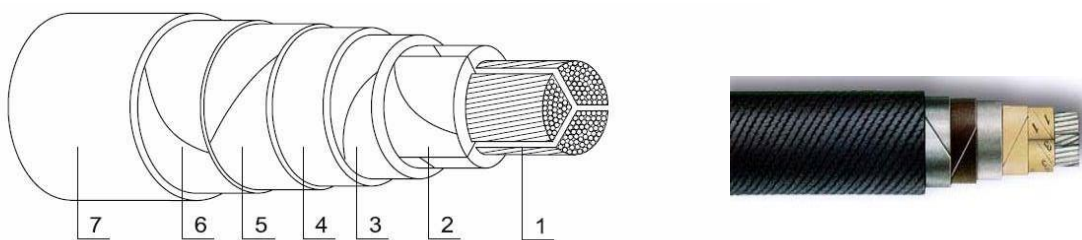
- dvije žile faznih provodnika: crno;
- jedna žila faznog provodnika: smeđe;
- žila neutralnog provodnika: svetloplavo.

U distributivnim mrežama je zabranjena primena kablova kod kojih je jedna od žila obilježena žuto-zelenom bojom.

Izbor kablova srednjeg napona 6/10 kV

U mreži 10 kV preporučuje se primjena dva osnovna tipa kabla naznačenog napona 6/10 kV:

1) **Tip NPO 13-AS** (JUS N.C5.020). To je trožilni kabl sa sektorskim aluminijumskim provodnicima i izolacijom od naročito impregnisanog papira (polučvrsti kompaund), sa olovnim plaštom, armaturom od dvije čelične trake i antikorozivnom zaštitom od slojeva jute i bitumena.

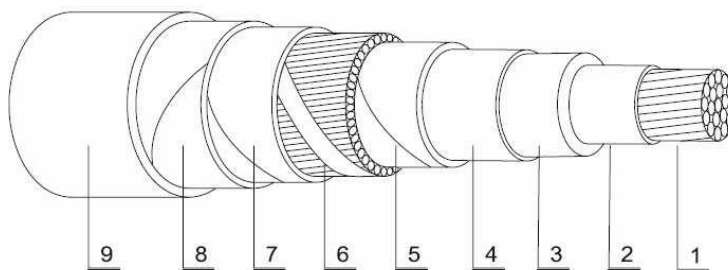


1 aluminijumski sektorski provodnik; 2 izolacija žile od naročito impregnisanog papira (NP); 3 pojasna izolacija; 4 olovni plašt; 5 impregnisani papir ili juta; 6 čelična armatura; 7 impregnisana juta.

2) **Tip XHE 49-A** (JUS N.C5.230). To je jednožilni kabl (tri kabla, pojedinačno ili u snopu) sa aluminijumskim okruglim provodnikom i izolacijom od UPE, sa slaboprovodnim slojem ispod i iznad izolacije, sa električnom zaštitom od bakarnih žica i trake, sa slaboprovodnom bubrežom trakom ispod i iznad električne zaštite, sa aluminijumskom polimer trakom i spoljašnjim polietilenskim plaštom visoke gustine.



Tip XHE 49-A



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

Izbor kablova 20/35 kV

1) **Tip XHE 49-A** (JUS N.C5.230). To je jednožilni kabl (tri kabla, pojedinačno ili u snopu) sa aluminijumskim okruglim provodnikom i izolacijom od UPE, sa slaboprovodnim slojem ispod i iznad izolacije, sa električnom zaštitom od bakarnih žica i traka, sa slaboprovodnom bubrećom trakom ispod i iznad električne zaštite, sa aluminijumskom polimer trakom i spoljašnjim polietilenskim plaštom visoke gustine. Za izolaciju kabla 20/35 kV **tipa XHE 49-A** preporučuje se primjena postupka suvog umrežavanja.



Tip XHE 49-A

2) **Tip NPHA 03-A** (JUS N.C5.020). To je jednožilni kabla sa aluminijumskim ili bakarnim provodnikom i izolacijom od naročito impregnisanog papira, sa poluprovodnim slojem ispod i iznad izolacije, sa plaštom od bešavne aluminijumske cijevi i spoljašnjim plolietilenskim plaštom visoke gustine.

Kablovski priključci 35 kV na energetske transformatore, bez obzira na odnos transformacije i naznačene snage, izvode se jednožilnim kablovima sa izolacijom od UPE, **tip XHE 49-A** i **XHP 48**.



Tip NPHA 03-A

Tipizacija presjeka provodnika

Za glavne napojne vodove distributivnih mreža 1 kV, 10 kV, 20 kV, 35 kV preporučuje se primjena sljedećih presjeka: 50 mm² Al, 95 mm² Al, 150 mm² Al, 240 mm² Al, respektivno.

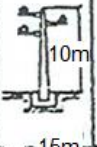
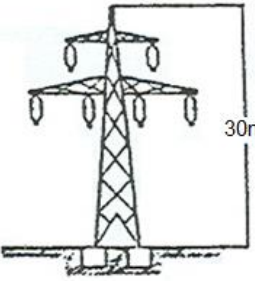
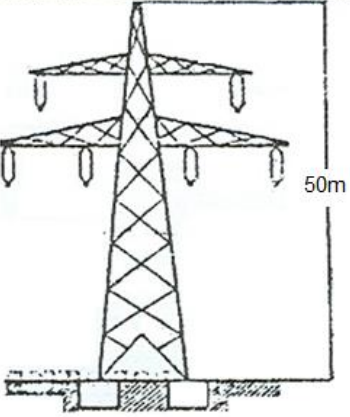

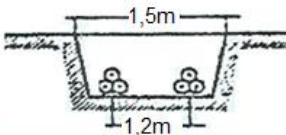
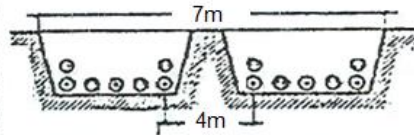
Tipski presjek provodnika za glavne napojne vodove gradskih mreža je 150 mm² Al. Međutim, za prve dionice vodova 10 (20) kV iz TS 110/10 (20) kV, zbog nepovoljnih uslova polaganja (veliki broj kablova u istom rovu), preporučuje se presjek provodnika 240 mm² Al.

8. KABLOVI I NADZEMNI ELEKTROENERGETSKI VODOVI **- uporedna analiza primjene -**

Uticaj na okolinu

Uticaj vodova ogleda se u: zauzimanju prostora i površine, uticaja na telekomunikacione veze, narušavanja okoline, uticaja elektomagnetskog polja na čoveka i dr.

Nadzemni vodovi zauzimaju nad zemljom znatan prostor i na taj način uglavnom onemogućavaju gradnju pod njima, a takođe mada znatno manje, smanjuju obradivu površinu (temelji stubova). Prostor koji nadzemni vod zauzima obrazuju: širina stubova, uključujući konzole, njihanje izolatora, njihanje provodnika i sigurnosni razmak. Tako se dolazi do širine tog koridora čak do oko 70 m što zavisi u osnovi od tipa sistema (jednosistemske ili dvosistemske vod), napona nadzemnog voda, tj. od veličine stuba, izolatora, provodnika, raspona između stubova dr. Na Slici 6 je dat pregled zauzeća površina (ZP) pod nadzemnim i kablovskim vodovima. Pri tome su za 110 i 400 kV razmatrani dvosistemske vodovi, a širina koridora za nadzemne vodove računata je na sredini raspona.

		NAPON		
VOD	10 kV	110 kV		
n a d z e m n i				
k a b l				
odnos ZP	1:40	~ 1:30	~ 1:10	

Slika 5: Uporedni pregled zauzeća koridora nadzemnih i kablovskih vodova

Kablovski vodovi zauzimaju koridor, mada znatno uži, na kome je onemogućena gradnja i intenzivna obrada zemljišta. Odnosi površina koje zauzimaju nadzemni i kablovski vodovi se kreću od 1:10 do 1:40, zavisno od napona vodova.

Nadzemni vodovi narušavaju estetski izgled okoline, onemogućuju razvoj gradova, ometaju vazdušni saobraćaj i dr.

Kod kablovskih vodova ovo sve otpada, čak vrlo rijetko utiču na smanjenje obradivih površina, jer se obično grade u urbanim sredinama gdje ne postoje obradive površine.

Uticao nadzemnih vodova na telekomunikacione vodove je u principu veći od kablovskih vodova, jer provodnik nadzemnog voda nema ekranizujući efekat. Međutim, ovaj uticaj u primjeni je znatno smanjen, jer se energetske visokonaponske nadzemne i telekomunikacione vodove vode na većim rastojanjima. Kod kablovskih vodova, zbog velikih mogućnosti u izboru tipa kabla sa gledišta ekranizujućeg efekta, problem uticaja na telekomunikacione vodove se sasvim uspješno rješava iako su međusobna rastojanja relativno mala.

Uticao nadzemnih vodova na okolinu ogleda se takođe i na djelovanju elektromagnetnog polja na ljude i životinje. Takođe se izučava i uticaj na biljke i bakterije.

Kod kablovskih vodova ovi uticaji praktično ne postoje, jer je električno polje zatvoreno u sam kabl, između provodnika i ekrana, a rezultatno magnetno polje van kabla je u normalnom pogonu praktično zanemarljivo.

Na jačinu električnog i magnetnog polja na zemlji ispod nadzemnog voda utiču sljedeći činioci: visina napona, visina strujnog opterećenja, oblik stuba i razmještaj provodnika, visina provodnika nad zemljom. Sa porastom nazivnog napona, a i strujno opterećenje ovi uticaji su sve veći. Uvođenjem visokih napona 750 kV, pa čak i 1500 kV ova pitanja se sve više zaoštavaju.

Proračuni za jedan konkretni slučaj dvosistemskog 400 kV voda, dali su sljedeće vrijednosti električnog i magnetskog polja na sredini raspona: 5,5 kV/m i 11 μ T.

Merenja jačine električnog polja na dvosistemskim nadzemnim vodovima, određene konstrukcije stubova u određenim eksploatacionim uslovima, dala su nešto niže vrijednosti:

- za 110 kV nadzemni vod: oko 1 kV/m,
- za 220 kV nadzemni vod: oko 2,5 kV/m i
- za 400 kV nadzemni vod: oko 4,8 kV/m.

Uopšteno, ispitivanja pokazuju nesumnjiv uticaj elektromagnetnog polja na čovjeka. Istraživanja u SSSR i Japanu su ustanovila da električno polje utiče na centralni nervni sistem, kardiovaskularni sistem i promjene u krvi. Međutim, smatra se da sada ne postoji veća opasnost i da ove promjene u organizmu nisu patološke prirode.

Pitanje koja jačina električnog polja se smatra graničnom još je uvijek aktuelno. Neki autori uzimaju da je to vrijednost od 5 kV/m, te predlažu da se za te slučajeve ograniči vrijeme boravka u električnom polju. Ispitivanju uticaja magnetnog polja poklanja se manja pažnja. Ispitivanje sa jakim magnetnim poljima od 15 mT do 420 mT pokazalo je da kod ljudi postoji niz neurovegetativnih smetnji. Međutim, kod slabijih polja nisu uočene promjene u ljudskom organizmu.

Strujno opterećenje

Strujno opterećenje nadzemnog voda zavisi od temperature vazduha, brzine vjetra, sunčevog zračenja itd. U osnovi, ono je određeno dozvoljenom temperaturom zagrijavanja užeta, a na osnovu mehaničke čvrstoće užeta. Nadzemni vod ima u pogonu pri nižim temperaturama i jačim vjetrovima velike mogućnosti za strujnim preopterećenjem bez skraćanja životnog vijeka voda.

Kod kablova međutim postoji više ograničenja. Ambijent, zemljište koje okružuje kabl ima nepogodne toplotne osobine:

- temperaturu (za srednjoevropsko područje): 20°C,
- specifični toplotni otpor: 1 Km/W.

Zemljište ima izvesne pogodnosti zimi kad mu je temperatura oko 5-7°C. Specifični toplotni otpor zemljišta u isušenom stanju može dostići čak trostruku vrijednost: 3Km/W. Takođe približavanje toplovoda i drugih kablova posmatranom kablju još više snižava njegovo dozvoljeno strujno opterećenje. Toga kod nadzemnih vodova nema.

Ove činjenice mogu u realnim okolnostima smanjiti opterećenje kabla za više od 50% od nominalnog.

Sa gledišta odvođenja toplote proces je kod nadzemnih vodova relativno uprošćen, jer se toplota prenosi sa provodnika na vazduh direktno, bez posrednika. Kod kablova prostiranju toplote suprotstavlja se izolacija kabla, spoljašnji slojevi kabla i zemljište koje je, kao ambijent koji okružuje kabl duž njegove cijele trase, relativno nepoznatih i promjenjivih toplotnih osobina.

Izolacije kabla imaju različite toplotne otpornosti, tako:

- umreženi polietilen 3,5 Km/W,
- polivinilhlorid 6 Km/W,
- izolacija uljnog kabla 5 Km/W,
- papir impregnisani u uljnom kompaundu 6 Km/W.

Sve to čini da je dozvoljeno strujno opterećenje kablova znatno niže od nadzemnog voda. Kod viših napona u igru ulaze i dialektični gubici pošto su oni srazmjerni U^2 , tj.:

$$G_d = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta$$

gdje su: U - međufazni napon,
 C - pogonski kapacitet,
 $\operatorname{tg} \delta$ - faktor gubitka i
 $\omega = 2\pi f$ - kružna učestanost sistema ($f=50$ Hz, $\omega=314$ 1/s)

U tom slučaju izolacija kao generator toplote stvara dodatne gubitke u kablju, što ide na uštrb gubitaka u provodniku, a time i na smanjenje dozvoljenog strujnog opterećenja. Kod vrlo visokih napona dielektrični gubici praktično onemogućavaju bilo kakav prenos snage kablom. Tako pri naponu od oko 850 kV uljni kabl presjeka provodnika 2500 mm² nebi mogao preneti ni 1A. U tome

ima znatnog učešća i sama izolacija, jer visoka dielektrična konstanta (ϵ_r) i faktor gubitaka dovode do većih gubitaka. Tako, za papirnu izolaciju sa uljem je: $\epsilon_r \approx 3,3 - 3,6$ i $\text{tg}\delta \approx (2,5 - 3) 10^{-3}$, a njihov proizvod oko 0,01. Međutim, kod posebnih izolacija kao što je troslojna, laminirana izolacija sastavljena od sloja tanke plastične trake i dvije papirne (PPL – polipropilen, papir laminirani) ovaj proizvod je znatno niži, i iznosi svega 0,002. Stoga je ova izolacija pogodna za najviše napone, čak i za 1000 kV.

Takođe i gubici u metalnim omotačima kabla predstavljaju ograničenje za opterećenje kabla. Oni mogu dostići čak četvrtinu ukupnih gubitaka u kablu.

Sa gledišta prenosa snage kod kablova se u pogledu primjenjenih dužina javljaju ograničenja. Termička snaga kabla, zavisno od \cos potrošača, ne može se prenjeti na bilo koju dužinu. Ovaj proces prenosa se prikazuje poznatim jednačinama lančanice elementarnih valičina voda. Njihovim rešenjima i analizama dolazi se do toga da već posle 10 km dužine, moguća snaga prenosa se počinje primjetno smanjivati. To se posebno odnosi na 400 kV kablove, dok je dužina kod 110 kV kablova oko 20 km. Uopšteno govoreći prirodno hlađeni uljni kablovi mogu premostiti i veće dužine od 50 km ali pod uslovom da su opterećenja induktivna. Pri tom prenosna snaga biće u svakom slučaju znatno manja od termičke snage.

Reaktivna snaga

Elementi mreže (nadzemni vodovi i kablovi) mogu da apsorbiraju ili generišu reaktivnu snagu, u zavisnosti od stepena opterećenja, odnosno veličine prividne snage koja se njima transportuje, kao i njene relativne vrednosti prema prirodnoj snazi (P_{pr}) voda.

Kao što je poznato, pri prenosu snage koja je jednaka prirodnoj, vod sam sebe kompenzuje, pošto su gubici reaktivne (induktivne) snage usled rasipanja ekvivalentni proizvodnji reaktivne snage na kapacitetima voda. Kad je vod opterećen snagom većom od prirodne, gubici reaktivne snage na njemu postaju veći od proizvodnje reaktivne snage od strane kapaciteta voda, tako da vod u celini troši reaktivnu snagu iz elektroenergetskog sistema. U suprotnom slučaju, odnosno pri prenosu kroz vod snage manje od prirodne, proizvodnja nadmašuje gubitke reaktivne snage (induktivne) na reaktansi voda, tako da vod odaje sistemu reaktivnu snagu, a njena vrednost zavisi od napona, dužine prenosne linije i naravno, od opterećenja.

Kapacitivne mogućnosti mreže u pogledu proizvodnje reaktivne snage se moraju uzeti u obzir pri proračunima i analizi prilika u mreži, jer dolaze do izražaja naročito u periodima niskih opterećenja, kada su praćeni pojavom povišenih napona u sistemu.

Što se tiče kablovskih vodova, čije je prisustvo naročito značajno u distributivnoj mreži, može se generalno smatrati da imaju podužni kapacitet više desetina puta veći, ali im je dužina desetak puta manja od nadzemnih vodova istog napona. Ovim je znatno smanjen njihov uticaj u mreži kao potencijalnih izvora reaktivne snage, bez obzira na izvanredno visoke vrednosti reaktivnih induktivnih snaga po jedinici dužine koje kablovi generišu u praznom hodu, kao i mnogo veće vrednosti prirodnih snaga u poređenju sa nadzemnim vodovima istog napona. Ipak, njihov kapacitivni efekat se može smatrati vrlo značajnim pri transportu velikih iznosa snage, zato što oni predstavljaju raspodjeljeni izvor kompenzacije za gubitke reaktivne snage na njihovim induktivnostima.

Načelno postoji težnja da prenosni sistem imaju što manju potrebu za reaktivnom snagom. Takav je slučaj i sa kablovima kod kojih se sa gledišta izolacionih materijala utiče na kapacitet da bi se smanjila tzv. struja punjenja kabla, a time i njegova reaktivna snaga.

Pogonski kapacitet kablova je za oko 15 do 50 puta veci od kapaciteta odgovarajućih (istog napona) nadzemnih vodova.

Iz tog razloga a i zbog niskog pogonskog induktiviteta kablovi u praznom hodu imaju relativno visoku kapacitivnu snagu. Od interesa je pogledati kako se kablovi i nadzemni vodovi ponašaju sa gledišta tzv. prirodne snage.

Prirodna snaga prenosa je određena izrazom:

$$P_{pr} = \frac{U^2}{Z_v} = U^2 \sqrt{\frac{C_0}{L_0}},$$

gdje su C_0 i L_0 jedinična pogonska kapacitivnost i jedinična induktivnost voda.

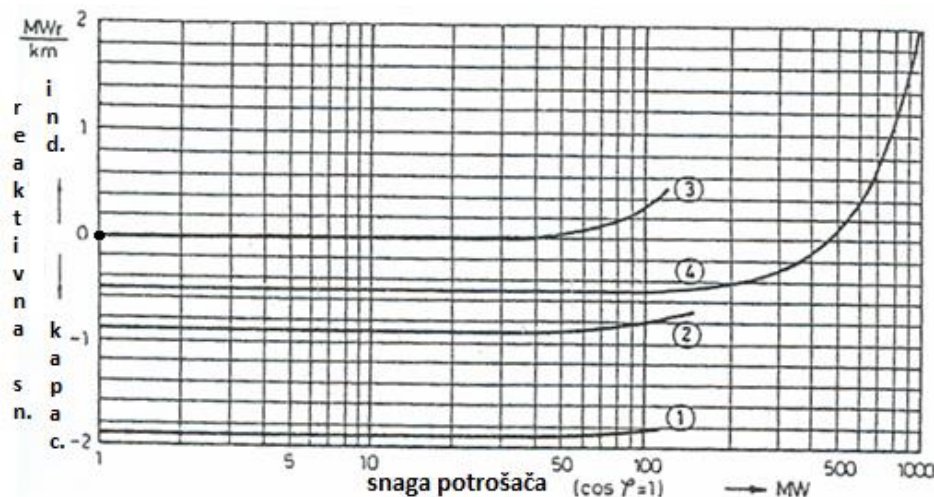
Kada je vod opterećen upravo prirodnom snagom imamo idealne pogonske prilike, pri čemu je:

- napon konstantan duž voda: najbolje iskorištena izolacija voda,
- struja konstantna duž voda: najbolje iskorišten provodnik s obzirom na Jouleove gubitke,
- struja i napon duž voda u fazi: nema prenosa reaktivne snage,
- nema refleksije na kraju voda: najpovoljniji način prenosa energije,
- energija električnog i magnetskog polja su jednake: nema njihanja reaktivne energije duž voda.

Prenos prirodne snage postoji kada su kapacitivna i reaktivna snaga voda jednake, te onda pri aktivnom potrošaču nema ni kapacitivnog ni induktivnog pada napona na vodu.

Prenosna snaga kablova je ograničena temperaturom, pa je tzv. termička snaga konvencionalnih kablova znatno ispod njihove prirodne snage. Međutim, kod uljnih kablova direktno hlađenih vodom prenosna snaga se kreće u blizini njihove prirodne snage.

Kod nadzemnih vodova termička snaga je znatno iznad njihove prirodne snage. Međutim, za prenos snage na velike razdaljine, a zbog smanjenja pada napona povoljnije je da se prenosna snaga održava u granicama prirodne snage. Na Slici 7 je data potreba za reaktivnom snagom za nekoliko tipova kablova i nadzemnih vodova u zavisnosti od snage potrošača za $\cos\varphi=1$.



Slika 7: Potreba za reaktivnom snagom vodova u zavisnosti snage potrošača ($\cos\varphi=1$)

- 1-uljni kal $1 \times 500 \text{ mm}^2$, Cu, 110 kV- "Pirelli",
- 2-kabl izolovan umreženim polietilenom $1 \times 1000 \text{ mm}^2$, Al, 110 kV
- 3-nadzemni vod $3 \times 240/40 \text{ mm}^2$, Al/Fe, 110 kV,
- 4-nadzemni vod $2 \times (3 \times 490/65) \text{ mm}^2$, Al/Fe, 400kV.

Kapacitivni karakter nadzemnog voda 400 kV u oblasti malih i srednjih opterećenja, objašnjava se relativno visokim kapacitivnim strujama koje su direktno srazmjerne visokom naponu 400 kV. Nadzemni vodovi srednjeg napona nemaju ni za mala opterećenja kapacitivni karakter, jer iako im je kapacitet veći, kapacitivne struje su im male zbog relativno niskog napona. Kabl izolovan umreženim polietilenom ima manje kapacitivni karakter nego uljni kabl 110 kV. To se objašnjava manjim dielektričnim konstantama umreženog polietilena ($\epsilon_r = 2,3 - 2,5$) od papira u ulju ($\epsilon_r = 3,3 - 3,6$) i većom debljinom izolacije što sve vodi ka manjem kapacitetu ovog tipa kablova.

Kod nekonvencionalnih kablova 110 kV i 400 kV, na primjer kablova čije se površina direktno hladi vodom, prenosne snage više puta su veće nego kod uljnih. U oblasti većih opterećenja ovaj tip kablova ima inuktivni karakter i to utoliko veći ukoliko je niži $\cos\varphi$ potrošača. Međutim pri $\cos\varphi=1$ potrošača kablovi 400 kV imaju kapacitivni karakter za sve snage – skoro isto kao i kablovi 110 kV. Što se tiče dužine kablovskih vodova, za manje dužine kablovi se pri manjim snagama počinju ponašati induktivno.

Kablove i nadzemne vodove treba posmatrati kao elemente mreže koji su postavljeni između generatora i potrošača a spojeni su s njima preko transformatora.

Tako kod budućih mreža, s velikim snagama prenosa, što podrazumijeva primjenu nekonvencionalnih kablova (kablovi hladjeni vodom, SF6 kablovi i dr.), potreba za kapacitivnom snagom biće sve izraženija, jer nadzemni vodovi u oblasti termičke snage imaju induktivni karakter što je slučaj i s transformatorima. Za $\cos\varphi = 0,8 - 0,95$ potrošača, što je realno očekivati kablovi za srednja i viša opterećenja se ponašaju induktivno što sa ukupnog gledišta nije povoljno. Sa gledišta kompezacije inuktivnih reaktivnih snaga u mreži povoljnije je da kablovi rade sa nižim opterećenjima u oblasti kad se ponašaju kapacitivno. Međutim, taj zahtjev je često oprečan sa normalnom težnjom iskorišćenja prenosnih mogućnosti kabla.

Struja zemljospoja

Struja zemljospoja kod kablovskih vodova veća je nekoliko desetina puta nego kod nadzemnih, jer kablovi imaju znatno veći kapacitet. Struja zemljospoja je zavisna od napona, dužine mreže i konstrukcije kabla.

U neuzemljenim mrežama pogodnije su, sto se tiče djelovanja zaštite, veće struje zemljospoja. Kod višežilnih kablova zemljospoj se obično vrlo brzo pretvara u međufazni kratki spoj što vodi ka efikasnom reagovanju relejne zaštite, a što nije slučaj kod nadzemnih vodova.

Električni parametri

Sva četiri električna parametra nadzemnih vodova R , L , G i C , zastupljena su i kod kablova. Razlika u njihovim vrijednostima za nadzemne vodove i kablove istog napona, snage i dužine uzroovana je sljedećim faktorima.

- Za otpornost kabla i nadzemnog voda važi sledeća relacija: $R_k \approx R_v$, što je posljedica činjenice da se za prenos iste snage istim naponom zahteva ista struja. Ista struja zahtjeva istu količinu bakra ili aluminijuma. Zbog otežanog hlađenja, poluprečnik faznog provodnika kabla treba da bude nešto veći od odgovarajućeg kod nadzemnog voda, pa je tako i redna otpornost kabla nešto manja od redne otpornosti nadzemnog voda.

- Za induktivnost kabla i nadzemnog voda važi sljedeća relacija: $L_k \ll L_v$. To je posljedica srazmere induktivnosti i logaritma odnosa međusobnog rastojanja i poluprečnika provodnika. Kod kabla je to rastojanje mnogo manje nego kod nadzemnog voda pa je i induktivnost kabla mnogo manja. Izuzetak čine trofazni kablovi izvedeni u vidu tri monofazna kabla položena paralelno istom trasom.

Za kapacitivnost kabla i voda važi sljedeća relacija: $C_k \gg C_v$. To je posljedica srazmjere kapacitivnosti i logaritma odnosa poluprečnika provodnika i njihovog međusobnog rastojanja. Kod kabla je to rastojanje mnogo manje nego kod nadzemnog voda, pa je i kapacitivnost kabla mnogo veća.

- Odvodnost kabla i voda su posljedice suštinski različitih efekata. Odvodnost kabla čine gubici u dielektriku (definisani tangensom ugla gubitaka - $\text{tg}\delta$), pošto je u pitanju nesavršen kondenzator, a kod voda su u pitanju puzajuće struje i korona.

Celokupno razmatranje o makro-efektima nadzemnih vodova važi i za kablove.

Za kablove važe iste prenosne jednačine kao i T i II ekvivalentne pogonske šeme, naravno sa odgovarajućim vrednostima parametara za kablove.

Životni vijek

Trajanja vodova u pogonu ili tzv. životni vijek je funkcija mehaničkih i električnih osobina pojedinih elemenata voda. Te osobine, uopšte uzeto zavise od niza činilaca: temperature, električnog pražnjenja, mehaničkog naprezanja, prisustva vlage, ozona i kiseonika i dr. Od njihovog inteziteta djelovanja i trajanja zavisi odstupanje od „normalnog” vijeka trajanja.

Životni vijek kabla sa papirom impregnisanim u uljnom kompaundu, tzv. pojasni kabl, na osnovu višegodišnjeg iskustva oko 100 godina – iznosi od 30 do 40 godina, mada su poznati slučajevi pogona ovog tipa kabla i preko 50 godina.

Kod pojasnih (papirnih) kablova, čije električno polje nije radijalno, računa se sa pogonskom jačinom električnog polja ne većom od oko 4,5 kV/mm da bi im se obezbijedio životni vijek od oko

30 do 40 godina. Za termički stabilne kablove (uljni i gasni kablovi) uzima se da podnose 2,5 do 5 puta veću jačinu električnog polja od pogonske. To im omogućava visok stepen pouzdanosti.

Za nadzemne vodove životni vijek se posmatra odvojeno za stubove i provodnike. Za stubove iznosi 50-70 godina, a za provodnike 35 do 50 godina. Međutim, životni vijek nadzemnog voda može se produžiti jer se bez teškoća mogu zamijeniti provodnici i izolatori. Jasno je da kod kablova ovakva mogućnost ne postoji.

Ekonomičnost

Ekonomičnost gradnje jednog voda određuje se tzv. specifičnom investicionom cijenom i izražava se u eurima/kVA x km.

Ovako gledanje ekonomičnosti gradnje vodova ima samo orijentacioni značaj. Za konkretne slučajeve potrebno je posebno razmatranje, vodeći računa o uticaju na ekonomičnost i ostalih pogonskih uređaja i njihove lokacije u mreži: razvodnih postrojenja, transformatora i dr. koji mogu biti drugačije riješeni zavisno da li je u pitanju nadzemni ili kablovski vod. Takođe i dužine trasa vodova po pravilu nisu iste.

Za grube procjene može se uzeti da su nadzemni vodovi jeftiniji oko 10 i više puta od kablovskih. Specifična investiciona cena kablovskih vodova 110 kV prirodno hladjenih je veća oko 15-20 puta od nadzemnog voda. Za više napone taj odnos polako opada tako da je za napon 380 kV, oko 10-20 puta, za napon 750 kV oko 10 puta a za najviše napone na primjer 1150 kV oko 7 puta. Za napon 380 kV najekonomičniji su uljni kablovi s prinudnim hlađenjem vodom, dok su za najviše napone 750 kV i 1150 kV tzv. cijevni kablovi sa gasom SF₆ i kablovi sa prinudnim hlađenjem vodom.

Ukupni troškovi jednog voda pored troškova gradnje uključuju u sebe i troškove održavanja, pogona, gubitaka i dr. i daju se obično za konkretna razmatranja.

Pouzdanost

Pokazatelj pouzdanosti jednog voda je vjerovatnoća da će ispuniti zahtevnu funkciju u posmatranom vremenu i pod određenim uslovima. U ovoj oblasti statističkog praćenja događaja na elektroenergetskim objektima uvodi se nekoliko pojmova:

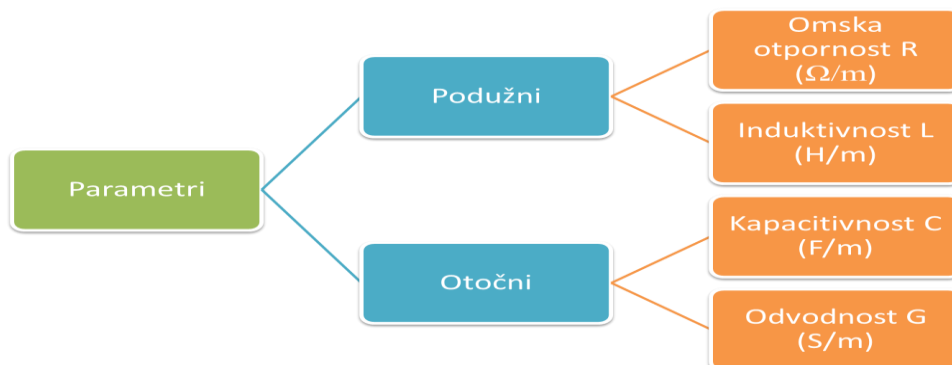
- učestalost kvarova,
- srednje vreme otklanjanja kvarova,
- raspoloživost,
- neraspoločivost i sl.

Učestanost kvarova se definiše kao broj kvarova na km voda tokom jedne godine. Upoređujući kablovske i nadzemne vodove uočava se manja učestanost kvarova kod kablovskih vodova. Osnovni uzrok ovome su atmosferski uticaji kod nadzemnih vodova.

Srednje vrijeme otklanjanja kvarova je veće kod kablova, pri čemu ono umnogome zavisi od konfiguracije mreže. Ako je u mreži obezbijedena rezerva ono je značajno duže nego u mrežama bez rezerve za ispalni kabl. Praksa je obično takva da se deonica u kvaru poslije ispitivanja i lokacije kvara izdvoji iz pogona-mreže, a objekti napoje preko drugih veza. Tako deonica ostaje van pogona znatno duže nego što traje sama popravka. Međutim, ako je opravka kvara hitne prirode (ne postoji mogućnost napajanja preko drugih veza) onda ono traje oko 7 časova (izrada jedne kabl spojnice).

II. ELEKTRIČNI PARAMETRI KABLOVA

Kabal, kao i svaki drugi električni provodnik, ima svoje električne parametre, tj. provodnik pruža otpor prolazu električne energije, izolacija nije savršena pa postoji određena provodnost, javlja se relativno značajni kapacitivni i slabiji induktivni otpor. Otpornost i induktivnost su uzdužni (podužni) parametri, a odvodnost i apacitivnost su poprečni (otočni) parametri (Slika 8).



Slika 8. Pregled električnih parametara kabla

1. ELEKTRIČNI OTPOR PROVODNIKA KABLOVA

Električni otpor (**omska otpornost**, $R[\Omega]$) provodnika kablova zavisi od više faktora. Osim od materijala, dužine i presjeka provodnika, zavisi još od konstrukcije kabla, uslova polaganja kabla kao i od učestanosti struje koju kabal provodi.

Električni otpor provodnika direktno je srazmjeran specifičnom otporu metala od koga je sačinjen provodnik i dužini provodnika, a obrnuto srazmjeran njegovom presjeku.

Otpor provodnika dužine $l[km]$ i punog presjeka $S[mm^2]$ pri jednosmjernoj struji iznosi:

$$R_{-}[\Omega] = R_{1-} l ,$$

$$R_{-}[\Omega] = \frac{1000 \rho_{20} l}{S}$$

gdje su:

$R_{1-}[\Omega/km]$ - jedinični otpor, odnosno otpor po jedinici dužine kabla pri jednosmjernoj struji,

$\rho_{20}[\Omega mm^2 / m]$ - specifični otpor materijala provodnika pri temperaturi $20^{\circ}C$.

U Tabeli 1 su date vrijednosti specifičnog otpora za bakar i aluminijum, po međunarodnim standardima

Tabela 1. Vrijednosti specifičnog otpora

Materijal	$\rho_{20}[\Omega mm^2 / m]$
Bakar	0.017241
Aluminijum	0.028264

Kod provodnika sastavljenih od više žica sa površinskom obradom (prevlaka sa slojem drugog metala), treba u proračunu uzeti u obzir uticaj prevlake kao i činjenice da su stvarne dužine žica u provodniku zbog pužavanja veće od dužine provodnika i da su dužine provodnika kabla veće od dužine kabla zbog pužavanja žila unutar kabla.

Uzimajući u obzir ove činjenice jedinični otpor višežičnih provodnika kabla pri jednosmjernoj struji ($R_{1-} [\Omega/km]$) računamo preko izraza:

$$R_{1-} = \frac{1000 \rho_{20} K_1 K_2 K_3}{n S_1} [\Omega/km],$$

odnosno:

$$R_{1-} = \frac{1000 \rho_{20} K_1 K_2 K_3}{n \frac{d^2 \pi}{4}} [\Omega/km],$$

ili:

$$R_{1-} = 1,273 \frac{\rho_{20} K_1 K_2 K_3}{n d^2} [\Omega/m],$$

gdje su:

K_1 - faktor povećanja otpora zavisno od prečnika žice i vrste materijala provodnika i prevlake,

K_2 - faktor povećanja otpora uslijed pouzavanja žica u provodniku,

K_3 - faktor povećanja otpora zbog pouzavanja žila u kablju,

$S_1 [mm^2]$ - presjek žice od kojih je formiran provodnik,

n - broj žica u provodniku,

$d [mm]$ - prečnik jedne žice.

Vrijednost koeficijenata (faktora) K_1 , K_2 , K_3 iznose (JUS N.CO.015/1976), u zavisnosti od prečnika žice, klase pouzštenosti, tipa (jednožilni, višežilni) i savitljivosti kabla,:

K_1 od 1.02 do 1.12,

K_2 od 1.0 (puni-jednožični provodnici) do 1.04 (za pouzštene višežične provodnike, kada prečnik žice nije veći od 0,6mm,)

K_3 od 1.0 (za jednožilne kablove i za višežilne kablove sa paralelnim žilama) do 1.05 (za kablove sa pouzštenim žilama).

Predhodni izrazi daju otpor kabla na temperaturi $20^\circ C$.

Uticao temperature na otpor kabla

Otpor provodnika zavisi od temperature provodnika. Podaci za specifični otpor provodnika daju se najčešće za temperaturu $20^\circ C$. Ako je temperatura provodnika različita od $20^\circ C$ pri proračunu otpora treba to uzeti u obzir. Vrijednost otpora na temperaturi $\theta [^\circ C]$ je:

$$R_{\theta-} [\Omega] = R_{20-} (1 + \alpha_{20} \Delta \theta),$$

odnosno, za kablove sa višežičnim provodnicima:

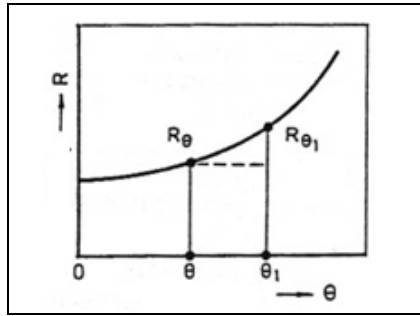
$$R_{\theta-} [\Omega] = \frac{1000 \rho_{20} K_1 K_2 K_3}{n S_1} (1 + \alpha_{20} \Delta \theta),$$

gdje su:

$\alpha_{20} [1/^\circ C]$ - temperaturni koeficijent otpora pri temperaturi $20^\circ C$,

$\Delta \theta$ - razlika između temperatura θ i $20^\circ C$.

Električni otpor provodnika povećava se kad temperatura raste (Slika 9).

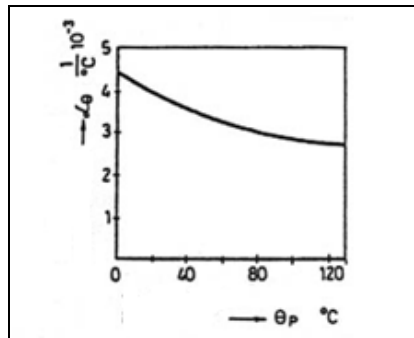


Slika 9. Promjena otpora provodnika kabla sa temperaturom

Temperaturni koeficijent otpora α_θ provodnika na temperaturi θ definiše se kao odnos promjene otpora na toj temperaturi i otpora R_θ :

$$\alpha_\theta = \frac{1}{R_\theta} \left(\frac{dR}{d\theta} \right)_\theta$$

Temperaturni koeficijent zavisi takođe od temperature (Slika 10).



Slika 10. Promjena temperaturnog koeficijenta otpora sa temperaturom (Cu)

Za bakarne provodnike je $\alpha_\theta = \frac{1}{235,5 + \theta}$, a za aluminijumske provodnike $\alpha_\theta = \frac{1}{228 + \theta}$.

U tabeli su date vrijednosti temperaturnog koeficijenta za 20°C i 0°C.

Tabela 2: Temperaturni koeficijent otpora [1/°C]

Materijal	α	
	za 0°C	za 20°C
Bakar	$4.26 \cdot 10^{-3}$	$3.39 \cdot 10^{-3}$
Aluminijum	$4.38 \cdot 10^{-3}$	$4.03 \cdot 10^{-3}$

Pri tehničkim proračunima, dovoljno je tačno računati sa temperaturnim koeficijentom otpora za 20°C, odnosno važe predhodno dati izrazi za promjenu otpora sa promjenom temperature.

Otpor kabla pri naizmjeničnoj struji.

Povećanje otpora provodnika kablova pri proticanju naizmjenične struje ($\Delta R_s [\Omega]$) uslovljeno je:

- Povećanjem otpora provodnika uslijed skin efekta ($\Delta R_s [\Omega]$);
- Povećanje otpora provodnika zbog djelovanja efekta blizine ($\Delta R_b [\Omega]$);
- Povećanje otpora provodnika kabla zbog gubitaka u zaštitnim metalnim konstrukcijama kabla ($\Delta R_m [\Omega]$):

$$\Delta R_{\sim} = \Delta R_s + \Delta R_b + \Delta R_m .$$

„**Skin**“ **efekat** u provodniku se objašnjava djelovanjem sopstvenog magnetnog polja unutar provodnika. Nastale indukovane struje u provodniku potiskuju struju u provodniku od središta ka periferiji provodnika. Zbog toga gustina struje opada ka središtu provodnika.

Zbog djelovanja skin efekta gustina struje nije jednaka po cijelom presjeku provodnika, nego se povećava od centra prema periferiji, tj. prema površini provodnika. Takav raspored struje povećava otpor provodnika, a time i gubitke energije u provodniku.

Uticaj skin efekta na povećanje otpora zavisi od:

- presjeka provodnika (veći je kod provodnika većeg presjeka),
- permeabilnosti materijala provodnika (već je kod materijala sa većim permeabilitetom),
- specifičnim otporom materijala (manji je kod materijala sa većim specifičnim otporom),
- frekvenciji naizmjenične struje (veći je pri većoj frekvenciji).

Efekat blizine

Struje koje teku u dva provodnika međusobno će uticati jedna na drugu tako da će se poremetiti centralno simetrični raspored gustina struje po presjeku provodnika. Težište struje udaljava se od težišta presjeka provodnika, više što su provodnici bliži. Ovakav raspored struje u provodniku uzrokuje povećanje otpora provodnika.

Uticaj efekta blizine na povećanje otpora zavisi od:

- spoljašnjeg prečnika provodnika (veći je kod provodnika većeg prečnika)
- razmaka među osama provodnika (manji je pri većem razmaku)
- specifičnog otpora materijala provodnika (manji je kod materijala sa većim specifičnim otporom)
- frekvenciji naizmjenične struje (veći je pri većoj frekvenciji)...

Povećanje otpora provodnika zbog gubitaka u okolnim metalnim djelovima kabla (metalni omotač i metalna mehanička zaštita-armatura kabla) uslovljeno je gubicima koji su rezultat indukovanih (cirkulacionih) struja, vrtložnih struja i histerezisa. Gubici u metalnom omotaču (olovo, aluminijum) uzrokovani su međusobnim induktivnim dejstvom kola provodnika i kola i kola metalnog omotača kabla. Čine ih gubici prouzrokovani cirkulacionom strujom i vrtložnim strujama. Gubitke u metalnoj (čeličnoj) mehaničkoj zaštiti uzrokuju vrtložne struje i histerezis koji se javljaju usljed dejstva magnetskog polja na čeličnu zaštitu kabla.

Efekat povećanja otpora zbog gubitaka u okolnim metalnim djelovima je kod energetskih kablova praktično zanemarljiv, ali ga ipak u nekim slučajevima i uslovima treba uračunati. Kod trožilnih i četvorozilnih kablova u trofaznim sistemima naizmjenične struje taj uticaj praktično ne postoji ukoliko su sve žile obavijene jedni metalnim plaštom. Nešto jači uticaj javlja se kod jednožilnih kablova ili kablova kod kojih je svaka žila obavijena jednim metalnim plaštom.

Kod telekomunikacionih kablova ovaj efekat se pri određenim proračuna mora uračunati.

2. INDUKTIVNOST KABLOVA

Svaka promjena struje u provodniku indukuje u njemu napon suprotnog smjera, što se može shvatiti kao opiranje provodnika promjeni struje. Karakteristika provodnika koja uzrokuje ovo opiranje naziva se induktivnost.

Intenzitet tog otpora, odnosno vrijednost induktiviteta, zavisi od više faktora i može se odgovarajućim izrazima za konkretne skućajeve konstrukcije kablova izračunati. Međutim, kod kablova se najčešće koriste izmjerene vrijednosti koje daju proizvođači kablova ili podaci iz odgovarajućih priručnika.

Za proračun induktiviteta kablova možemo upotrijebiti iste metode kao kod proračuna induktivnosti nadzemnih vodova, pri čemu predpostavljamo da je magnetska permeabilnost izolacije

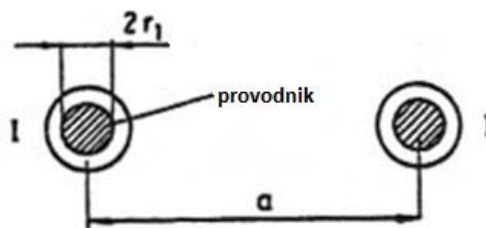
oko provodnika jednaka permeabilnosti vakuuma. Kod kablova međutim imamo metalni plašt u kojem uopšteno može teći neka struja.

Jedinična induktivnost $L_1[H/km]$ stvara jedinični **induktivni otpor kabla** ($X_1[\Omega/km]$):

$$X_1 = \omega L_1 = 2\pi f L_1.$$

Induktivnost dvožičnog voda (kabela), uopšte gledano sastoji se od dvije induktivnosti: unutrašnje (L_U) i spoljašnje (L_S): $L = L_U + L_S$.

Magnetna induktivnost unutrašnjosti provodnika sastoji se iz geometrijskog zbira indukcije koju stvara sama struja u provodniku i indukcije koju stvara u njemu struja drugog provodnika. Ova druga indukcija se obično zanemaruje. Spoljašnja induktivnost obuhvata prostor između oba provodnika na rastojanju a (Slika 11) uzimajući uticaj obje struje.



Slika 11: Dvožilni kabl

Induktivnost punog, okruglog i neograničeno dugog provodnika iznosi:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} l \left(\frac{\mu_r}{4} + \ln \frac{a}{r_1} \right) [H]$$

gdje su:

$\mu_0 = 4 \pi 10^{-4} H/km$ - permeabilitet slobodnog prostora,

$l[km]$ - dužina posmatranog voda,

$a[mm]$ - osno rastojanje provodnika,

$r_1[mm]$ - poluprečnik provodnika.

Relativni permeabilitet μ_r je jednak 1 za sve nemagnetne materijale i sredinu u kojoj se nalaze kablovi. Pri ovome se uzima da je metalni omotač kabla neuzemljen kako bi se izbjeglo njegovo dejstvo kao sekundarnog kola.

Jedinična ili podužna induktivnost, odnosno induktivnost po jedinici dužine za jedan provodnik kabla iznosi:

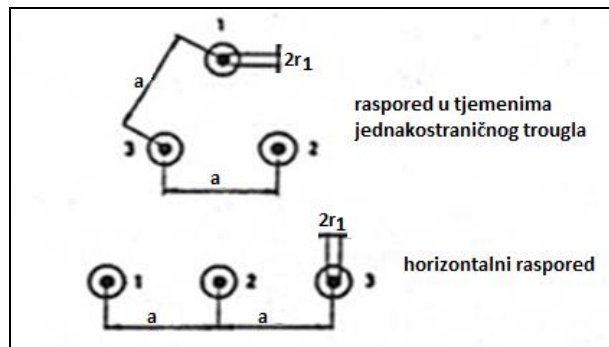
$$L_1 = 0.2 \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{a}{r_1} \right) \left[\frac{mH}{km} \right]$$

Podužna induktivnost za tri jednožilna kabla raspoređena u tjemenu jednakostraničnog trougla (slika 12) određena je predhodnim izrazom.

Za horizontalni raspored kablova (raspored u ravni – slika 12) srednja podužna induktivnost određena je izrazom:

$$L_1 = 0.2 \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{a_{SR}}{r_1} \right) \left[\frac{mH}{km} \right],$$

gdje je: $a_{SR} = \sqrt[3]{2}a$ - međusobna srednja geometrijska udaljenost kablova.



Slika 12: Raspored jednožilnih kablova

Ako je omotač jednožilnog kabla uzemljen na oba kraja onda se u procese uključuje sopstvena induktivnost kola metalnog omotača i međusobna induktivnost dva kola: kola provodnika i kola metalnih omotača.

3. KAPACITET KABLOVA

Jedinični kapacitet jednožilnog kabla (slika) sa metalnim omotačem dat je izrazom:

$$C_1 = \frac{5.55 \cdot \epsilon_r \cdot 10^{-2} \left[\frac{\mu F}{km} \right]}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

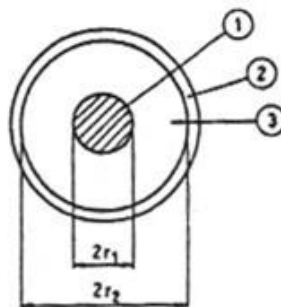
gdje je:

C_1 - jedinični kapacitet u $\left[\frac{\mu F}{km} \right]$;

r_1 - unutrašnji poluprečnik dielektrika;

r_2 - spoljašnji poluprečnik dielektrika u istoj jedinici kao r_1 ;

ϵ_r - relativna dielektrična konstanta dielektrika.



Slika 12: Jednožilni kabl

1- provodni, 2- metalni omotač, 3- izolacija(dielektrik),

Tabela3. Relativna dielektrična konstanta ϵ_r za 20°C i 50 Hz

Izolacioni materijal	ϵ_r
Papir	2.3
Papir impregnisan u uljnom kompaundu	2.5-4
Polivinilhlorid (PVC)	3-4 (pri 20 °C)
Polietilen (PE)	2.3-2.4
Umreženi polietilen (UPE)	2.3-2.5
Etilen propilen(EPR)	2.7-3.2

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 = \epsilon_r \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} F / m$$

Dielektrična konstanta impregnisanog papira, PE i UPE može se uzeti da se praktično ne mijenja sa temperaturom. Međutim, to se ne može reći za PVC čija se dielektrična konstanta znatno mijenja sa temperaturom. Tako za radnu temperaturu relativna dielektrična konstanta PVC iznosi 8.

Za trožilne kablove (sl. 3.11) jedinični kapacitet dat je izrazom:

$$C_1 = \frac{0.11 \varepsilon_r}{\ln \frac{a^2(3r_2^2 - a^2)^3}{r_1^2(27r_2^2 - a^6)}} \left[\frac{\mu F}{km} \right]$$

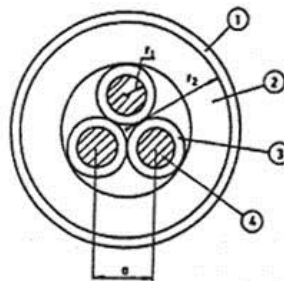
gdje su:

a - osno rastojanje žila u mm,

r_1 - poluprečnik provodnika u mm,

r_2 - unutrašnji poluprečnik metalnog omotača u mm.

Za proračun kapaciteta trožilnih kabalova daju se i empirijski približni izrazi.



Сл. 3.11. Трожилни кабл
1 - метални омотач; 2 - диелектрик (појасна изолација); 3 - диелектрик жила;
4 - проводник

Međutim, zbog nehomogene izolacije trožilnih pojasnih kablova i kablova sličnih konstrukcija mogu se pri proračunu dobiti veća odstupanja. Stoga se kapacitet kablova određuje mjerenjem pojedinačnih – kapaciteta kablova.

Uopšteno gledano **kapacitet:**

- **raste sa presjekom provodnika,**
- **opada a sa povećanjem debljine izolacijeodnosno s porastom nazivnog napona**

Kablovi izolacije sa UPE imaju znatno manji kapacitet nego kablovi sa impregniranim papirom.

Struja punjenja kabla, po jedinici dužine, je srazmjerna pogonskom kapacitetu i glasi:

$$I_p = V C_1 \omega 10^{-3} \left[\frac{A}{km} \right]$$

gdje su: C_1 - jedinični pogonski kapacitet u $\mu F/km$,

V - fazni napon u kV,

$\omega = 2\pi f$ - kružna učestanost

f - učestanost u Hz .

Struja punjenja za kabl izolovan umreženim poletilenom XHP 48 A 1x800/95, 64/110 kV iznosi oko 5 A/km. Za dužinu kabla od 20 km ukupna struja punjenja iznosi 100 A ili skoro 15% dozvoljenog strujnog opterećenja kabla.

Struja punjenja kabla izolovanog impregnisanim papirom IPO 13 3x95mm², 10 kV iznosi svega oko 0,80 A/km.

Impedansa kabla

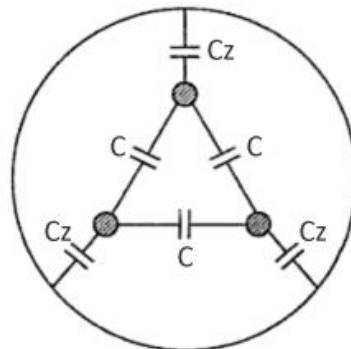
Impedansa kabla je veličina koja se može izračunati po izrazu:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

- gde suje: Z – jedinična impedansa [Ω/km],
 R – jedinični otpor provodnika [Ω/km],
 ω – kružna frekvencija [1/s],
 L – jedinični induktivitet kabla [mH/km].

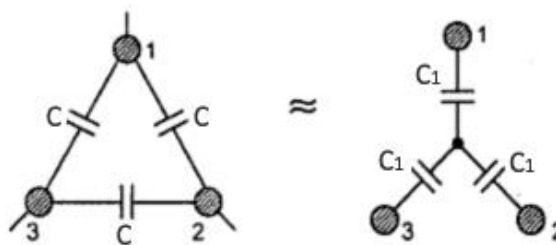
Kapacitivnost kablova (pogonska kapacitivnost), se u principu sastoji iz djelimičnih kapacitivnosti: kapaciteta između provodnika (C) i kapaciteta između provodnika i zemlje (C_z) (slika).

Za trofazni (pojasne) kablove sa zajedničkim plaštom, djelimične kapacitivnosti su prikazane na slici 7b:



Slika 7b: Djelimični kapaciteti trožilnog kabla

Kapaciteti C vezani u trougao transformišu se u zvijezdu (slika 7c).



Slika 7c: Prikaz kapaciteta C transformisanog iz trougla u zvijezdu

Transformisan u zvijezdu kapacitet će biti:

$$C_1 = 3C \tag{1}$$

Ovom transformacijom i rednom vezom sa C_Z kapacitetom dobija se pogonski kapacitet trožilnog kabla:

$$C_P = C_Z + C_1 = C_Z + 3C \quad (2)$$

Veličine C i C_Z kapaciteta zavise od tipa, konstrukcije i načina polaganja kablova. Na slici su prikazana tri karakteristična tipa kablova i njihove djelimične kapacitivnosti C i C_Z . To su:

a. **Trožilni kabl sa zajedničkim zaštitnim omotačem** (slika 7d-a)

Kod njega postoji kapacitivna sprega između samih provodnika i provodnika i metalnog omotača, pa je podužna kapacitivnost kao i kod vazdušnih vodova:

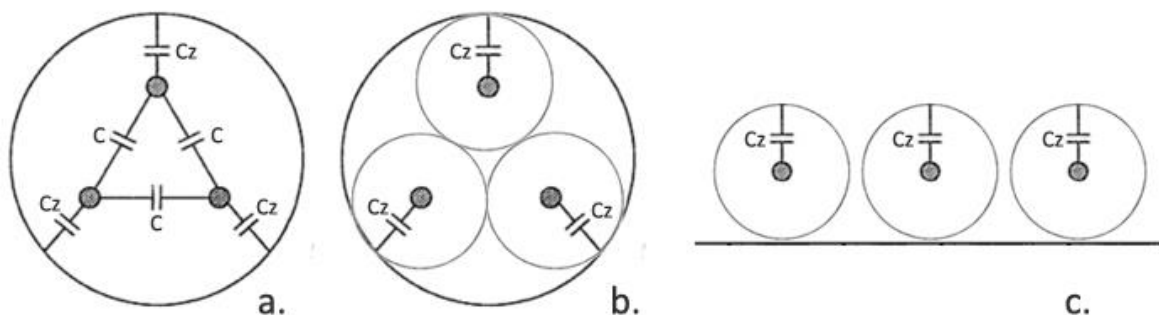
$$C_1 = C_Z + 3C$$

b. Trožilni kabl sa papirnom izolacijom i uljem pod pritiskom (H-kabl) sa individualnim i zaštitnim omotačem (slika 7d-b)

Ovdje ne postoji kapacitivna sprega između provodnika, pa je:

$$C = 0, C_1 = C_Z$$

c. Tri jednožilna kabla postavljena u istoj ravni (slika 7d-c)



Slika 7d: Šematski prikaz djelimičnih kapaciteta sa tri različita tipa kablova

a. Trožilni kabl sa zajedničkim zaštitnim omotačem; b. Trožilni H-kabl sa individualnim i zajedničkim zaštitnim omotačem; c. Tri jednožilna kabla postavljena u istoj ravni

Struja punjenja kabla

Usljed kapacitivnosti kabla, javlja se kapacitivna struja kabla ili struja punjenja. Ona je srazmjerna pogonskom kapacitetu i glasi:

$$I_{1P} \left[\frac{A}{km} \right] = \frac{U}{\sqrt{3}} B_1 = \frac{U}{\sqrt{3}} C_{1P} \omega 10^{-3}$$

gdje su:

C_{1P} - jedinični pogonski kapacitet u $[\mu F / km]$,

U - linijski napon u $[kV]$,

$\omega = 2\pi f$ - kružna učestanost,

f - učestanost u $[Hz]$.

Struja zemljospoja (struja koja otiče u zemlju kroz kapacitete između provodnika i omotača - C_{1z}) iznosi:

$$I_{1z} \left[\frac{A}{km} \right] = \sqrt{3} U C_{1z} \omega 10^{-3}$$

dok je **snaga punjenja tj. reaktivna snaga koju proizvodi kabl data izrazom:**

$$Q_c \left[\frac{kVar}{km} \right] = \sqrt{3} U I_{1p}$$

Za kablove je karakteristično da im je kapacitet puno veći od induktiviteta, tako da oni uglavnom proizvode reaktivnu snagu.

Struja punjenja za kabl izolovan umreženim polietilenom XHP 48-A 1x800/95 mm², 110 kV iznosi oko 5 A/km. Za dužinu kabla od 20 km ukupna struja punjenja iznosi 100 A ili skoro 15% dozvoljenog strujnog opterećenja kabla. Struja punjenja kabla izolovanog impregniranim papirom IPO13 3x95 mm², 10 kV iznosi svega oko 0.8 A/km.

U tabeli su date vrijednosti kapacitivnosti, kapacitivnih i struja zemljospoja trožilnih kablova za različite poprečne presjeke i nazivne napone 10 kV i 35 kV.

Tabela: Vrijednosti kapacitivnosti, kapacitivnih i struja zemljospoja trožilnih kablova za različite poprečne presjeke i nazivne napone 10 kV i 35 kV

Poprečni presjek [mm ²]	Pogonski napon 10 kV			Pogonski napon 35 kV		
	C_{1p} [μF/km]	I_p [A/km]	I_z [A/km]	C_{1p} [μF/km]	I_p [A/km]	I_z [A/km]
3x95	0.48	0.87	2.6	0.295	1.60	4.80
3x120	0.53	0.96	2.88	0.32	1.74	5.22
3x150	0.58	1.05	3.15	0.345	1.88	5.65
3x185	0.635	1.15	3.45	0.37	2.02	6.05
3x240	0.715	1.30	3.90	0.41	2.23	6.70
3x300	0.79	1.43	4.30	0.45	2.45	7.35

ZADACI

1. Odrediti kapacitivnost jednožilnog kabla XHP 48-A 1x150/25 mm², 35 kV, dužine 5 km, ako je $\epsilon_r = 2.5$, spoljašnji poluprečnik kabla $r_2 = 21.5mm$ a unutrašnji poluprečnik $r_1 = 7.5mm$. Učestanost mreže je 50Hz.

Koristeći izraz $C_1 \left[\frac{\mu F}{km} \right] = \frac{5.56 \epsilon_r}{\ln \frac{r_2}{r_1}} 10^{-2}$ možemo odrediti podužnu kapacitivnost kabla. Tada je

$$C_1 = \frac{5.56 \cdot 2.5}{\ln \frac{21.5}{7.5}} 10^{-2} = \frac{13.9}{1.053 \cdot 100} = \frac{13.9}{105.3} = 0.132 \left[\frac{\mu F}{km} \right].$$

Ukupna kapacitivnost kabla će onda biti

$$C = 0.132 \cdot 5 = 0.66 [\mu F].$$

2. Za kabl iz zadatka 1. odrediti struju punjenja.

Iz izraza $I_{1P} \left[\frac{A}{km} \right] = \frac{U}{\sqrt{3}} C_{1P} \omega 10^{-3}$ se može odrediti struja punjenja.

Slijedi da je $I_{1P} = \frac{35 \cdot 0.132 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50}{1000 \cdot \sqrt{3}} = 0.84 \left[\frac{A}{km} \right]$. Struja punjenja za dužinu kabla od 5 km će iznositi 4.2 A .

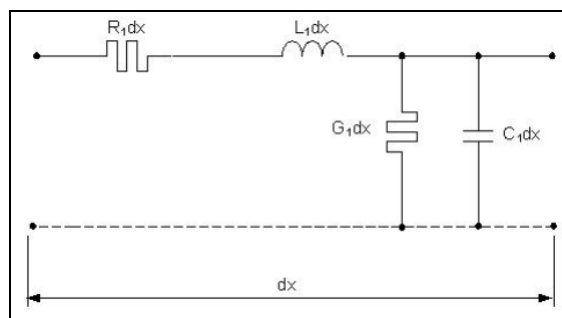
4. ŠEME I ELEKTRIČNI PRORAČUN KABLOVA

Parametri kabla navode se po jedinici dužine, u praksi najčešće po jednom kilometru (1 km) i po jednoj fazi. Ako drugačije nije naznačeno radi se o parametrima za direktni (pozitivni) sistem simetričnog voda.

Jedinični parametri kabla su:

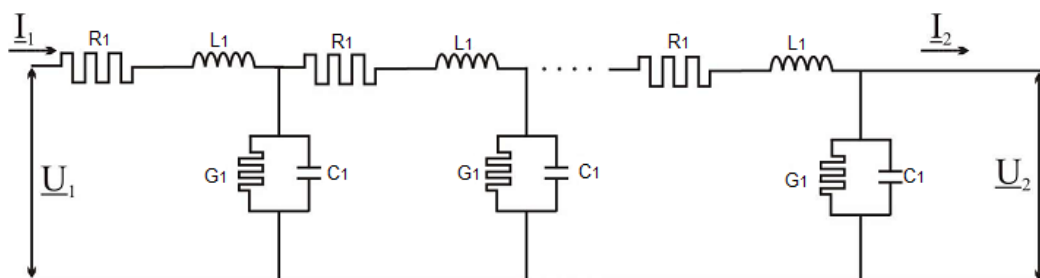
- R_l [Ω/km] - jedinična aktivna otpornost,
- L_l [H/km] - jedinična induktivnost,
- C_l [F/km] - jedinična kapacitivnost,
- G_l [S/km] - jedinična odvodnost kabla.

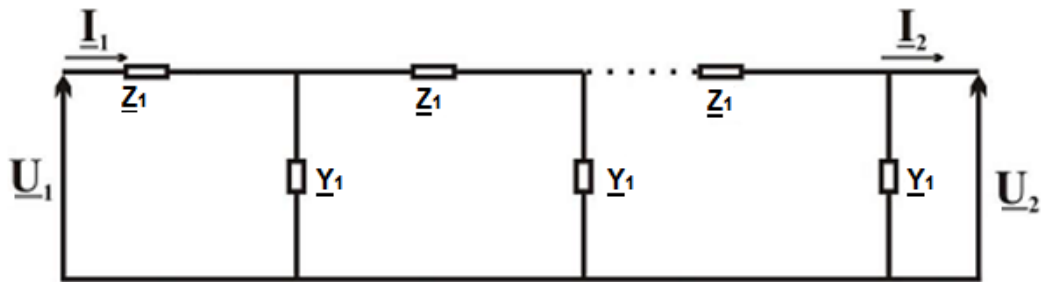
Prolazom struje kroz otpor i odvod nastaju toplini gubici, pa parametre dijelimo na parametre sa gubicima (topli parametri) i parametre bez gubitaka (hladni parametri). Sva četiri parametra su raspoređena kontinualno duž voda, tj. proizvoljno mali dio voda sadrži sva 4 parametra. Položaj pojedinih parametara na elementarnoj dionici jedne faze simetričnog trofaznog kabla prikazan je na slici xx.



Slika xx: Jednofazni prikaz elementarne dionice kabla, dužine dx

U električnim proračunima kabal se posmatra kao element sa raspodjeljenim parametrima (slika xx i xx).

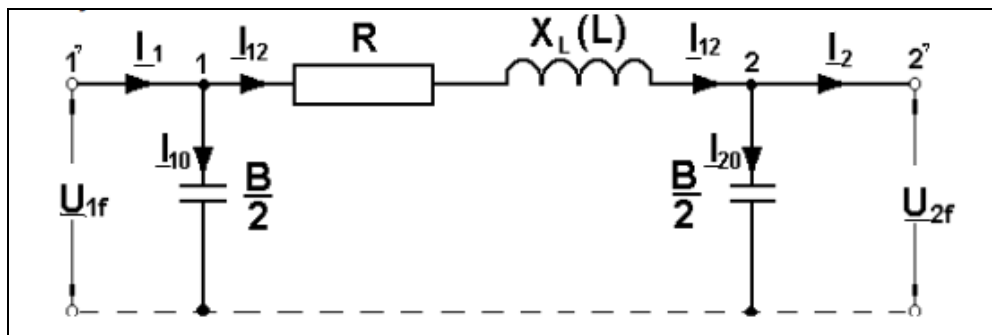




Slika xx: Kabel kao element sa raspodjeljenim parametrima

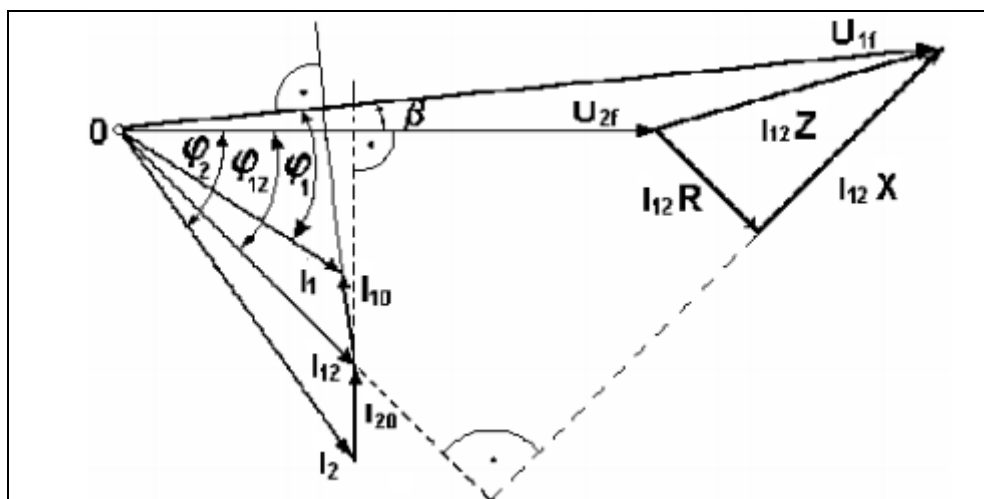
gdje su: $Z_1 = R_1 + jX_1 = R_1 + j\omega L_1$ - jedinična uzdužna impedansa kabla u $[\Omega/\text{km}]$,
 $Y_1 = G_1 + jB_1 = G_1 + j\omega C_1$ - jedinična poprečna admitansa kabla u $[\text{S}/\text{km}]$.

Zamjenska Π šema kabla



U zamjenskoj Π šemi kao uzdužni parametri figurišu otpornost i induktivnost kabla. Kao poprečni parametar prikazana je samo kapacitivnost ($1/2$ vrijednosti, koncentrisane na kraju i na početku), dok je poprečna odvodnost kroz izolaciju i zaštitne elemente kabla zanemarena.

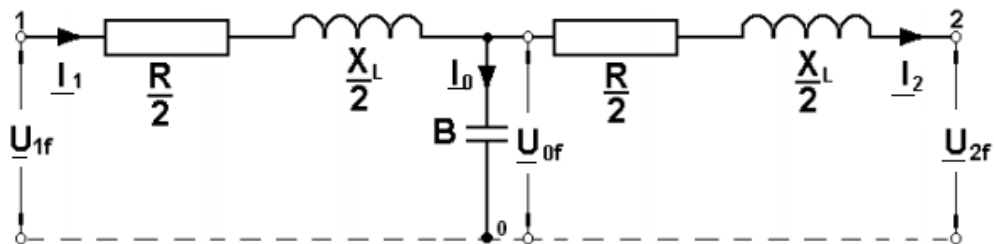
Vektorski dijagram struja i napona kabla datog Π zamjenskom šemom, kada su poznate električne veličine na kraju kabla, dat je na sljedećoj slici.



Prvo crtamo fazni napon na kraju kabla U_{2f} , koji leži na pozitivnoj realnoj osi (on nam je referentni vektor po faznoj osi) i struju na kraju voda I_2 , koja zaostaje za faznim naponom na kraju voda U_{2f} za ugao φ_2 (induktivno opterećenje). Kapacitivnu struju na kraju voda I_{20} je normalna na vektor faznog napna U_{2f} i dodajemo je na vrh vektora struje I_2 . Spajanjem koordinatnog početka sa

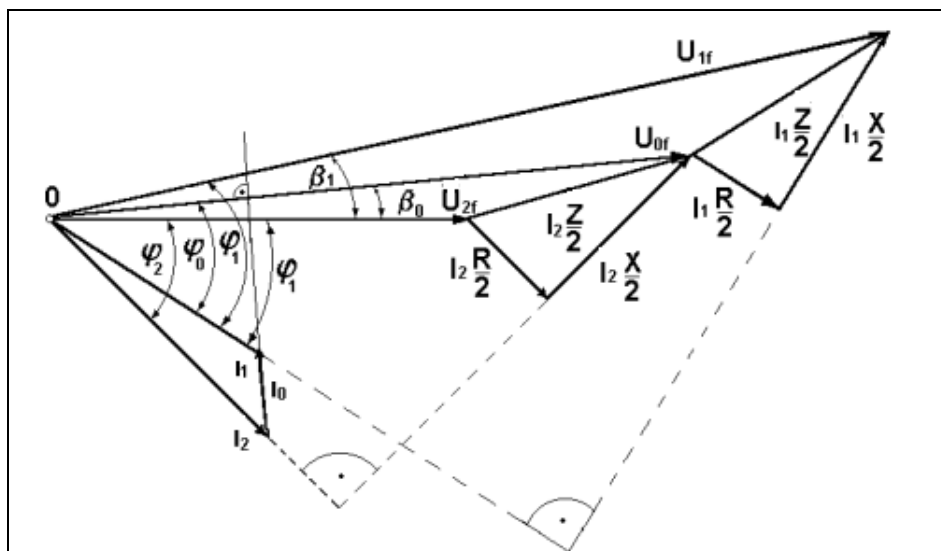
vrhom vektora struje I_{20} dobijamo struju između tačaka 1 i 2, tj. struju I_{12} , koja zaostaje za faznim naponom U_{2f} za ugao φ_{12} . U fazi sa strujom I_{12} , crtamo omski pad napona na omskom otporu ($I_{12} R$), nanoseći ga na vrh vektora U_{2f} , i dodajemo induktivni pad napona na kablju ($I_{12} X$) koji prednjači struji I_{12} za 90° . Spajanjem koordinatnog početka sa vrhom vektora $I_{12} X$ (odnosno vektora $I_{12} Z$, koji predstavlja pad napona na uzdužnoj impedansi kablja) dobijamo fazni napon na početku voda U_{1f} . Struju kroz kapacitivnu provodnost na početku voda I_{10} naneseemo na vrh struje I_{12} , normalno na vektor faznog napona na početku voda U_{1f} . Spajanjem koordinatnog početka sa vrhom vektora struje I_{10} dobijamo vektor struje na početku voda I_1 .

Zamjenska T šema kablja



U zamjenskoj T šemi kao uzdužni parametri figurišu otpornost i induktivnost kablja (1/2 vrijednosti, koncentrisane na kraju i početku). Kao poprečni parametar prikazana je samo kapacitivnost, dok je poprečna odvodnost kroz izolaciju i zaštitne elemente kablja zanemarena.

Vektorski dijagram struja i napona kablja ekvivalentiranog T zamjenskom šemom, kada su poznate električne veličine na kraju kablja, dat je na sljedećoj slici.



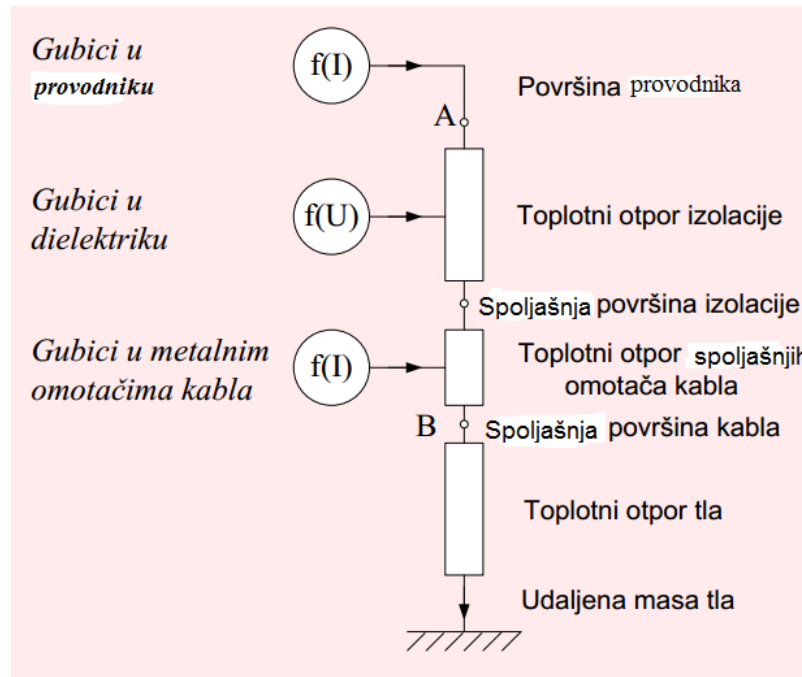
Prvo crtamo fazni napon na kraju kablja U_{2f} , koji leži na pozitivnoj realnoj osi (on nam je referentni vektor po faznoj osi) i struju na kraju voda I_2 , koja zaostaje za faznim naponom na kraju voda U_{2f} za ugao φ_2 (induktivno opterećenje). Naponu na kraju kablja U_{2f} dodajemo omski pad napona na polovini otpora $I_2 R/2$, koji je u fazi sa strujom na kraju kablja I_2 i induktivni pad napona na polovini induktivnog otpora $I_2 X/2$, koji prednjači struji I_2 za 90° . Vektorski zbir ove dvije komponente pada napona, čini ukupni pad napona na polovini uzdužne impedanse kablja $I_2 Z/2$, koncentrisane na kraju kablja. Spajanjem koordinatnog početka sa vrhom vektora $I_2 X/2$, odnosno vektora $I_2 Z/2$, dobija se fazni napon na sredini kablja U_{of} , a koji prednjači faznom naponu na kraju

kabla U_{2f} za ugao β_0 . Kapacitivnu struju na sredini kabla I_0 , koja prednjači faznom naponu na sredini voda U_{0f} za 90° (normalna je na ovaj napon), sabrana sa strujom na kraju voda daje struju na početku voda I_1 . Dakle, spajanjem koordinatnog početka sa vrhom vektora struje I_0 dobili smo struju na početku voda I_1 , koja zaostaje za faznim naponom na kraju voda U_{2f} , za ugao φ_2 . Vektorski zbir omskog pada napona na polovini otpora $I_1 R/2$, koji je u fazi sa strujom na početku kabla I_1 i induktivnog pada napona na polovini induktivnog otpora $I_1 X/2$, koji prednjači struji I_1 za 90° , čini ukupni pad napona na polovinu uzdužne impedanse kabla $I_1 Z/2$, koncentrisane na početku kabla. Spajanjem koordinatnog početka sa vrhom vektora $I_1 X/2$, odnosno vektora $I_1 Z/2$, dobija se fazni napon na početku kabla U_{1f} , a koji prednjači faznom naponu na kraju kabla U_{2f} za ugao β_1 .

III. GUBICI U ELEKTROENERGETSKIM KABLOVIMA

Gubici u kابلu po uzroku nastanka dijele se na:

- gubici uslijed napona (P_{diel}),
- gubici uslijed struje (P_{Cu}).



1. Gubici uslijed struje

Gubici uslijed struje (P_{Cu}) su:

- Gubici u provodnicima,
- Gubici u metalnim omotačima,
- Gubici u metalnoj mehaničkoj zaštiti kabela

Kretanjem električnih naelektrisanja (proticanjem struje) kroz provodnu sredinu (provodnik, metalni omotači i zaštita kabela), pod dejstvom električnog polja, dio kinetičke energije se usled sudara sa česticama metala pretvara u toplotu koja predstavlja gubitak.

Električni gubici u provodniku kabela su strujno zavisni (za razliku od dielektričnih gubitaka) i u trofaznom sistemu oni iznose (po jedinici dužine):

$$P_p [W / m] = 3R_{1\sim} I^2$$

gdje su: $R_{1\sim} [\Omega / m]$ - podužni naizmjenični električni otpor provodnika,
 $I [A]$ - struja koja protiče kroz provodnik.

Gubici u provodniku zavise od:

- materijala provodnika (Cu ili Al),
- poprečnog presjeka provodnika,
- oblika i izrade,
- konstrukcije kabela,

- osnovno rastojanje žila kabla i načina polaganja (u ravni ili u obliku “djeteline”- za jednožilne kablove).

Naizmjenični električni otpor provodnika čine jednosmjerni otpor i dodatni otpor uzrokovan proticanjem naizmjenične struje:

$$R_{\sim} = R_{\sim} (1 + y_s + y_b)$$

Za izračunavanje **ukupnih gubitaka zavisnih od opterećenja** koristi se tzv. **efektivni otpor**. Efektivni električni otpor predstavlja **uvećani naizmjenični otpor provodnika za toplotne procese u metalnom omotaču kabla i metalnoj mehaničkoj zaštiti kabla**. Toplotni proces u kablu se prikazuje kao da se cjelokupna toplota razvija u provodniku. Efektivni električni otpor uzima u obzir indukovane struje (u omotaču kabla koji je uzemljen), a takođe i vrtložne struje i histerezis u metalnom omotaču i metalnoj mehaničkoj zaštiti kabla. Izraz za efektivni električni otpor glasi:

$$R_{ef} = R_{\sim} (1 + \lambda_o + \lambda_M)$$

gdje su:

- R_{\sim} - jednosmjerni električni otpor,
- y_s - faktor “skin” efekta,
- y_b - faktor blizine provodnika,
- λ_o - faktor gubitaka u metalnom omotaču kabla,
- λ_M - faktor gubitaka u metalnoj mehaničkoj zaštiti kabla.

Faktor „skin“ efekta y_s zavisi od:

materijala od koga je napravljen provodnik (specifične otpornosti),
kvadrata frekvencije,
presjeka provodnika,
načina izrade i tipa provodnika (orugli, sektorski, puni, višezični).

„Skin“ efekat u provodniku se objašnjava djelovanjem sopstvenog magnetnog polja unutar provodnika. Nastale indukovane struje u provodniku potiskuju struju od središta ka periferiji provodnika. Zbog toga gustina struje opada ka središtu provodnika.

Faktor blizine y_b takođe zavisi od kvadrata frekvencije, prečnika provodnika (presjeka) i **osnovno rastojanja provodnika**. Efekat blizine nastaje usled magnetnog dejstva paralelnih provodnika. Zbog međusobnog uticaja provodnika, gustina struje opada od jedne strane provodnika ka drugoj. Uticaj ovog faktora praktično je mali naročito kod visokonaponskih kablova gdje su osnovno rastojanja između kablova veća.

Gubici usled “skin” efekta i usled blizine mogu se znatno smanjiti primjenom specijalno oblikovanih i izvedenih provodnika. Kod ovih konstrukcija se odnos naizmjeničnog i jednosmjernog otpora može svesti na 1.05, u odnosu na standardnu vrijednost od oko 1,25.

Treba istaći da je odnos naizmjeničnog i jednosmjernog otpora povoljniji za aluminijum, što se objašnjava postojanjem aluminijskog oksida na svakoj žici. Uticaj “skin” i efekta blizine su zanemarljivi za presjeke provodnika do 150 mm² (Al) i 185 mm² (Cu).

Faktor gubitaka u metalnom omotaču je zbir dva faktora:

$$\lambda_o = \lambda_o' + \lambda_o''$$

gdje su: λ'_o - faktor gubitaka u metalnom omotaču usljed cirkulacije struje,
 λ''_o - faktor gubitaka u metalnom omotaču usled vrtložnih (vihornih) struja ($\lambda''_o \approx 0$).

Faktor gubitaka u metalnom omotaču posljedica je međusobnog induktivnog dejstva kola provodnika i kola metalnog omotača kabela.

Jednožilni kabl s metalnim omotačem se ponaša kao transformator, gdje je provodnik primar a metalni omotač sekundar. Ako je sekundar zatvoren, tj. metalni omotač uzemljen na oba kraja, kroz njega će proticati tzv. cirkulaciona struja. Takođe će u metalnom omotaču postojati , bez obzira da li je uzemljen ili nije, vrtložne struje.

Gubici usled cirkulacione struje javljaju se samo kod jednožilnih kablova, jer se kod trožilnih u zajedničkom metalnom omotaču indukciono dejstvo pojedinih faza na metalni omotač međusobno poništava. Cirkulaciona struja se kreće duž metalnog omotača i zatvara se preko zemlje ili metalnog omotača druge faze kabela. Kad je omotač otvoren bar na jednom kraju, nema strujnog toka, ali se mogu indukovati, u nekim okolnostima, visoki naponi koji mogu ugroziti ljude i spoljašnji izolaciono-zaštitni omotač. Gubici usled cirkulacione struje su veći ukoliko su kablovi više razmaknuti. Međutim, gubici usled vrtložnih struja rastu ukoliko se rastojanje između kablova smanjuje.

Kad se tri jednožilna kabela polažu jedan do drugog, npr u poredku djeteline, međusobni toplotni uticaj kablova je znatan, što ima za posledicu smanjenje dozvoljenog strujnog opterećenja kabela.

Ove poteškoće se uspješno rešavaju ako se kod kablova položenih razmaknuto primijeni transpozicija metalnih omotača ("Crossbonding") i na taj način suzbijaju gubici usled cirkulacionih struja.

Vrtložne struje u metalnom omotaču se javljaju jer posmatrane tačke na njemu nisu podjednako udaljene od tri struje u provodnicima. Po svojoj prirodi ovi gubici su slični gubicima usled efekta blizine provodnika. Najjači uticaj je kad se rastojanje između kablova smanjuje.

U većini slučajeva gubici usled vrtložnih struja su vrlo mali i u odnosu na druge gubitke mogu se zanemariti.

Za mehaničku zaštitu kablova koriste se prije svega čelične trake i žice, tj. feromagnetski materijali.

Gubici u metalnoj mehaničkoj zaštiti kabela se izražavaju se preko dva faktora:

$$\lambda_M = \lambda'_M + \lambda''_M$$

gdje su: λ'_M - faktor gubitaka usled histerezisa i
 λ''_M - faktor gubitaka usled vihornih struja.

Kod trožilnih kablova, gdje se obično koristi metalna zaštita od čeličnih traka ili žica, gubici od magnetisanja se obično mogu zanemariti.

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

Gubici u provodnicima kabela se daju za nazivnu struju. Ako je u pitanju neka druga, uz pretpostavku da se otpor R nije promijenio, važi:

$$P_p = P_{pN} \left(\frac{I}{I_N} \right)^2$$

gdje su : P_{pN} - nazivni gubici u provodnicima kabela (pri nazivnoj struji I_N),

P_p - gubici u provodnicima kabla (pri nekoj struji I).

2. Gubici uslijed napona

Gubici uslijed napona se javljaju uvijek kad je kabl pod napšonom, bez obzira da li je opterećen ili nije. To su gubici u dielektriku (P_{diel}):

$$P_{diel} = V^2 \omega C \operatorname{tg} \delta [W \text{ po fazi}]$$

gdje su: V - fazni napon,
 C - kapacitet žile kabla prema zemlji,
 $\operatorname{tg} \delta$ - faktor gubitaka.

Gubici su proporcionalni:

- kvadratu napona,
- kapacitetu kabla (relativnoj dielektričnoj konstanti ϵ_r),
- faktoru gubitaka - potrebno da što manje zavisi od temperature.

Odnos gubitaka uslijed struje i dielektričnih gubitaka, po naponskim nivoima, dat je u sljedećoj tabeli:

Tabela xx:

Un (kV)	P_{diel}
110	0,04 P_{Cu}
220	0,13 P_{Cu}
400	0,40 P_{Cu}

Dielektrični gubici su za sredjenaponske kablove zanemarljivi u odnosu na ukupne gubitke. Kod visokonaponskih kablova dielektrični gubici rastu proporcionalno presjeku provodnika, tj. rastu sa pogonskim kapacitetom (kod visokonaponskih kablova 400 kV oni mogu iznositi čak 40% ukupnih gubitaka). Zbog povećanja dielektričnih gubitaka sa presjekom provodnika, mora doći do smanjenja gubitaka u provodniku da bi se ukupni gubici zadržali na visini koju određuje dozvoljena temperatura provodnika. Iz tog razloga se kod visokonaponskih kablova primjenjuje tzv. transpozicija metalnih omotača („Crossbonding“) što je od posebnog značaja za veće provodnike.

IV. ODABIR I PRORAČUN KABLOVA

U analizama i proračunima sistema napajanja posmatrane grupe potrošača u okiru gradskog konzuma polazi se od činjenice da se u gradskim konzumima primjenjuju kablovi. Odabira se odgovarajući tip i presjek kabela, u skladu sa važećim Preporukama.

Za odabrani tip i presjek kabela potrebno je utvrditi da li on zadovoljava što se tiče normalnog pogona kao i u stanju kvara na kablju.

Kabl se provjerava na:

- dozvoljeno strujno opterećenje (normalni-ustaljeni režim i privremeni nužni pogon),
- dozvoljenu struju kratog spoja i
- dozvoljeni pad napona.

1. Dozvoljeno strujno opterećenje kabela

Dozvoljeno strujno opterećenje kabela treba da bude ograničeno tako da toplota proizvedena u kablovskom vodu bude odvedena u okolinu tako da se ne prekorači maksimalno dozvoljena temperatura provodnika (npr. 90°C za kabl sa UMP, u normalnom-ustaljenom režimu).

Pri tome se polazi od poznate vrijednosti nazivne (naznačene) struja kabela ($I_n [A]$), koje se daju u tabelama odgovarajućih priručnika i katalogima proizvođača kabela, i uticajnih faktora za konkretne uslove polaganja.

Naznačene (nazivne) struja kabela daju se za referentne uslove:

- temperatura tla $\theta_{tr} = 20^\circ C$,
- specifična toplotna otpornost tla $\rho_{tr} = 1 Km/W$ (za kabl 110 kV $\rho_{tr} = 1,2 Km/W$)
- dubina polaganja $h = 0,7m$ ($h = 1m$ za kabl 35 kV, $h = 1,2m$ za kabl 110 kV),
- jedan kabl u rovu,
- ili - promjenljivo distributivno opterećenje sa $m = 0,7$ za NN i SN mrežu i $m = 0,8$ za mrežu 110 kV, ili – konstantno opterećenje (npr. industrijski pogon)
- sa uvažavanjem cirkulacionih struja u elementima zaštite na umanjenje vrijednosti struje.

Dozvoljeno strujno opterećenje kabela u konkretnim uslovima polaganja i rada kabela, dređuje se uvažavajući niza uticajnih faktora:

- karakteristika opterećenja,
- karakteristika zemljišta,
- temperature tla,
- temperature vazduha,
- uticaja jednog kabela na drugi,
- njihove međusobne udaljenosti, položaja, opterećenja i dr.

Tako je **dozvoljeno strujno opterećenje kabela u konkretnim uslovima polaganja i opterećenja kabela:**

$$I_{doz} = K I_n$$

gdje su: K - ukupni koeficijent korekcije opterećenja, koji je proizvod više koeficijenata:
 K_1 - koeficijent zavisn od dubine polaganja,
 K_2 - koeficijent zavisn od toplotnog otpora tla,
 K_3 - koeficijent zavisn od temperature tla,

K_4 - koeficijent zavisan od broja i razmaka kablova u zemlji,

K_m - koeficijentom faktora opterećenja,

I_n [A] - nazivno (naznačeno) opterećenje kabla.

Ukupni koeficijent korekcije je:

$$K = K_1 K_2 K_3 K_4 K_m$$

I temperatura vazduha ima uticaja, pa se uvodi i koeficijent K_5 .

Vrijednosti pojedinih koeficijenata date su u sljedećim tabelama /"ELKA" proizvođač kablova/.

K_1 - korekcionni faktor za različite dubine polaganja

dubina polaganja (m)	faktor K_1
0,50 do 0,70	1,00
0,71 do 0,90	0,99
0,91 do 1,10	0,98
1,11 do 1,30	0,96
1,31 do 1,50	0,95

Toplota sa površine kabla položenog u zemlju prostire se od kabla ka površini zemljišta, a odavde u atmosferu. Pri tome se prostiranje toplote suprostavlja **toplotni otpor zemljišta** (tla) u kojem je položen kabl i prelazni toplotni otpor površine zemljišta. Povećanje toplotnog otpora zemljišta smanjuje dozvoljeno strujno opterećenje, pri čemu je to smanjenje nešto izraženije kod kablova većeg presjeka.

K_2 - korekcionni faktor za različite specifične toplotne otpornosti tla

Presjek provodnika mm ²	faktor K_2 za razne toplinske otpore tla dane u °. Km /W						
	0,70	1	1,20	1,50	2	2,50	3
35 – 95	1,08	1,00	0,95	0,90	0,80	0,74	0,69
120 – 400	1,09	1,00	0,95	0,89	0,79	0,73	0,68

Temperatura zemljišta znatno utiče na dozvoljeno strujno opterećenje kablova. Ako temperatura zemljišta npr. padne sa 20°C na 5°C, što odgovara zimskim uslovima, kabl IPO 13 10kV može se opteretiti sa preko 15% više.

K_3 - korekcionni faktor za različite temperature tla

najveća radna temperatura provodnika°C	faktor za različite temperature tla °C							
	-5	0	5	10	15	20	25	30
90	1,17	1,14	1,10	1,07	1,04	1,0	0,97	0,92
80	1,19	1,16	1,11	1,08	1,04	1,0	0,96	0,91
70	1,22	1,19	1,14	1,09	1,05	1,0	0,94	0,89
65	1,24	1,20	1,16	1,10	1,05	1,0	0,93	0,88

Vrijednost koeficijenta paralelnog polaganja kablova – K_4 zavisi od broja i rastojanja između kablova. Kada se u isti rov polaže veliki broj kablova, na primjer na izlazu iz TS 110/X kV ili X/0,4 kV, ona može da bude veoma mala i da znatno umanjuje prenosnu moć napojnih kablovskih dionica (problem raspjeta kablova iz napojnih i distributivnih TS). Takvi slučajevi treba da se posebno analiziraju, a problem se rješava:

- Usvajanje većeg presjeka provodnika kabla, odnosno napojne dionice;
- Primjena drugog tipa kabla, npr. kablova sa izolacijom od umreženog polietilena tipa XHE 49-A, XP00-ASJ idr, pod uslovom da to ne dovodi do isušivanja tla;
- Primjena posteljice od specijalnih mješavina.

K_4 - korekcionni faktor za zličiti broj paralelno položenih kablova

broj kablova (sistema) u istom rovu		faktor K_4						
		2	3	4	5	6	8	10
razmak između kablova (sistema)	dodir	0,79	0,69	0,63	0,58	0,55	0,50	0,46
	7 cm	0,85	0,75	0,68	0,64	0,60	0,56	0,53
	15 cm	0,86	0,77	0,72	0,68	0,64	0,61	0,58
	25 cm	0,87	0,78	0,74	0,71	0,67	0,64	0,62

Vrijednost koeficijenta K_m zavisi od faktora opterećenja m dnevnog dijagrama opterećenja. Nazivna strujna opterećenja kablova se najčešće daju za dnevne dijagrame opterećenja:

- Za stalno opterećenje $m = 1$;
- $m = 0,7$ za konzum koji se napaja iz NN i SN mreže, kod kojeg se smjenjuje maksimalno opterećenje trajanja 6 sati, sa opterećenjem od 60% masimalnog u preostalih 18 sati;
- $m = 0,8$ za konzum koji se napaja iz 110 mreže, kod kojeg se smjenjuje maksimalno opterećenje trajanja 6 sati, sa opterećenjem od 73 % masimalnog u preostalih 18 sati.

Ako je nazivna struja data za $m = 0,7$ ili $m = 0,8$, onda nazivnu struju za stalno opterećenje treba pomnožiti sa koeficijentom:

$K_m = 0,75$ za SN i NN kablove i

$K_m = 0,91$ za 110 kV kablove.

Strujno opterećenje kabla u pogonu se proračunava na osnovu opterećenja potrošača. U trofaznom sistemu, za konstantnu snagu potrošnje $P[W]$, naponu $U[kV]$ i faktoru snage $\cos \varphi$ ono iznosi:

$$I_{op} = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi} .$$

Ovo je stvarno opterećenje, odnosno prenosna struja, koja odgovara max. režimu opterećenja.

Maksimalna struja opterećenja ($I_{op}[A]$) ne smiju biti veća od dozvoljene trajne struje opterećenja ($I_{doz}[A]$), odnosno: $I_{op} \leq I_{doz}$

KABL XHP 48-A 3x(1xS mm²), 20 kV

X - oznaka za izolaciju od umreženog polietilena (UPE),

H - oznaka za poluvodljive slojeve preko provodnika i preko izolacije,

P - oznaka za spoljašnji PVC plašt,

48 - oznaka za zaštitu,

-A - oznaka za aluminijski provodnik,

3x(1x150) mm² - broj kablova × (broj žila × nazivni presjek provodnika u mm)

Nazivne (naznačena) struje kabla u zavisnosti od presjeka provodnika, date su u sljedećoj tabeli (ELKA – proizvođač kablova), a za referentne uslove polaganja:

- temperatura vazduha $\theta_v = 30^0 C$
- temperatura tla (zemlje) $\theta_t = 20^0 C$
- temperatura provodnika $\theta_p = 90^0 C$
- specifična toplotna otpornost tla $\rho_t = 1^0 Km / W$

Karakteristike ovog tipa kabla i nazivna struja za konstantno opterećenje dati su u sljedećoj tabeli:

presjek vodiča (mm ²)	izmjenični otpor vodiča (Ω/km)	pogonski induktivitet vodiča (mH/km)	strujno opterećenje I _N (A)	promjer preko plašta d _v (mm)
25	1,540	0,54	126	28,0
35	1,100	0,46	160	28,0
50	0,804	0,42	185	30,0
70	0,557	0,40	230	32,0
95	0,401	0,38	270	33,0
120	0,318	0,37	310	35,0
150	0,259	0,36	345	37,0
185	0,206	0,35	390	39,0
240	0,156	0,33	455	42,0
300	0,125	0,32	510	44,0
400	0,0977	0,31	600	48,0
500	0,0776	0,37	616	52,5
630	0,0601	0,36	712	56,0

2. Kontrola presjeka kabla na struj kratkog spoja

Struja kratog spoja koja protiče provodnikom kabla u većini slučajeva značajno je veća od dozvoljenog strujnog opterećenja. Velika struja prouzrokuje naglo povećanje temperature provodnika, što može izazvati hemisko razlaganje izolacije, te pogoršati električne i mehaničke osobine izolacije. Sve to može dovesti do kvara, odnosno proboja izolacije kabla. Dozvoljene temperature zagrijavanja kablova pri kratom spoju daju se u odgovarajućim priručnicima i katolozima proizvođača kablova.

Struju kratkog spoja ($I_{KS} [A]$) koju kabal može podnijeti bez trajnih oštećenja, računamo iz podataka o:

- trajanju kratkog spoja ($t_{KS} [s]$),
- dozvoljenoj (nazivnoj) struji kratkog spoja ($I_{KSn} [A]$) i temperaturi provodnika na početku kratkog spoja ($T_k [°C]$),

$$I_{KS} = \frac{1}{\sqrt{t_{KS}}} I_{KSn}$$

Podaci o dozvoljenoj (nazivnoj) struji KS, određuju se iz tabele, zavisno od presjeka i temperature kabla prije KS. Podaci u sljedećoj tabeli se odnosi na razmatrani tip kabla, XHP 48-A 3x(1xS mm²), 20 kV.

presjek provodnika (mm ²)	STRUJA KS (kA), temperatura na početku kratkog spoja °C		
	20	30	90
25	3,00	2,90	2,30
35	4,10	3,90	3,20
50	5,50	5,30	4,40
70	8,00	7,80	6,30
95	11,10	10,80	8,80
120	14,00	13,60	11,10
150	17,40	16,90	13,80
185	21,60	21,00	17,10
240	28,70	27,80	22,60
300	35,70	34,60	28,20
400	45,60	44,30	36,00
500	60,00	58,00	47,00
630	75,60	73,10	59,20

3. Kontrola presjeka kabla na pad napona

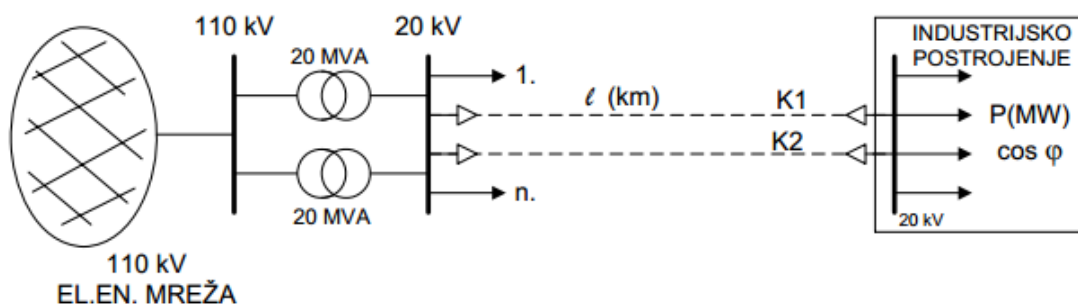
Pad napona na kablovskoj dionici sa koncentrisanim opterećenjem na kraju, računa se preko izraza:

$$\Delta u_{\%} = \frac{Pl}{U^2} (R_1 + X_1 \operatorname{tg} \varphi) 100 [\%]$$

gdje su: $R_1[\Omega/km]$ - jedinična aktivna otpornost kabla
 $X_1[\Omega/km]$ - jedinična induktivna otpornost kabla
 $\cos \varphi$ - faktor snage
 $P[kW]$ - aktivno opterećenje na kraju kabla
 $l[km]$ - dužina kablovskog voda

Izračunata vrijednost pada napona mora biti manja od dozvoljenog pada napona. Ako taj uslov nije zadovoljen, odabiramo veći presjek kabla.

4. PRIMJER

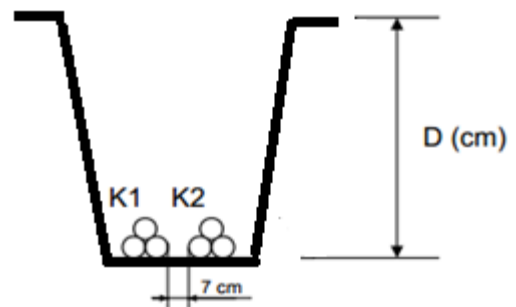


Kablovskim elektroenergetskim vodom XHP 48-A $3 \times (1 \times S) \text{ mm}^2$, 20 kV, napaja se električnom energijom industrijsko postrojenje (KONSTANTNO OPTEREĆENJE).

Potrebno je odrediti presjek kabla K1 i kabela K2 koji predstavlja toplu rezervu kabela K1 i koji mora biti dimenzioniran za iste uslove kao i kabel K1.

Zadati su sljedeći podaci:

- nazivni napon $U_n = 20 \text{ kV}$
- dužina kabla $l = 9,5 \text{ km}$
- potrebna prenosna snaga kabla $P = 10,5 \text{ MW}$
- faktor snage $\cos \varphi = 0,8$
- najveća temperatura provodnika $T_{\max} = 90^\circ \text{C}$
- temperatura okoline kod polaganja u zemlju $T_t = 15^\circ \text{C}$
- temperatura vazduha $T_v = 25^\circ \text{C}$
- dubina polaganja u zemlju $D = 90 \text{ cm}$
- razmak između kablova $d = 7 \text{ cm}$
- termički otpor zemlje $\rho_t = 1^\circ \text{K m/W}$
- raspored polaganja - trougao
- kabovi položeni u zemlju
- broj kablova u istom rovu $n = 2$
- struja kratkog spoja $I_{KS} = 12 \text{ kA}$
- trajanje kratkog spoja $t_{KS} = 0,3 \text{ s}$
- dozvoljeni pad napona $u_{\text{doz}} = 5\%$



Strujno opterećenje kabla

Struja prenosa kabla određena je opterećenjem potrošača (konstantno maksimalno opterećenje):

$$I_{op} = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi} = \frac{10,5 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 0,8} = 360,84 \text{ A}$$

Ovu struju zadovoljava presjek $S = 185 \text{ mm}^2$, sa nazivnim strujnim opterećenjem $I_n = 390 \text{ A}$.

Nazivne struje iz posmatrane tabele date su za konstantno opterećenje.

Dozvoljena struja opterećenja za posmatrane uslove polaganja kabla je:

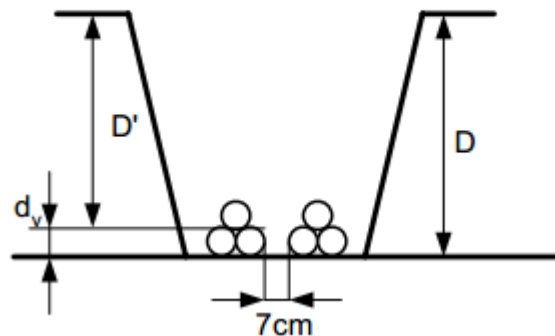
$$I_{doz} = KI_n$$

Ukupni oeficijent korekcije je:

$$K = K_1 K_2 K_3 K_4$$

Koeficijeni K_1 uzima obzir dubinu polaganja kabla. Obzirom da su kablovi položeni u trolistu (slika), stvarnu dubinu polaganja dobijamo ako od dubine polaganja $D = 90$ cm oduzmemo spoljašnji prečnik jedne žile kablovskog voda, odnosno:

$$D' = D - d_v = 90 - 3,9 = 86,1 \text{ cm}$$



Za ovu dubinu polaganja, iz tabele $\Rightarrow K_1 = 0,99$

Koeficijent K_2 uzima u obzir toplotni otpor okolnog tla. Za zadani otpor tla od $1 \text{ }^\circ\text{Km/W}$, iz tabele $\Rightarrow K_2 = 1$

Faktor K_3 zavisi od temperaturi okolnog zemljišta i maksimalne radne temperature provodnika. Za zadatu temperaturu okolnog tla od $15 \text{ }^\circ\text{C}$ i maksimalnu radnu temperaturu od $90 \text{ }^\circ\text{C}$, iz table $\Rightarrow K_3 = 1,04$.

Faktor K_4 zavisi od broja sistema (kabela) u istom rovu i njihove međusobne udaljenosti. Obzirom da je zadatkom zadato da su 2 kablovska sistema na međusobnoj udaljenosti od 7 cm u istom rovu, iz table $\Rightarrow K_4 = 0,85$

Dobijamo: $K = K_1 K_2 K_3 K_4 = 0,875$

\Rightarrow

$$I_{doz} = I_{op} = KI_n = 0,875I_n$$

$$I_n = \frac{I_{op}}{0,875} = \frac{360,84}{0,875} = 411,42 \text{ A}$$

Prva veća nazivna vrijednost struje je $I_n = 455 \text{ A}$, a presjek kabla $S = 240 \text{ mm}^2$

Sada se mijenja samo koeficijent K_1 , jer se mijenja dubina polaganja

$$D' = D - d_v = 90 - 4,2 = 85,8 \text{ cm}$$

Za ovu dubinu dobija se ista vrijednost za K_1 , pa je odabrani presjek $S = 240 \text{ mm}^2$.

Provjera na struju KS

Za presjek $S = 240 \text{ mm}^2$, dozvoljena struju KS, uz pretpostavku da je temperatura prije KS jednaka maksimalno dozvoljenoj, prema tabeli je

$$I_{KSn} = 22,6 \text{ kA}$$

Struja kratkog spoja koju kabl može da izdrži:

$$I_{KS} = \frac{1}{\sqrt{t_{KS}}} I_{KSn} = \frac{1}{\sqrt{0,3}} 22,6 = 41,26 \text{ kA}$$

Struja od 41,26 kA veća je od 12,0 kA koliko je zadatkom data struja kratkog spoja. U slučaju da se pokazalo kako je struja kratkog spoja koju kabl može izdržati u definisanom vremenu trajanja kratkog spoja manja od struje kratkog spoja, morali odabrati prvi veći presjek kabla i ponoviti proračun sa novim vrijednostima od točke 1. Bilo bi potrebno provjeriti i korekzione faktore odnosno struju opterećenja, međutim sigurno je da, ako je struja opterećenja bila manja od struje prenosa za manji presjek, da će biti i za veći presjek.

Provjera na dozvoljeni pad napona

Dozvoljeni pad napona definisan zadatkom iznosi 5%, a računa se prema sljedećem izrazu:

$$\begin{aligned} \Delta u_{\%} [\%] &= \frac{PI}{U^2} (R_1 + X_1 \tan \varphi_1) 100 = \\ &= \frac{10,5 \cdot 10^6 \cdot 9,5}{20 \cdot 10^6} (0,156 + 0,33 \cdot 10^{-3} \cdot 314 \cdot \tan(\arccos 0,8)) 100 = 5,55\% \end{aligned}$$

Dobijena vrijednost od 5,55% veća je od, tekstom zadatka, dozvoljenih 5%. Odabiremo prvi veći presjek i ponavljamo proračun.

Dakle, u trećem pokušaju računamo s presjekom kablenskog voda od 300 mm^2 . Dozvoljena struja odabranog presjeka iznosi 510 A.

Novi vrijednosti struje opterećenja, kratkog spoja i pada napona su:

468,33 A ZADOVOLJAVA !

51,586 kA ZADOVOLJAVA !

4,76% ZADOVOLJAVA !

Obzirom da su sva tri kriterija zadovoljena, možemo utvrditi kako odabrani presjek od 300 mm^2 , u potpunosti zadovoljava sve postavljene uslove te definišemo 20 kV kabl: **XHP 48-A 3×(1×300) mm², 20 kV.**

V. POLAGANJE KABLOVA

1. Osnovno

Prema mjestu polaganja kablovi se dijele na:

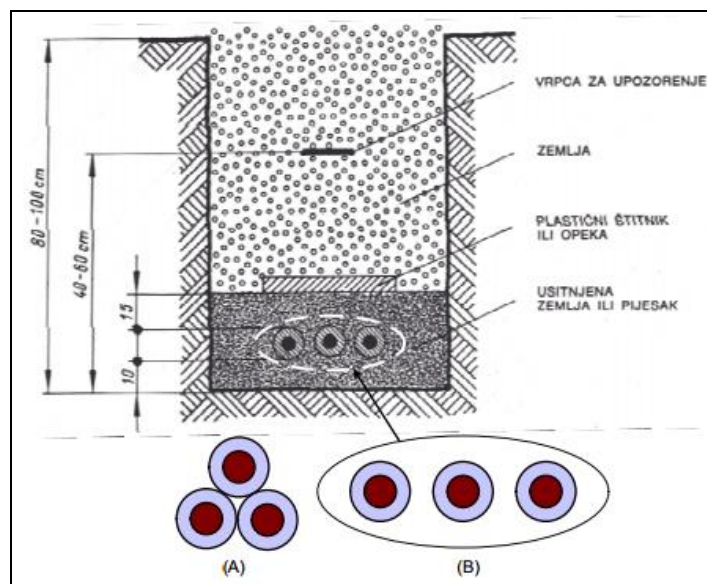
- Podzemne kablove,
- Podmorske kablove i
- Vazdušne kablove (samnoseći kablovski snop).

Podzemni kablovi

Podzemni kablovi se u principu polažu u kablovske rovove. Polaganje kabla i njegovo zatrpavanje mora biti pažljivo provedeno. Oblikuje se tzv. **kablovska posteljica** od sitno zrnastog materijala (nula). Bitan je materijal koji dobro odvodi toplotu (važno je zbog odvođenja toplote iz kabla, što se mora kontrolisati termičkim proračunom zagrijavanja kabla).

Jednožilni kablovi se polažu u rovove na jedan od sljedećih načina:

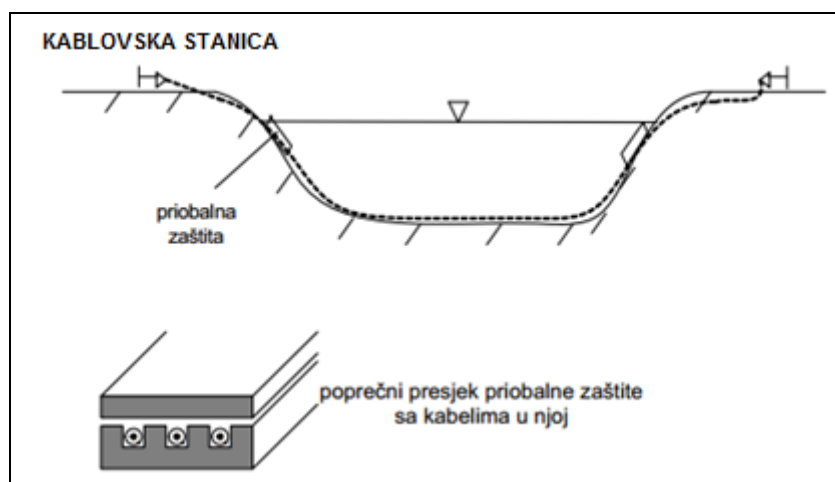
- Polaganje u trougaoni spoj (*slika xx, A*) znači da se tri jednožilna kabla međusobno dodiruju (vezuju se trakom), zbog čega se povećava toplotno opterećenje odnosno djelomično se smanjuje prenosna moć kabla.
- Polaganje u ravnini (*slika xx, B*) znači da je svaki jednožilni kabl udaljen od drugog npr. 20-tak cm, pa su zbog većih udaljenosti kablovi manje toplotno opterećeni, a prenosna moć kabla je nešto veća, ali se zauzima veći prostor, tj. potrebna je veća širina kablovskog rova.



Slika xx: polaganje kabla u rov

Podmorski kablovi

Podmorski kablovi se polažu na dnu mora (pomoću posebnih brodova), redovno kao tri jednožilna kabla s većim razmakom između pojedinih kablova da se eventualno mehaničko oštećenje (npr. brodska sidra) ograniči samo na jedan kabl (popravak podmorskog kabla je vrlo skup...). Dijelovi podmorskog kabla na mjestima ulaza i izlaza iz mora su najviše izloženi djelovanju morske vode (abraziji – rad valova). Stoga se ti dijelovi kabla postavljaju u tzv. priobalnu zaštitu. Ona se sastoji iz betonskih blokova sa žljebovima u kojima se postavljaju kablovi.

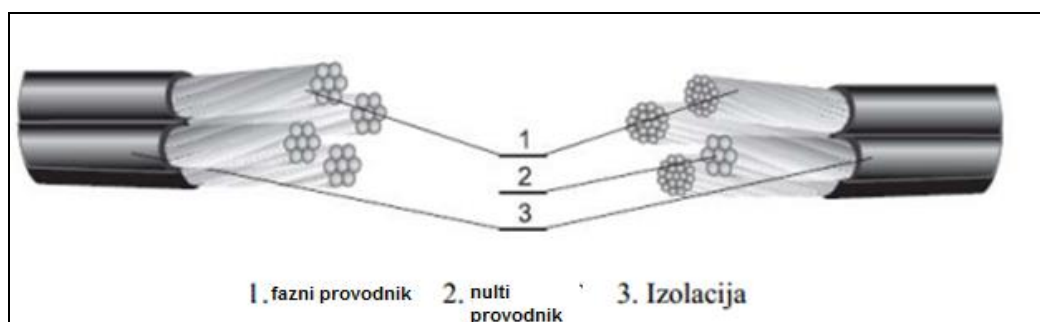


Slika xx: Polaganje podmorskog kabla

Vazdušni (nadzemni) kablovi koriste se u specijalnim slučajevima, npr. u rudnicima, tunelima i sl., gdje se postavljaju na kablovske regale. Specijalni tip zračnog kabla je samonosivi kablovski snop.

Samonosivi kablovski snop

U niskonaponskim distributivnim mrežama, za niskonaponske vodove i nadzemne kućne priključke danas se najčešće koristi tzv. samonosivi kablovski snop (SKS) – izolovani nadzemni provodnik. Fazni provodnik se izrađuje od kompaktiranog aluminijskog užeta presjeka 16, 25, 35, 50, 70 mm², nulti provodnik od legure ALMg presjeka cca. 50 i 70 mm², a izolacija je najčešće umreženi polietilen (UMPE ili XLPE).



Slika xx: samonosivi kablovski snop

2. POLAGANJE KABLOVA PREMA TEHNIČKOJ PREPORUCI

Osnovna pravila polaganja kablova

Kod polaganja kablova postoje određena ograničenja koja moraju biti ispoštovana. To su:

- **dozvoljeni poluprečnici savijanja kabla,**
- **dozvoljene visinske razlike na trasi kablovskog voda,**
- **dozvoljene temperature polaganja kablova.**

Ukoliko se ova ograničenja ne ispoštuju može doći do oštećenja a kasnije i do proboja kabla.

Dozvoljeni poluprečnici savijanja kabla

Da ne bi dolazilo pri polaganju kabla do oštećenja njegove izolacije i pojedinih slojeva propisuju se najmanji dozvoljeni poluprečnici savijanja kabla.

Najmanje dozvoljeni poluprečnici savijanja kablova dati su u *tabeli xx*, gdje su D_k – spoljašnji prečnik kabla, a d_p – prečnik provodnika.

Tabela xx: Dozvoljeni poluprečnici savijanja kabla

Tip kabla	Papirni kabl (L.1)		PVC - kabl	UPE - kabl
	Sa Pb ili valovitim Al omotačem	Sa Al -glatkim omotačem		
Višežilni kablovi do $U_0/U=0,6/1$ preko $U_0/U=0,6/1$	$15 \times D_k$	$25 \times D_k$	$12 \times D_k$ $8 \times (d_p+D_k)$	$10 \times D_k$ $7 \times (d_p+D_k)$
Jednožilni kablovi	$25 \times D_k$	$30 \times D_k$	$10 \times (d_p+D_k)$	$9 \times (d_p+D_k)$

Kad se koriste oblikovani elementi – šabloni, na primjer pred kablovskim glavama, onda su dozvoljeni manji poluprečnici savijanja – 70% vrijednosti datih u tabeli. Poluprečnik savijanja kabla pred kablovskom glavom može biti još manji ako se izvodi na oko $+30^\circ\text{C}$ i pomoću šablona za krivine (50% manji od vrijednosti u *tabeli xx*). Međutim kod mašinskog polaganja zahtijevaju se veći poluprečnici krivina za 1,5 do 2 puta od vrijednosti datih u *tabeli xx*.

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. Postepeno kabal u višim dionicama trase ostaje bez dovoljno kompaunda, stvaraju se šupljine što kasnije dovodi do električnog proboja. Takođe, ako su najniže tačke trase kablovske glave, može iz njih curiti kompaund, pogotovu ako nisu odgovarajućeg kvaliteta.

Da bi se ova mana papirnih kablova izbjegla, umjesto običnog kompaunda za impregniranje, koristi se tzv. naročiti (polučvrsti) kompaund. Ovaj kompaund ostaje u polučvrstom stanju pri maksimalnoj radnoj temperaturi kabla, te ne dolazi do odleženja kompaunda sa viših u niže djelove kabla. Ovi se kablovi prema JUS obilježavaju sa N: NPO, NPZO, i sl. Za veće visinske razlike, izlaske na stubove, visoke objekte, podzemne objekte i sl. najpogodnije je koristiti kablove s čvstim dielektrikom: polivinil-hloridom, umreženim polietinelonom i dr.

U narednim *tabelama* su date dozvoljene visinske razlike vertikalno položenih kablova i kablova položenih na strmim dionicama i dat dozvoljen pad na strmoj trasi kablovskog voda.

Tabela xx: Dozvoljena visinska razlika vertikalno položenog kabla

Tip kabla	Nazivni napon U_0/U u kV	Maksimalno dozvoljena visinska razlika u m
Papirni kabl (IPO)	do 3,5/6 5,8/10	50 10
Kabl sa tri metalna omotača (IPZO)	5,8/10 do 8,7/15 20/35	30 15

Tabela xx : Dozvoljen pad na strmoj trasi kablovskog voda

Nazivni napon	Dozvoljen pad u %	
	Bez ograničenja	Do maksimalne dužine kabl trase od 500 m
0,6/1 do 20/35	4%	10%

Dozvoljene temperature polaganja kablova

U zavisnosti od izolacije i konstrukcije kabla određuje se minimalna temperatura pri kojoj se kabl smije 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 cijepati papir.

Čvrsti izolacioni materijali takođe imaju ograničenja pri polaganju kablova. Tako PVC (polivinilhlorid) ima zadovoljavajuću savitljivost i pri -20°C , dok UPE (umreženi polietilen) pri znatno nižoj temperaturi od -40° (prema IEC). Međutim, zbog sigurnosti ove mogućnosti se ne koriste. U tabeli date su minimalne temperature polaganja kablova zavisno od izolacije.

Tabela xx: Dozvoljene minimalne temperature polaganja kabla

Vrsta izolacije kabla	Dozvoljena minimalna temperatura polaganja kablova
Papir	5
PVC	-5(+5)
UPE	-20

Kablovi sa izolacijom UPE tipa XHP, pošto je spoljašnji omotač od PVC, imaju ograničenje na -5°C . Neki proizvođači ograničavaju temperaturu polaganja za PVC na $+5^{\circ}\text{C}$. Međutim može se proizvesti elastičniji PVC i za niže temperature, čak i za -20°C .

Kabl se može polagati ako tokom 24h prije polaganja kabla temperatura vazduha ne spadne ispod propisane. Kratkovremeni pad temperature tokom 2-3 h, na primjer pri noćnim mrazovima, smatra se na osnovu praktičnih iskustava da je bez uticaja.

Ukoliko je potrebno polagati kabl pri temperaturama nižim od propisane, onda je potrebno kabl zagrijavati. Kabl se može zagrijavati zavisno od prilika i mogućnosti na nekoliko načina:

- električnom strujom
- toplim vazduhom,
- u zagrijanim prostorijama i šatorima.

Za zagrijavanje električnom strujom koriste se obično trofazni transformatori. U tabeli su dati su potrebni naponi za zagrijavanje kablova zavisno od presjeka provodnika, dužine kabla i temperature vazduha.

Korišćenje *tebele* podrazumijeva poznavanje struje u kablu. Međutim, obično se ona ne zna, jer je relativno složen njen proračun i zavisan od nekoliko činilaca: tipa kabla, presjeka provodnika, broj slojeva kabla na bubnju, temperature vazduha, da li je bubanj opšiven daskama ili pokriven šatorom itd. Kao kontrola strujnog opterećenja koristi se mjerenje temperature spoljašnjeg reda kabla na bubnju. Zagrijavanje kabla treba prekinuti kada temperatura spoljašnjeg omotača kabla dostigne 20°C pri temperaturi vazduha -10°C i 30°C pri temperaturi vazduha od -10°C do 25°C .

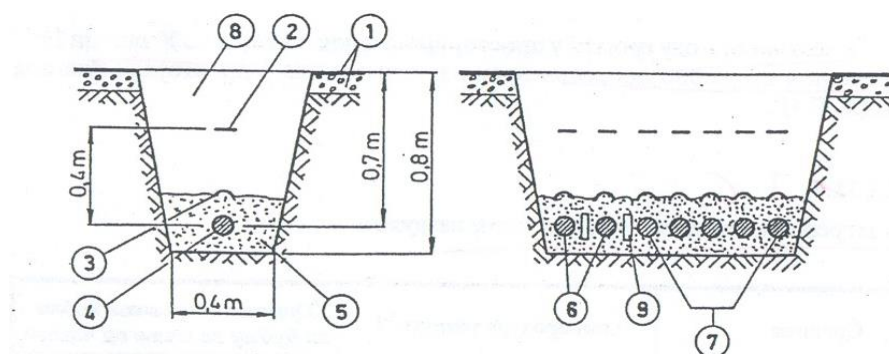
Tabela 5: Potreban napon i vrijeme zagrijavanja kablova različitih dužina i temperatura vazduha

Presjek provodnika mm ²	Približno vrijeme u min pri temperaturi okolnog vazduha °C			Napon na izvodima transformatora u V pri dužini kabla m				
	0	-10	-20	100	200	300	400	500
25	71	88	106	16	32	48	64	80
35	74	93	112	14	28	42	56	70
50	90	112	134	11.5	23	34.5	46	57.5
70	97	122	149	10	20	30	40	50
95	99	124	151	9	18	27	36	45
120	111	138	170	8.5	17	25.5	34	42.5
150	124	150	185	7.5	15	22.5	30	37.5
185	134	167	208	6	12	18	24	30
240	152	190	234	5.3	10.6	15.9	21.2	26.5

Polaganje kablova u rov

Prije početka kopanja rova za polaganje kablova najprije se prouči (iz tehničke dokumentacije) kablovska trasa 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.

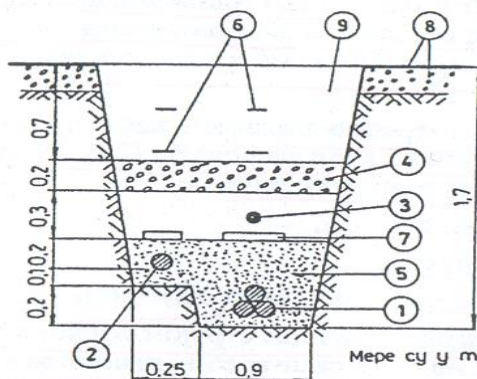
Dubina i širina rova zavisi od električnog napona i broja kablova. Za napone 1 i 10 kV dubina rova je 0,8 m, a za 35 kV 1,1 m. Za napon 110 kV uobičajena dubina je 1,4 m. Međutim, ona se u praksi često mijenja zbog prepreka i drugih instalacija. U tom slučaju uobičajeno je polagati kabl na veću dubinu, naravno ukoliko je ekonomski opravdano. Kablovi se ispod ulica obično polažu u cijevi koje su od plastike (tzv. „juvidur“ cijevi) ili betona. Od ovih drugih se sve više odustaje zbog nepraktičnosti. Povoljnije su plastične cijevi, jer su glatke, ne smiču se na sastavima što se dešava kod betonskih cijevi, a ugradnja im je jednostavnija. Kablovi se mogu polagati i direktno u kolovoz. Takvo rješenje ima znatne prednosti, jer otpada smanjenje prenosne snage i kabl se ne oštećuje o ivice cijevi.



Slika: Primjer položenih kablova 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 s tim da je sitnozrnasta, bez grumenja kamenja, organskih truleži i sl. Ako je u pitanju isušivanje zemljišta usljed velikog broja gusto položenih kablova, ili pak visoka radna temperatura kablova (90°C kod kablova sa UPE izolacijom) onda se rov zagrijava specijalnim materijalima – mješavinama šljunka. Važno je da prilikom zatrpavanja rova ne ostaju šupljine, jer njihovo prisustvo može smanjiti dozvoljeni strujnu opteretljivost kablova za nekoliko desetena procenata.



Slika: Kablovski rov ispod kolovoza ulice

- 1 – uljni kabl 110 kV; 2 – tzv. „diferencijalni“ kabl; 3 – signalni kabl (za prenošenje stanja pritiska u uljnom kablo 110 kV); 4 – betonska ploča MB 150;
5 – kablovska posteljica; 6 – upozoravajuća traka; 7 – betonske ploče; 8 – kolovozni zastor; 9 – ispuna rova od šljunka

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 nabije vibracionim nabijačem u dva sloja sa po dva prolaza nabijačem. Pri tome se postiže zadovoljavajuća nabijenost (stepen zbijenosti oko 90%).

Polaganje kablova preko rijeka

Kablovi se preko rijeka polažu na nekoliko načina:

- polaganje na dno korita rijeke,
- ukopovanje kablova u dno korita rijeke,
- ukopavanje plastičnih cijevi u dno korita rijeke kroz koje se provlače kablovi,
- polaganje kablova u podzemne prohodne galerije.

Direktno polaganje kablova na dno korita plovih rijeka, iako najjeftinije ne preporučuje se zbog mogućeg oštećenja kablova brodskim lengerima, metalnim djelovima koji se javljaju usljed jačeg protoka vode po dnu rijeke.

Ukopavanje kablova u iskopani rov u dno korita rijeke obezbjeđuje kabl od mehaničkih oštećenja, ali ne rješava efikasno pitanje opravke i zamjene eventualno oštećenog kablova.

Polaganje kablova u ukopane plastične cijevi u dno korita rijeke zadovoljava tražene uslove: kablovi su zaštićeni od mehaničkih oštećenja, a zamjena eventualno oštećenog kablova je relativno jednostavna, jer ne zahtijeva plovne objekte.

Cijevi su izrađene od polutvrđog ili tvrdog polietilena. One se isporučuju obično u dužinama do oko 500 m, a u njih su uvučena užad (otporna na rđanje) za vuču kablova. Pravilo je da se jedan kabl polaže u jednu cijev. Da bi se spriječilo podizanje cijevi pri polaganju kablova, one se prije zatrpavanja na više mjesta opterećuju betonskim opteživačima. Na obalama rijeke se obično izgrađuju vodonepropusni šahtovi, te se time obezbjeđuje lak pristup ustima cijevi i laka zamjena kablova.

Izrada podzemnih prohodnih galerija je najskuplja i po pravilu se sprovodi generalnim rješenjem prelaska rijeke, kojom prilikom se rješavaju i pitanja saobraćajnice i prelaska drugih instalacija.

Prije polaganja kablova preko rijeke treba snimiti dno korita rijeke kao i njegov sastav. Takođe treba utvrditi gornji i donji nivo vodostaja i brzinu vode. Zavisno od broja kablova kojim se premošćuje rijeka, širine i dubine rijeke, sastava zemljišta dna rijeke i sl. donosi se odluka o načini polaganja kablova tj. izrade kablovskog rova.

Pri određivanju mjesta prelaska rijeke kablovima vodi se računa da su udaljena od pristaništa, sidrišta, mostova i sličnih mjesta, gdje plovni objekti rječnog saobraćaja mogu oštetiti kabl. Dno rijeke ne bi smjelo bitno tokom vremena da mijenja svoju konfiguraciju, jer bi se moglo desiti da kabl bude podkopan.

Razlikuju se uglavnom dva načina izrade kablovskog rova u dno korita rijeke:

- kopanje rova bagerima i
- izrada rova tzv. ispiranjem.

Polaganje kablova preko mostova

Kablovi položeni preko mostova mogu biti izloženi različitim uticajima: mehaničkim, hemijskim, svjetlosnim i toplotnim. Od naročite važnosti za uspješan pogon kablova položenih preko mostova je uticaj vibracija i potresa na olovne omotače kablova. Pri učestalim vibracijama i potresima kojima su izloženi kablovi položeni preko željezničkih mostova, dolazi do lomova na olovnim omotačima kablova. Uticaj intenziteta zaprljanosti vazduha, prisutnog smoga, morske sredine, razvijenog rječnog saobraćaja pod mostom i sl. mogu biti od značaja za trajanje životnog

doba kabla. Korozija omotača kablova može se u pojedinim okolnostima relativno brzo razvijati. Sunčane radijacije mogu imati uticaj na vijek trajanja zaštitinih spoljnih omotača kablova. Pregrijane metalne površine mosta u ljetnjim mjesecima mogu zračiti toplotu i pregrijavati kablove tako da se njihovi prenosni kapaciteti mogu znatno smanjiti. Kablovi položeni u zatvorene noseće konstrukcije mosta, koje nemaju dovoljno prirodno cirkulisanje vazduha, mogu biti pregrijani znatno iznad dozvoljenih graničnih vrijednosti.

Pri projektovanju kablovskih vodova, čije trase prolaze preko mostova, treba odabrati takvu konstrukciju kabla koja će najbolje odgovarati postojećim uslovima. Projektovanje kablovskih vodova obavezno zahtijeva timski rad s konstruktorima – projektantima mostova, jer se jedino tako može postići laka montaža i ispravan pogon kablova.

Olovo se kao omotač kablova u elektrotehnici koristi skoro 100 godina. Njegova laka obrada i spajanje, savitljivost, plastičnost, vodonepropustljivost, dobra postojanost na različite agresivne sredine učinile su da se i danas uspješno koristi kao omotač kablova, a naročito za srednjenaponske kablove. U poređenju s aluminijumom olovo se može smatrati „plemenitim“ metalom. Međutim, olovo ima jednu veliku manu, osjetljivo je na vibracije i potrese. Liveno, čisto olovo ima krupno – zrnastu strukturu koja se još više potencira čak i na sobnoj temperaturi. Takva struktura vodi do stvaranja međukristalnih naprslina i do neupotrebljivosti čistog olova kao omotača kablova. Ispitivanja su pokazala da se naprsline na olovnom omotaču stvaraju usljed vibracija ili interkristalne korozije. Kad je kabl s olovnim omotačem položen preko mostova, ispod prometnih saobraćajnica, u blizini željezničkih kolosjeka, u blizini pokretnih kranova, na brodovima, kao nadzemni vod ili kao podvodni morski kabl, gdje postoji izražen uticaj plime i oseke, na njemu se javljaju naprsline. Ispitivanja su, takođe, pokazala da uzrok ovim naprslinama leži u vibracijama i potresima koji izazivaju starenje olova. Naprsline na olovnom omotaču mogu se javiti i pri dužem transportu kablova željezničkim saobraćajem.

Iz ovih razloga se smatra da čisto olovo nije upotrebljivo za energetske kablove čak i u slučajevima normalnog polaganja u rov. Zato se olovo legira raznim metalima kao bakrom, antimonom, kalajem i drugim, zavisno od stepena željene otpornosti na vibracije i potrese.

Dok je čisto olovo vrlo nestabilno s gledišta obrazovanja krupnozrnaste kristalne strukture i stvaranja naprslina, a legirano olovo vrlo otporno na zamor, dotle se aluminijum pokazuje sasvim neosjetljiv na zamor, nastao usljed vibracija i potresa.

Našim nacionalnim standardima regulisan je kvalitet olova odnosno njegovih legura za izradu olovnih omotača kablova (JUS C.E1.040). Njime se predviđa da se za izradu legura za olovne omotače kablova može upotrijebiti samo rafinisano olovo dobijeno iz ruda redukcijom i rafinacijom. Posebno se zabranjuje korišćenje olova koje se dobija pretapanjem.

Primjenom kablova sa sintetičkom izolacijom, na primjer kablova sa izolacijom od UPE, problemi vibracija više ne postoje. Ukoliko se želi veća otpornost na mehaničko habanje kabla koristi se pojačana mehanička zaštita od čeličnih žica i PE omotača.

Mostovi su izloženi višestrukum naprezanju i pomjeranju koja se prenose manje – više na kabl zavisno od načina njegovog postavljanja na most. Ova naprezanja mostova, koja imaju za rezultat njihova pomjeranja, prouzrokuju dva činioca:

- temperatura i
- teret na mostu.

Usljed dnevnih temperatura most dilatira od nekoliko cm do preko 1 m što zavisi od dužine mosta i njegove konstrukcije. Takođe vozila i drugi tereti opterećuju pored ovih vertikalnih ugiba i horizontalna pomjeranja (uvijanje) mostova. Sva ova pomjeranja se prenose na kabl koji se takođe izdužuje usljed dejstva temperaturnih razlika. Posebno osjetljivo mjesto za kablove je dilatacioni dio mosta. Na tom mjestu kablovi su izloženi naprezanjima, obično na jednom mjestu, što poslije višegodišnjeg pogona dovodi do oštećenja kabla. Da bi se to izbjeglo prave se duže dilatacije specijalne konstrukcije u obliku pantografa koje obezbjeđuju ravnomjerno naprezanje kablova. Da

kabl ne bi dijelio sudbinu mosta što se tiče pomjeranja – izduženja oni se nekim rješenjima 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 pomjeranja pri kratkim spojevima.

Vučne sile pri polaganju kablova

Proračun potrebne vučne sile za mašinsko polaganje kablova je neophodan da bi se vidjelo da li je dozvoljena vučna sila dotičnog kabla veća od vučne, a takođe i da bi se ustanovilo da li kapacitet vučne mašine, vitla zadovoljava. To zavisi od mnogo činilaca: konstrukcije kabla, dužine i oblika kablovske trase, konstrukcije i održavanja koturača, vučne mašine.

Kod ručnog polaganja uz upotrebu koturača problem se rješava potrebnim brojem ljudi. Oni se raspoređuju duž trase kabla, a jedna grupa njih vuče kabl. Za dužinu kabla od oko 500 m sa 7-8 krivina, i sa masom kabla od oko 8kg/m potrebna je vučna sila od oko 25000 N. Za ovakve uslove potrebno je oko 70 do 80 ljudi što predstavlja veliki trošak.

Svakako da moderno mašinsko polaganje gdje se kontrolišu i ograničavaju dozvoljene vučne sile zavisno od konstrukcije kablova nudi znatne prednosti. Međutim, ono zahtijeva detaljnije pripreme na postavljanju i učvršćenju koturača, kontrolu trase kabla pri polaganju i sl.

Dozvoljene vučne sile

Dozvoljena vučna sila kabla zavisi od njegove konstrukcije. Kablovi za podmorska polaganja, kao i kablovi za brdovite terene dozvoljavaju vrlo velike vučne sile što zavisi od kvaliteta čelika upotrijebljenog za njegovu mehaničku zaštitu. Konstrukcija drugih kablova nije takva da bi se obezbijedile veće vučne sile, jer je ona uslovljena drugim zahtjevima.

Dozvoljena vučna sila kabla je data izrazom:

$$F_D[N] = S \cdot \sigma$$

gdje je:

S - presjek elementa kabla koji se napreže pri vuči u mm²

σ - dozvoljeno specifično naprezanje na istezanje materijala koji je izložen u vuči u N/mm².

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.

Takođe se za dobijanje dozvoljene vučne sile može koristiti i izraz koji je jednak umnošku spoljašnjeg prečnika kabla:

$$F_D[N] = kD_k$$

gdje je:

k - koeficijent proporcionalnosti u N/mm,

D_k - spoljašnji prečnik kabla u mm.

On se koristi kad se kabl vuče pomoću tzv. „kablovske čarape“ koja se postavlja na spoljašnji omotač kabla.

Za **kablove izolovane impregnisanim papirom (pojasne kablove)** dozvoljavaju se relativno niske vučne sile ako se za vuču koristi „kablovska čarapa“. Kako pritisak po jedinici površine „kablovske čarape“ na kabl nije visok to se onda ne može ostvariti preko papirne izolacije sa provodnicima. „Kablovska čarapa“ se koristi pretežno za ručno polaganje kablova, kada se ljudi raspoređuju duž kabla i potezanjem kabla rasterećuje opterećenje „kablovske čarape“.

Pri vučenju kabla preko provodnika dozvoljene su znatno više sile, čak i skoro 8 puta veće – za veće presjeke.

Za vučenje provodnika koriste se omče koje se učvršćuju sa stezaljkama na provodnike. Ovaj način polaganja je nepraktičan, jer zahtijeva dosta vremena za postavljanje a i kabl pri polaganju ostaje otvoren pa vlaga može prodrijeti u njega. U svakom slučaju bolje je rješenje tzv. „vučna glava“ jer kod njene primjene kraj olovnog omotača kabla je zatvoren izolacionim trakama. Konusnim klinom se ostvaruje preko Pb – omotača i papirne izolacije kontakt sa provodnicima. Pri tome dolazi do deformacija Pb – omotača, ali to u većini slučajeva ne dovodi do njegovog oštećenja i prodora vlage.

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.

Kod kablova sa tri Pb – omotača tzv. troolovni kabl (tip IPZO 13), kad se koristi kablovska čarapa, dozvoljene su veće sile, jer se ostvaruju bolji kontakti sa provodnicima preko konstruktivnih slijeva kabla.

Uljni kablovi: Kod jednožilnog uljnog kabla šuplji provodnik služi za vučenje. Kod njega je važno da ne dođe do curenja ulja koje je pod pritiskom.

KABLOVSKI PRIBOR

Kablovski pribor čine sledeći elementi: kablovske kape, kablovske glave, kablovske spojnice, kablovske papučice (stopice), kablovske obujmice, kablovske uvodnice i kablovski priključni ormari.

-*Kablovske kape* se upotrebljavaju kao privremena zaštita krajeva kablova od prodora vlage, koja može štetno uticati na izolaciju kabla.

-*Kablovske papučice* olakšavaju priključak kabla u razvodnim tablama i aparatima.

-*Kablovske obujmice* služe za pričvršćivanje i nošenje kabla.

-*Kablovske uvodnice* služe da zaštite izolaciju uvučenih provodnika od oštih ivica instalacionih cijevi.

- Kablovski vod sekundarne mreže se postupno grana u *kablovskim ormarićima*, koje vidimo ugrađene na vanjskim stranama kuća ili ređe kao samostalne ormariće s čeličnim ili plastičnim kućištem.

Metode koriste za spajanje provodnika

Poznate su sledeće metode spajanja provodnika: lemljenje, topljenje, gnječenje (presovanje) i primjenom stezaljki.

-*Lemljenje*: ova metoda spajanja provodnika je najstarija pa je potiskuju modernije i ekonomičnije metode.

-*Topljenje*: ova metoda, se zbog visokih temperatura prilikom rada koje mogu oštetiti izolaciju kabla, u zadnje vrijeme slabije koristi. Metoda zavarivanja daje odlične rezultate i pretpostavlja odlično uvježbano osoblje.

-Metoda spajanja provodnika *gnječenjem* mnogo se koristi jer ima više prednosti nad klasičnim metodama (lemljenje i topljenje):

-*Stezaljke* se najviše koriste kod montaže račvastih spojnice i priključivanja kabla na niskonaponske razvode i kablovske priključne kutije.